



**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA**

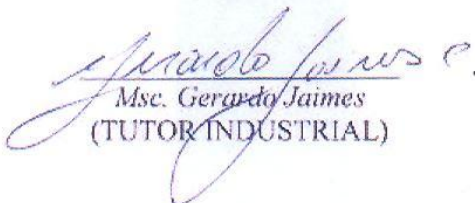
***Desarrollo de una metodología de ensayo mecánico para la
determinación de los parámetros elásticos en muestras de lutita
de núcleos de pozos petroleros.***

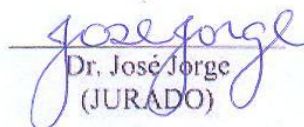
Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Pedro Miguel Troya Montañez
para optar al Título de
Licenciado en Física, Mención Geofísica.

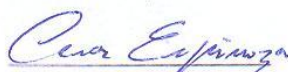
Caracas, 2011.

Quienes suscriben, miembros del jurado que examinó el trabajo presentado por el Br. Pedro Miguel Troya Montañez, titulado: *Desarrollo de una metodología de ensayo mecánico para la determinación de los parámetros elásticos en muestras de lutita de núcleos de pozos petroleros*, para optar por el título de licenciado en Física, mención Geofísica, consideramos que el trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos APROBADO en nombre de la Universidad Central de Venezuela.


Ph.D. Lisseta María D' Onofrio de Rojas
(TUTOR ACADEMICO)


Msc. Gerardo Jaimes
(TUTOR INDUSTRIAL)


Dr. José Jorge
(JURADO)


Lic. Cesar Espinoza
(JURADO)

*A mis padres Rodolfo y Mery.
A mis Hermanos y mi prima Gioconda Montilla.
A Carolina Afán de Rivera.*

AGRADECIMIENTOS:

- ✓ A Dios por brindar cada día la fortaleza necesaria para seguir adelante.
- ✓ A las gerencias corporativas de las empresas PDVSA y PDVSA-INTEVEP, por permitir realizar el trabajo especial de grado en sus instalaciones y por todo el apoyo técnico y humano para el cumplimiento de las actividades desarrolladas durante el tiempo estimado para desarrollo del proyecto.
- ✓ A la recién titulada Ing. Alejandra Barrios por el excelente apoyo en laboratorio y colaboración durante todo el desarrollo de este trabajo. Mil gracias por no solo ser tremenda compañera de laboratorio, sino por la calidad de amiga que resultaste ser para mi persona.
- ✓ Al Ing. Antonio Bravo por el buen recibimiento en las instalaciones de PDVSA-INTEVEP y por todo el apoyo y ayuda humana para cumplimiento de muchas etapas a inicio del proyecto. Una gran persona y como siempre catalogado como un gran amigo.
- ✓ A mis hermanos Rodolfo Troya, José Troya, Freduar Bitriago, Jesús “Chuy” Contreras, Luis “Punk” Hernández, José “Chapulín” Hernández, Jesús “Oso” Rey, Leandro González, Yahir Calderón y “mi morocho” Nelson Castro, quienes siempre han compartido conmigo y dieron su aporte y contribuir en mi estabilidad y bienestar. Muy agradecido por todos los momentos que compartimos.
- ✓ A mis compadres Pedro Hernández, Heyward Solarte y Manuel Tovar, amistades que valoro mucho y con los que además he compartido hasta amargos momentos que he podido superar gracias a su gran ayuda. Del mismo modo para mis comadres Arleth Gómez y Mariana Rivas.
- ✓ A la gran lista de amigos que uno a uno ha marcado buenas expectativas y que en muchos aspectos de la vida dejan su huella haciéndolos casi inolvidables: Scarleth Gutiérrez, Solmar Varela, Ricardo “Chorry” Blanco, Christopher Mendoza, Paola Casanova, Shirly Da Pinho, Paola Freile, Mónica Cornejo, Mónica Mancebo, Leslie Vargas, Patricia González, Iskya García, Erick Castro, Álvaro Ruiz, Cesar Cortes, José Alí Briceño, Omar Guillen, Anderson de Araujo, Juseth Ortega, David Parales, Jesús Acostas, Orlenys Troconis, Alejandra Granadillo, Mayerling Morales, María Virginia Rivas, Gioritza Rivero, Omar León, Jesús “Cristo”, Jhonny De Abreu, Carlos Ramírez, Barbara Ramírez, Jackson Pérez, Jackson Cabezas, Virginia Rojas, Kris Nieves, Jorge Pumar, David Grande, Nathaly Lajo, Adalberto Díaz, Francisco Ysalguez y María Gabriela Molina (Te debo una María).
- ✓ A mi prima y Lic. en física Gioconda Montilla por influenciarme en el mundo de la física además del apoyo incondicional en todo momento durante el transcurso de mi carrera.
- ✓ Al Prof. Gerardo Jaimes y la Prof. Lisseta María D´ Onofrio de Rojas por todo el gran apoyo y la tutoría respectiva en el desarrollo de este proyecto.
- ✓ A mis Padres Rodolfo Troya y Mery Montañez a quienes les debo más que la vida.
- ✓ A Carolina Afán de Rivera a quien le dedico este proyecto (qq).

RESUMEN:

El siguiente trabajo se realizó diferentes ensayos para determinar las propiedades mecánicas en núcleos de lutita. Vale destacar que la lutita es una roca sedimentaria resultante de la compactación de los sedimentos ricos en arcilla y constituyen el tipo más frecuente de las rocas encontradas durante la perforación de petróleo y gas. Para las muestras sometidas a estudios, mediante análisis de difracción de rayos “X”, se aprecia que el contenido de arcilla es lo suficientemente alto y con alto grado de compactación, correspondiendo a arcillas gravosas compactadas con minerales como caolinita y siderita.

Los ensayos mecánicos en muestras de muy baja permeabilidad como la lutita, además de ser tan complejas desde el punto de vista de estabilidad de hoyo (por su inestabilidad química y física), se presenta que la variación de presión de poros (P_p) es mucho mayor a la variación de las presiones externas a la que está sometida la muestra, causando que el rompimiento de la muestra no sea inducido por la carga axial, sino por la variación de la presión efectiva, ya sea axial $\sigma'_{ax} = (\sigma_{ax} - P_p)$ o radial $\sigma'_{rad} = (\sigma_{rad} - P_p)$, trayendo como consecuencia medidas erróneas en la obtención de los módulos elásticos y largos tiempos de ensayo.

Los ensayos mecánicos a los que se sometieron las muestras de lutita fueron de dos tipos:

- Ensayos dinámicos de propagación acústica donde se realiza estudios del comportamiento de las velocidades de ondas “P”, “S₁” y “S₂” cuando se propagan a través de las muestras a distintas presiones de confinamiento. De estos ensayos se obtiene que las velocidades muestran una poca variación con el aumento del confinamiento, además de las bajas variaciones de los módulos elásticos debido a la poca porosidad y alta compactación de la muestra. También se tiene que para muestras verticales y horizontales existe una diferencia en los módulos elásticos, donde las muestras horizontales arrojan valores de módulo de Young (44.81 GPa en promedio) mayores 1.7 veces a los valores de módulo de Young en muestras verticales (26.35 GPa en promedio). Estos resultados se atribuyen a la disposición de la laminación al momento del corte de los tapones, donde en muestras horizontales con laminación vertical, las llegadas de las ondas son mucho más rápidas que en las muestras verticales cuya laminación es horizontal. Las relaciones de Poisson para muestras horizontales estuvieron comprendidas entre 0.24 y 0.26 mientras que para muestras verticales la relación de Poisson estuvo entre los 0.28 y 0.30.

- Ensayos estáticos triaxiales con presión de poros para determinar las propiedades mecánicas estáticas de los núcleos de lutita. En estos se utilizaron los protocolos propuestos por la ASTM (American Society for Testing & Materials) para el acondicionamiento y ensayo de las muestras, donde se persigue controlar la presión de poros (P_p) simultáneamente con las variaciones de las presiones externas (axial y confinante), y así determinar los módulos elásticos y los parámetros “B” y “A” de la Ley de Skempton: $\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$ mediante las curvas de Esfuerzo Vs. Deformación. Cada ensayo triaxial consto de dos fases, una *fase de saturación*, donde la muestras fueron sometidas a confinamiento únicamente para medir la respuesta de la presión de poros con los cambios de las presiones de confinamiento empleando un sistema de drenaje lateral para acelerar las fases de la saturación, estabilizar la presión de poros y garantizar que no haya una respuesta violenta durante la aplicación de carga axial; y una *fase de fracturamiento* donde, mediante presión axial, se procede al fracturamiento de las muestras y la respectiva medición a través de las curvas de Esfuerzo Vs. Deformación de los módulos de Young y relación de Poisson. De este ensayo se estimó (en promedio) módulos de Young medio, tangente y secante de 7.88, 9.17 y 3.34 GPa respectivamente, mientras que para muestras

verticales se tienen módulos de Young medio, tangente y secante de 4.12, 2.22 y 3.00 GPa respectivamente (casi 1.7 menor que las muestras horizontales). Estas diferencias, al igual que en los ensayos acústicos, son atribuidas a la disposición de la laminación en las muestras. En cuanto a la relación de Poisson, los valores medidos en estos ensayos no fueron muy representativos debido a que el enchaquetado utilizado absorbía parte de la deformación radial que se inducía en la muestra, arrojando valores en promedio de 0.1 aproximadamente tanto para muestras verticales como horizontales.

Todos estos ensayos a los que fueron sometidos las muestras de lutita se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Geomecánica de la empresa PDVSA- INTEVEP, el cual cuenta con equipos de alta tecnología entre los cuales se encuentra el equipo AutoLab2000, cuyo diseño es el apropiado para medir propiedades acústicas, mecánicas y eléctricas en rocas de yacimientos petrolíferos.

ÍNDICE GENERAL:

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xi
Capítulo I. GENERALIDADES	
<i>I.1 Introducción</i>	1
<i>I.2 Planteamiento del problema</i>	3
<i>I.3 Objetivos:</i>	
<i>I.3.1 Objetivo General</i>	4
<i>I.3.2 Objetivos Específicos</i>	4
<i>I.4 Antecedentes</i>	5
Capítulo II. MARCO TEÓRICO	
<i>II.1 Teoría de Elasticidad</i>	7
<i>II.2 Esfuerzo</i>	9
<i>II.3 Deformación</i>	17
<i>II.4 Diagrama Esfuerzo Vs. Deformación, Ley de Hooke y Constantes Elásticas</i>	25
<i>II.5 Ecuación de Ondas</i>	32
<i>II.6 Efectos de la Anisotropía</i>	37
<i>II.7 Caracterización de litologías a través de ensayos acústicos y triaxiales</i>	42
<i>II.8 Lutita</i>	44
Capítulo III. MARCO METODOLÓGICO	
<i>III.1 Población y Muestra</i>	45
<i>III.2 Criterio de Selección</i>	45
<i>III.3 Ensayos de Laboratorio:</i>	
<i>III.3.1 Etapa de revisión y selección de las muestras del pozo</i>	46
<i>III.3.2 Etapa de corte, emparejado y pulido de las muestras del pozo</i>	46
<i>III.3.3 Etapa de acondicionamiento de las muestras del pozo</i>	50
<i>III.3.4 Etapa de ensayos con el equipo AutoLab2000</i>	52
Capítulo IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	
<i>IV.1 Descripción de las muestras</i>	60
<i>IV.2 Resultados de ensayos acústicos</i>	61
• <i>Discusión de resultados acústicos para muestras horizontales</i>	72
• <i>Discusión de resultados acústicos para muestras verticales</i>	83
• <i>Discusiones generales de los ensayos acústicos</i>	84
<i>IV.3 Resultados de Ensayos Triaxiales</i>	86

• <i>Discusiones generales de los Ensayos Triaxiales</i>	123
Capítulo V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
Conclusiones.....	132
Recomendaciones.....	134
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	135

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. <i>Conformación de un cuerpo rocoso.....</i>	8
Figura 2. <i>Fuerzas que interactúan sobre un cuerpo rocoso.....</i>	8
Figura 4. <i>Tipos de esfuerzos.....</i>	10
Figura 5. <i>Componentes de Esfuerzo.....</i>	11
Figura 6. <i>Fuerzas actuando sobre las caras principales del prisma rectangular.....</i>	12
Figura 7. <i>Esquema de fuerzas y esfuerzos en una matriz rocosa.....</i>	16
Figura 8. <i>Diagrama de deformaciones en dos dimensiones.....</i>	17
Figura 9. <i>Deformación longitudinal en la dirección del eje x, experimentada por un cuerpo deformable.....</i>	19
Figura 10. <i>Deformación de un cuerpo elástico sometido a esfuerzos de cizalla.....</i>	20
Figura 11. <i>Deformación normal en una de las caras de un cubo elemental.....</i>	22
Figura 12. <i>Variación en el volumen de un cubo elemental.....</i>	23
Figura 13. <i>Relación de Esfuerzo Vs. Deformación para (a) un material elástico lineal, (b) material elástico no lineal, (c) material elástico con histéresis, (d) material que sufre deformaciones permanentes.....</i>	24
Figura 14. <i>Diagrama de Esfuerzo Vs. Deformación.....</i>	25
Figura 15. <i>Rangos del Diagrama de Esfuerzo Vs. Deformación de una muestra real.....</i>	26
Figura 16. <i>Cuerpo sometido a esfuerzo axial.....</i>	29
Figura 17. <i>Variación del tamaño y forma de un cuerpo sometido a un esfuerzo uniaxial.....</i>	30
Figura 18. <i>Tipos de Ondas que se Propagan en un Medio: Ondas de Cuerpo y Ondas de Superficie.....</i>	35
Figura 19. <i>Onda P. La figura muestra la contracción y dilatación del medio en la dirección de propagación de la onda.....</i>	35
Figura 20. <i>Onda S. La figura muestra el movimiento del medio en la dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda.....</i>	36
Figura 21. <i>Onda Rayleigh.....</i>	36
Figura 22. <i>Onda Love.....</i>	36
Figura 23. <i>Resistencia de las rocas para diferentes superficies de laminación.....</i>	37
Figura 24. <i>Generación de exceso de presión de poros con el incremento de los esfuerzos.....</i>	38
Figura 25. <i>Muestra de lutita de la formación Paují del pozo TOM25.....</i>	44
Figura 26. <i>Medidas estándares para la extracción de tapones.....</i>	47
Figura 27. <i>Esquema de la cortadora de caras con disco de diamante.....</i>	48
Figura 28. <i>Secuencia de pasos para el emparejado de las caras con la cortadora de disco de diamante.....</i>	48
Figura 29. <i>Esquema de la refrentadora o pulidora de superficies.....</i>	48
Figura 30. <i>Secuencia de pasos para el pulido de las caras transversales con la refrentadora de superficies.....</i>	49
Figura 31. <i>Esquema del verificador de cuadrante analógico.....</i>	49
Figura 32. <i>Secuencia de pasos para la verificación de cuadrantes en las caras transversales del tapón.....</i>	49
Figura 33. <i>Componentes característicos para ensayos acústicos.....</i>	50
Figura 34. <i>Sistema de drenaje lateral en muestras sometidas a ensayos triaxial.....</i>	51
Figura 35. <i>Componentes de un transductor diferencial de deformación lineal (LVDT) y</i>	

<i>disposición en las muestras</i>	71
Figura 36. <i>Sistema AutoLab2000: Plataforma de ensayos (Izquierda), Consola electrónica y sistema computarizado (Derecha)</i>	53
Figura 37. <i>Esquema de ensayo acústico y las ondas propagadas a través del medio</i>	54
Figura 38. <i>Esquema de ensayo hidrostático por el método tradicional de rampas escalonadas de confinamiento</i>	57
Figura 39. <i>Esquema de ensayo hidrostático por ciclos de incremento y descenso de presión de confinamiento</i>	57
Figura 40. <i>Cálculos de módulo de Young y relación de Poisson a partir de las curva de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	59
Figura 41. <i>Compuestos identificados mediante análisis de difracción de rayos "X" (DRX)</i>	60

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. <i>Propiedades estudiadas en laboratorio.....</i>	2
Tabla 2. <i>Clasificación de algunos materiales según su deformación.....</i>	9
Tabla 3. <i>Valores de Relación de Poisson para diferentes materiales.....</i>	31
Tabla 4. <i>Matriz de Módulos Elásticos.....</i>	31
Tabla 5. <i>Módulos elásticos a través de las velocidades de ondas.....</i>	34
Tabla 6. <i>Valores del parámetro de presión de poros A al momento del fracturamiento para algunas arcillas.....</i>	40
Tabla 7. <i>Módulos elásticos (estáticos y dinámicos) de algunas rocas.....</i>	41
Tabla 8. <i>Parámetros acústicos medidos en los ensayos de propagación de ondas a través de muestras rocosas.....</i>	55
Tabla 9. <i>Valores de dimensiones, orientación y densidades de las muestras sometidas a ensayo acústico.....</i>	61
Tabla 10. <i>Valores de dimensiones, orientación y densidades de las muestras sometidas a ensayo triaxial.....</i>	86
• 14885'11''H	
Tabla 11. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación de la muestra 14885'11''H del pozo TOM25.....</i>	87
Tabla 12. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14885'11''H del pozo TOM25.....</i>	87
• 14993'H	
Tabla 13. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación1 de la muestra 14993'H del pozo TOM25.....</i>	90
Tabla 14. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14993'H del pozo TOM25.....</i>	90
• 14996'11''H	
Tabla 15. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación2 de la muestra 14996'11''H del pozo TOM25.....</i>	94
Tabla 16. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14996'11''H del pozo TOM25.....</i>	94
• 15014'10''H	
Tabla 17. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación1 de la muestra 15014'10''H del pozo TOM25.....</i>	112
Tabla 18. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 15014'10''H del pozo TOM25.....</i>	116
• 15127'9''H	
Tabla 19. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación1 de la muestra 15127'9''H del pozo TOM25.....</i>	102
Tabla 20. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 15127'9''H del pozo TOM25.....</i>	102
• 14879'11''V	
Tabla 21. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación1 de la muestra 14879'11''V del pozo TOM25.....</i>	106
Tabla 22. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14879'11''V del pozo TOM25.....</i>	106

<ul style="list-style-type: none"> • 14883'2''V 	
Tabla 23. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 14883'2''V del pozo TOM25.....</i>	109
Tabla 24. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14883'2''V del pozo TOM25.....</i>	109
<ul style="list-style-type: none"> • 14898'9''V 	
Tabla 25. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 14898'9''V del pozo TOM25.....</i>	112
Tabla 26. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14898'9''V del pozo TOM25.....</i>	112
<ul style="list-style-type: none"> • 14996'V 	
Tabla 27. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 14996'V del pozo TOM25.....</i>	116
Tabla 28. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14996'V del pozo TOM25.....</i>	116
<ul style="list-style-type: none"> • 15121'7''V 	
Tabla 29. <i>Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 15121'7''V del pozo TOM25.....</i>	119
Tabla 30. <i>Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 15121'7''V del pozo TOM25.....</i>	119

ÍNDICE DE GRÁFICOS:

Gráfico 1. <i>Curva resumen de los datos en muestras de rocas obtenidos por Pickett.....</i>	43
Grafico 2. <i>Módulos de Young Vs. Esfuerzo uniaxial para distintas rocas sedimentarias. Sistema de Clasificación de Deere y Miller (1966).....</i>	43
Ensayos Acústicos:	
• 14885'11'H	
Gráfico 3. <i>Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 14885'11'H del Pozo TOM25.....</i>	62
Gráfico 4. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14885'11'H del pozo TOM25.....</i>	62
Gráfico 5. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión confinante en la muestra 14885'11'H del pozo TOM25.....</i>	63
Gráfico 6. <i>Variación del Módulo de Bulk en función de la presión confinante en la muestra 14885'11'H del pozo TOM25.....</i>	63
• 14894'1'H	
Gráfico 7. <i>Variación de las velocidades de ondas en función de la presión confinante en la muestra 14894'1'H del pozo TOM25.....</i>	64
Gráfico 8. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14894'1'H del pozo TOM25.....</i>	64
Gráfico 9. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 14894'1'H del pozo TOM25.....</i>	65
Gráfico 10. <i>Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 14894'1'H del pozo TOM25.....</i>	65
• 14993'H	
Gráfico 11. <i>Variación de las velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 14993'H del pozo TOM25.....</i>	66
Gráfico 12. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14993'H del pozo TOM25.....</i>	66
Gráfico 13. <i>Variación de la relación de Poisson en función de a presión de confinamiento en la muestra 14993'H del pozo TOM25.....</i>	67
Gráfico 14. <i>Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 14993'H del pozo TOM25.....</i>	67
• 15014'10'H	
Gráfico 15. <i>Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 15014'10'H del pozo TOM25.....</i>	68
Gráfico 16. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15014'10'H del pozo TOM25.....</i>	68
Gráfico 17. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15014'10'H del pozo TOM25.....</i>	69
Gráfico 18. <i>Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15014'10'H del pozo TOM25.....</i>	69
• 15122'H	
Gráfico 19. <i>Variación de velocidades de ondas en función de la presión del confinamiento en la muestra 15112'H del pozo TOM25.....</i>	70
Gráfico 20. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en</i>	

<i>la muestra 15122 H del pozo TOM25.....</i>	70
Gráfico 21. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15122 H del pozo TOM25.....</i>	71
Gráfico 22. <i>Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15122 H del pozo TOM25.....</i>	71
• 14877'6''V	
Gráfico 23. <i>Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 14877'6''V del pozo TOM25.....</i>	73
Gráfico 24. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14877'6''V del pozo TOM25.....</i>	73
Gráfico 25. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 14877'6''V del pozo TOM25.....</i>	74
Gráfico 26. <i>Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 14877'6''V del pozo TOM25.....</i>	74
• 14997'1''V	
Gráfico 27. <i>Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 14997'1''V del pozo TOM25.....</i>	75
Gráfico 28. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14997'1''V del pozo TOM25.....</i>	75
Gráfico 29. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 14997'1''V del pozo TOM25.....</i>	76
Gráfico 30. <i>Variación del módulo de Bulk en función de la presión confinante en la muestra 14997'1''V del pozo TOM25.....</i>	76
• 15017'V	
Gráfico 31. <i>Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 15017'V del pozo TOM25.....</i>	77
Gráfico 32. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15017'V del pozo TOM25.....</i>	77
Gráfico 33. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15017'V del pozo TOM25.....</i>	78
Gráfico 34. <i>Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15017'V del pozo TOM25.....</i>	78
• 15019'1''V	
Gráfico 35. <i>Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 15019'1''V del pozo TOM25.....</i>	79
Gráfico 36. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15019'1''V del pozo TOM25.....</i>	79
Gráfico 37. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15019'1''V del pozo TOM25.....</i>	80
Gráfico 38. <i>Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15019'1''V del pozo TOM25.....</i>	80
• 15124'9''V	
Gráfico 39. <i>Variación de velocidades de onda en función de la presión de confinamiento en la muestra 15124'9''V del pozo TOM25.....</i>	81
Gráfico 40. <i>Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15124'9''V del pozo TOM25.....</i>	81

Gráfico 41. <i>Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15124'9'V del pozo TOM25</i>	82
Gráfico 42. <i>Variación del Módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15124'9'V del pozo TOM25</i>	82
Gráfico 43. <i>Relación de Poisson en función de cociente de velocidades al cuadrado para muestras verticales</i>	84
Gráfico 44. <i>Relación de Poisson en función del cociente de velocidades al cuadrado para muestras horizontales</i>	85
Ensayos Triaxiales:	
• 14885'11'H	
Gráfico 45. <i>Variación de Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática</i>	88
Gráfico 46. <i>Variación de la Presión Confinante en función de la Deformación en la fase hidrostática</i>	88
Gráfico 47. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento</i>	89
Gráfico 48. <i>Curva de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	89
• 14993'H	
Gráfico 49. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₁</i>	91
Gráfico 50. <i>Variación de la Presión Confinante en función de la Deformación en la fase hidrostática₁</i>	91
Gráfico 51. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂</i>	92
Gráfico 52. <i>Variación de la Presión Confinante en función de la Deformación en la fase hidrostática₂</i>	92
Gráfico 53. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento</i>	93
Gráfico 54. <i>Curva de esfuerzo Vs. Deformación</i>	93
• 14996'11'H	
Gráfico 55. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₁</i>	95
Gráfico 56. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₁</i>	95
Gráfico 57. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂</i>	96
Gráfico 58. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₂</i>	96
Gráfico 59. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento</i>	97
Gráfico 60. <i>Curva de esfuerzo Vs. Deformación</i>	97
• 15014'10'H	
Gráfico 61. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₁</i>	99
Gráfico 62. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₁</i>	99
Gráfico 63. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂</i>	100
Gráfico 64. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₂</i>	100
Gráfico 65. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento</i>	101
Gráfico 66. <i>Curva de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	101
• 15127'9'H	
Gráfico 67. <i>Variación de las Presiones en función de. Tiempo en la fase hidrostática₁</i>	103
Gráfico 68. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la</i>	

<i>fase hidrostática₁</i>	103
Gráfico 69. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂</i>	104
Gráfico 70. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₂</i>	104
Gráfico 71. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.</i>	105
Gráfico 72. <i>Curva de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	105
• 14879'11'V	
Gráfico 73. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática</i>	107
Gráfico 74. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática</i>	107
Gráfico 75. <i>Variación de la Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.</i>	108
Gráfico 76. <i>Curva de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	108
• 14883'2'V	
Gráfico 77. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática</i>	110
Gráfico 78. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática</i>	110
Gráfico 79. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.</i>	111
Gráfico 80. <i>Curva de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	111
• 14898'9'V	
Gráfico 81. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de saturación₁</i>	113
Gráfico 82. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase de saturación₁</i>	113
Gráfico 83. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de saturación₂</i>	114
Gráfico 84. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase de saturación₂</i>	114
Gráfico 85. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.</i>	115
Gráfico 86. <i>Curvas de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	115
• 14996'V	
Gráfico 87. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática</i>	117
Gráfico 88. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase de saturación</i>	117
Gráfico 89. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.</i>	118
Gráfico 90. <i>Curva de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	118
• 15121'7'H	
Gráfico 91. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₁</i>	120
Gráfico 92. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₁</i>	120
Gráfico 93. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂</i>	121
Gráfico 94. <i>Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₂</i>	121
Gráfico 95. <i>Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.</i>	122
Gráfico 96. <i>Curvas de Esfuerzo Vs. Deformación</i>	122
Gráfico 97. <i>Curvas de Esfuerzo Vs. Deformación para las muestras horizontales</i>	129
Gráfico 98. <i>Curvas de Esfuerzo Vs. Deformación para las muestras verticales</i>	129
Gráfico 99. <i>Ubicación de las medidas de módulos de Young tanto para muestras horizontales como verticales en el sistema de clasificación de Deere y Miller</i>	130

Capítulo I

GENERALIDADES

I.1 Introducción:

Los estudios de las propiedades mecánicas de las rocas o propiedades físicas, tales como Relación de Poisson, Módulo de Cizalla, Módulo de Young, Módulo de Bulk, entre otras propiedades (acústicas, mecánicas, eléctricas y de permeabilidad), pueden ser obtenidas a partir de varias fuentes diferentes generalizadas en dos modos de medidas:

- *Medidas de campo*, a través de registros de cableados sísmicos, los cuales permiten la determinación de constantes elásticas dinámicas a partir de las mediciones continuas de velocidades de ondas compresionales y de cizalla.
- *Medidas de laboratorio*, las cuales permiten una medida directa de los parámetros de esfuerzos y del comportamiento elástico (estático o dinámico) de muestras de núcleos de roca obtenidos de diversas profundidades.

Esos estudios entran dentro de la *física de rocas* que es una disciplina científica, que emerge como ciencia y que sirve de herramienta para otras ciencias de la tierra con el propósito de entender los procesos físicos que interrelacionan las rocas con el medio ambiente ⁽¹⁾. Este entendimiento proporciona no solo un marco teórico conveniente para la comprensión de fenómenos geológicos y físicos que observamos en la superficie e interior de la tierra, sino que es un generador de técnicas que facilitan las tareas de prospección, exploración y extracción de materiales.

Ahora bien, las medidas de laboratorios están bastante involucradas con las actividades exploratorias, ya que permite adquirir, difundir y aplicar nuevos conocimientos para el mantenimiento de la estabilidad de un pozo petrolero. En las actividades de laboratorio se realizan los ensayos de medición de propiedades mecánicas básicas y/o avanzadas a las rocas, o núcleos extraídos de un pozo (ver **Tabla 1**). Dichas muestras son sometidas a condiciones de presión y temperatura similares a la de la roca matriz del yacimiento.

Tabla 1. *Propiedades estudiadas en laboratorio.*

<i>Propiedades básicas</i>	<i>Propiedades avanzadas</i>
<ul style="list-style-type: none">• <i>Porosidad</i>• <i>Permeabilidad</i>• <i>Saturación</i>• <i>Flujo de fluidos</i>• <i>Densidad de grano y de volumen</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Propiedades Mecánicas</i>• <i>Propiedades Acústicas</i>• <i>Propiedades Eléctricas</i>

En la industria petrolera uno de los aspectos más importantes es la evaluación de la estabilidad del pozo. En esta se requiere de rigurosos conocimientos acerca del comportamiento de la matriz rocosa cuando esta es sometida a perturbaciones (esfuerzo-deformación) durante la perforación, así como también de sus propiedades de resistencia al corte y propiedades dinámicas mediante propagación de ondas acústicas. Muchas de estas pruebas de esfuerzo-deformación y de propagación de ondas no son comunes en muestras de lutita debido a las dificultades en la obtención de muestras que no hayan sufrido perturbación, además de los altos costos asociados con la extracción y la falta de procedimientos de ensayo bien establecidos para este tipo de muestras.

I.2 Planteamiento del Problema:

Durante la perforación de un pozo petrolero, se introducen perturbaciones en el estado de esfuerzos de las formaciones. Entre los aspectos más importantes en esta fase de diseño para la construcción del pozo se encuentran los datos de la presión de poro y el gradiente de fractura de las formaciones atravesadas para llegar a las reservas, con el objetivo de construir un hoyo hidráulicamente estable en el menor tiempo posible ⁽⁵⁾.

Por lo general se presenta que no toda la fase de construcción, producción y mantenimiento de un pozo resulta sencilla, debido a que, durante el proceso de perforación, se presentan diferentes problemas operacionales a consecuencia de las acciones de triturar y desplazar el material rocoso que originalmente se encontraba en un estado de relativo equilibrio en el subsuelo.

Particularmente, en las zonas de lutita, debido a que son rocas sedimentarias de grano fino con estructura laminar, alta porosidad, baja permeabilidad y químicamente inestables, ocurren problemas de inestabilidad de hoyo, donde un diseño inadecuado de la composición del fluido de perforación puede generar alteraciones mecánicas a lo largo de la zona intervenida, suficientes para causar problemas de inestabilidad alrededor del hoyo tales como:

- Colapso de las paredes cuando se perforan zonas con insuficiente peso del fluido de perforación.
- Derrumbe del hoyo.
- Atascamiento de herramientas.
- Daño a la formación.
- Parcial o total pérdida de circulación cuando el peso del fluido de perforación es superior al gradiente de fractura de la roca.

Por lo general se requiere determinar los valores de las propiedades mecánicas de las rocas a través de ensayos de laboratorio, para tomar las previsiones durante el proceso de perforación.

Ahora a nivel de laboratorio, en muestras de muy baja permeabilidad como las lutita, ocurre que la variación de presión de poro (P_p) es mayor a la variación de presiones externas. La variación de la presión de poro es tal que el rompimiento de la muestra no es inducida directamente por la carga axial, sino por la variación de la presión efectiva, ya sea axial $\sigma'_{axef} = (\sigma_{ax} - P_p)$ o radial

$\sigma'_{ref} = (\sigma_r - P_p)$, trayendo como consecuencia medidas erróneas en la obtención de los módulos elásticos. Por ende, se requiere de prolongados tiempos para las fases de saturación y consolidación de este tipo de roca en los ensayos mecánicos triaxiales.

Debido a la carencia de estudios a nivel de laboratorio sobre ensayos mecánicos en muestras de lutita en la industria petrolera nacional, surge la necesidad de desarrollar un método de ensayo mecánico que se adapte a las características del equipo de ensayo triaxial AutoLab2000 y adicionalmente reproduzca resultados confiables en el menor tiempo posible.

1.3 Objetivos:

1.3.1 Objetivo General:

Desarrollar una metodología de ensayo mecánico para la determinación de los parámetros elásticos en muestras de lutita de pozos petroleros, basada en el método de variación de presión de poros de Skempton ⁽¹²⁾ en ensayos triaxiales.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Preparar y acondicionar muestras de lutita según los estándares ASTM (American Society of Testing and Materials).
- Realizar estudios de propagación de ondas acústicas en muestras de lutita para la estimación de los módulos elásticos a través de las velocidades de ondas “**P**”, “**S₁**” y “**S₂**”.
- Realizar ensayos mecánicos triaxiales en muestras de lutita en el equipo AutoLab2000 según el método de presión de poros de Skempton.
- Realizar ensayos mecánicos triaxiales en muestras de lutita basándose en el método de estados transitorios propuesto para esta investigación.
- Evaluar los parámetros elásticos y de presión de poros obtenidos en el método de de Skempton y el método de estados transitorios.

1.4 Antecedentes:

A continuación se establece un resumen de algunos estudios e investigaciones realizadas en ensayos mecánicos dinámicos con propagación de ondas acústicas y ensayos estáticos mediante ensayos triaxiales en rocas:

- ***Fjær, (1997*** ⁽⁶⁾); realizó experimentos con muestras de rocas artificiales a los que se le hicieron medidas de transmisión de ondas acústicas con el fin de representar experimentalmente fisuras geométricas y compararlos patrones de fracturas con los obtenidos mediante modelos teóricos. El estudio también confirma que la identificación de la forma de una fisura a partir de los datos sísmicos es muy difícil de obtener, además que el uso de materiales sintéticos en los cuales se pueden controlar fisuras geométricas es una útil herramienta para probar los modelos teóricos de los impactos acústicos sobre las fisuras así como también para evaluar las causas de anisotropía.

- ***Holt, R.M.; Fjær, E. & Rzayev, E., (2004*** ⁽⁷⁾); realizaron estudios de velocidades de ondas *Pa* distintas condiciones de presión en muestras de lutita con porosidades entre el 3% a más del 50%. De estos estudios se obtuvo que las velocidades muestran poca variación con el aumento de la porosidad. Los rangos de anisotropía en ondas *P* se encontraban entre 0 y 20%, aumentando con la disminución de la porosidad. Esta anisotropía es atribuida predominantemente al origen litológico.

Basándose en estas observaciones, se estableció un modelo de física de rocas. El modelo considera a la lutita como un conjunto de granos de minerales y pequeños espacios intergranulares rodeados con salmuera como fluido propios de la formación.

- ***Bejarano, Silvia; (2008)*** ⁽⁸⁾); Realizó un estudio del comportamiento de las amplitudes de las ondas “*P*”, “*S₁*” y “*S₂*” cuando se propagan a través de medios rocosos. Estos estudios se realizaron en el equipo AutoLab2000, capacitado para medir propiedades acústicas, mecánicas y eléctricas en rocas de yacimientos petrolíferos.

Se estudió el comportamiento de las velocidades y la amplitud de las ondas acústicas “*P*”, “*S₁*” y “*S₂*” cuando se aumenta la presión confinante, encontrando que las velocidades y amplitudes de las ondas aumentan cuando aumenta la presión, como consecuencia del cambio en

la estructura rocosa de la muestra. Estos estudios se realizaron en función del ángulo radial en muestras construidas, las cuales su densidad varía cada 30° y en muestras del Pozo VLC-1530.

- **Pickett y Doménico, (1960)** ⁽⁹⁾ ⁽¹⁰⁾ ⁽¹¹⁾; realizaron un sistema de determinación litológica en muestras de pozo mediante mediciones acústicas, basado en las variaciones de los parámetros elásticos entre distintos tipos de roca en función del cociente de velocidades de ondas de corte (S) y de compresión (P). Los datos de laboratorio y de campo, para muchas formaciones diferentes, mostraron que las mediciones correspondientes a rocas como la caliza y dolomita se encuentran en un rango de relaciones de velocidades (V_P/V_S) comprendido entre 1,9 para la piedra caliza y 1.8 para las dolomitas. Para muestras de areniscas se mostró una variación de la relación de la velocidad de cerca de 1.6 a 1.75, con el límite superior que corresponde a las arenas de alta porosidad en baja tensión efectiva.

Pickett compiló todos los puntos de campo y realizó un minucioso análisis manual de los registros de trenes de ondas. Doménico trabajó con datos originales de Pickett determinando la relación de Poisson para todas las muestras, mostrando una curva de caracterización litológica que vincula la relación de Poisson (ν) en función del cociente de velocidades V_P/V_S .

- **Bustamante A.** ⁽¹²⁾; realizó ensayos de laboratorio para determinar parámetros de resistencia al corte en suelos. Establece que la resistencia al corte de un suelo está fuertemente influenciado por factores tales como: el estado del suelo, el tipo de suelo, el contenido de humedad, el tipo y velocidad de carga y la anisotropía; mientras que en el laboratorio la resistencia de corte de un suelo está fuertemente influenciado por el método de ensayo, las muestras alteradas, el contenido de humedad y la velocidad de deformación.

Los ensayos de laboratorio comúnmente empleados para obtener los parámetros de resistencia incluyen los siguientes: Ensayo de compresión no confinada, ensayo de corte directo y ensayos de compresión confinada o triaxiales, donde estos últimos, en la modalidad consolidado – no drenado (CU), primero se satura el espécimen de suelo, luego se procede a consolidarlo por completo con la presión de cámara y finalmente se aplica un esfuerzo desviador llevando al espécimen a la falla en condiciones no drenadas.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

II.1 Teoría de la Elasticidad:

La teoría de la elasticidad juega hoy un papel importante en el diseño de las estructuras de las más convencionales, tales como edificios, máquinas y vehículos, a las más sofisticadas como aviones, satélites, y el trasbordador espacial. El uso de la elasticidad en el proceso de diseño permite alcanzar una estructura más eficiente ya que puede proporcionar valores exactos para los esfuerzos, las deformaciones y desplazamientos, incluso para las estructuras de geometrías complicadas y cargas mecánicas⁽¹³⁾.

Ahora bien, la mayoría de las sustancias que existen en el mundo, sean *sólidas*, *líquidas* o *gaseosas*, cambian cuando sobre estas actúan fuerzas externas. Los sólidos tienden a mantener su forma y volumen, los líquidos tienden a mantener su volumen pero no su forma y los gases no mantienen ni su forma ni su volumen. Pero pasa a menudo que un sólido sometido a fuerzas externas cambia sensiblemente su tamaño y su forma, deformándose ligeramente⁽⁵⁾⁽¹⁸⁾.

Se dice entonces que:

La elasticidad es la propiedad mecánica que tiene un cuerpo sólido de sufrir deformaciones cuando se le aplica una fuerza externa y de retornar a la forma original sin deformación cuando la fuerza externa es removida⁽¹³⁾.

Si imaginamos un cuerpo rocoso como el de la **Figura 1**, vemos que este está formado por partículas pequeñas o moléculas entre las cuales actúan fuerzas, así como también pequeños espacios o poros que interactúan con la matriz rocosa como reacción a esa fuerza producida por la interacción entre partículas.

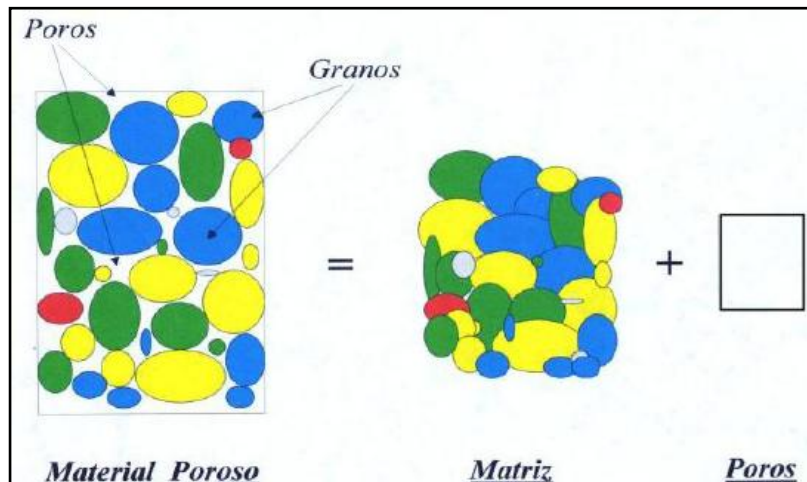


Figura 1. Conformación de un cuerpo rocoso.

Estas fuerzas moleculares se oponen a cambios de forma del cuerpo cuando sobre él actúan fuerzas externas (F_{ext})^{(1) (13)}, es decir, si un sistema exterior de fuerzas se aplica al cuerpo, sus partículas se desplazan y estos desplazamientos mutuos continúan hasta que se establece un equilibrio⁽¹³⁾ entre el sistema exterior de fuerzas y las fuerzas internas (F_{int}) como se parecía en la Figura 2.

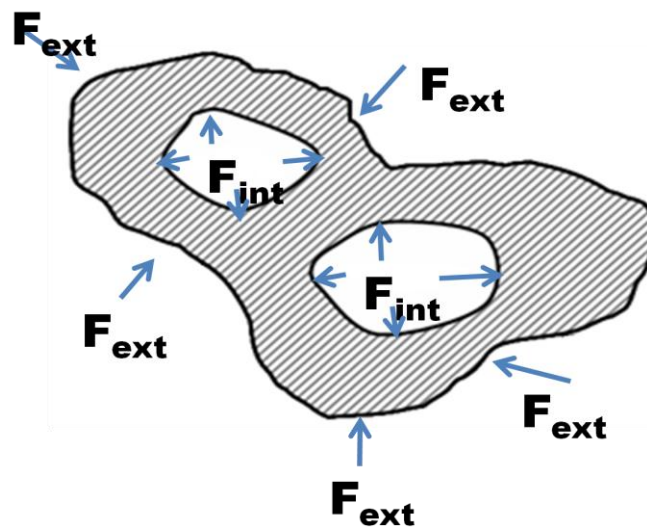


Figura 2. Fuerzas que interactúan sobre un cuerpo rocoso.

Se dice en este caso que el cuerpo está en estado de deformación^{(5) (13)}.

Durante la deformación, las fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo realizan trabajo, y este trabajo se transforma completa o parcialmente en energía potencial de deformación ⁽¹³⁾.

Se dice que el cuerpo es perfectamente elástico si recobra su forma original de un modo completo al descargarlo, y que es parcialmente elástico si la deformación producida por las fuerzas exteriores no desaparece por completo al descargarlo ⁽⁵⁾. En la **Tabla 2** se muestra como se clasifican los materiales según el tipo de deformación.

Tabla 2. Clasificación de algunos materiales según su deformación.

<i>Materiales elásticos</i>	<i>Materiales frágiles</i>	<i>Materiales plásticos</i>
<i>Son aquellos que recobran su forma original luego de que las fuerzas desaparecen.</i>	<i>Son aquellos materiales que se fracturan al aplicar sobre ellos una fuerza externa.</i>	<i>Son aquellos que se deforman irreversiblemente luego de aplicar una fuerza externa.</i>

La teoría de la elasticidad relaciona las fuerzas que son aplicadas en la superficie externa de un cuerpo, dando como resultados cambios en su forma y volumen. La relación entre la fuerza aplicada y la deformación se explica con los conceptos de *Esfuerzo* y *Deformación* ⁽¹⁴⁾.

II.2 Esfuerzo:

El esfuerzo es definido como fuerza por unidad de área, el cual se denota con la letra griega sigma (σ) y es un parámetro que permite comparar la *resistencia mecánica* de los materiales ^{(1) (2) (3) (5) (13) (18)}.

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{F}}{A} \quad \text{Ec. 1}$$

Entiéndase por *resistencia mecánica* como la capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse.

Cuando una fuerza es aplicada a un cuerpo, el esfuerzo es una expresión que relaciona la fuerza con el área en la que la fuerza es aplicada. Si la fuerza varía de un punto a otro, el esfuerzo también varía y su valor, en cualquier punto, se obtiene tomando un elemento de área infinitesimalmente pequeño centrado en el punto y dividiendo la fuerza total que actúa en esa área por la magnitud del área ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

Si la fuerza es perpendicular al área, el esfuerzo se dice que es un *esfuerzo normal* (o presión). La convención de signos opuestos adopta la idea que valores positivos corresponden a esfuerzos de tensión ⁽¹⁾. Cuando la fuerza es tangencial al elemento de área, el esfuerzo es un *esfuerzo de corte* o *de cizalla* (Shearing stress). Cuando la fuerza es ni paralela ni perpendicular al elemento de área, puede ser resuelto en componentes paralelas y perpendiculares al elemento, a través del vector de esfuerzos por lo que cualquier esfuerzo puede ser resuelto en componente normal y componente de corte (o tangencial) ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾.

La tensión o esfuerzo como módulo σ , es igual al módulo de la fuerza dividido por el área sobre la cual se aplica. Como se muestra en **Figura 4**, existen cuatro tipos de esfuerzos: *de estiramiento*, *compresión*, *de cizalla* y *presión* ⁽¹⁸⁾.

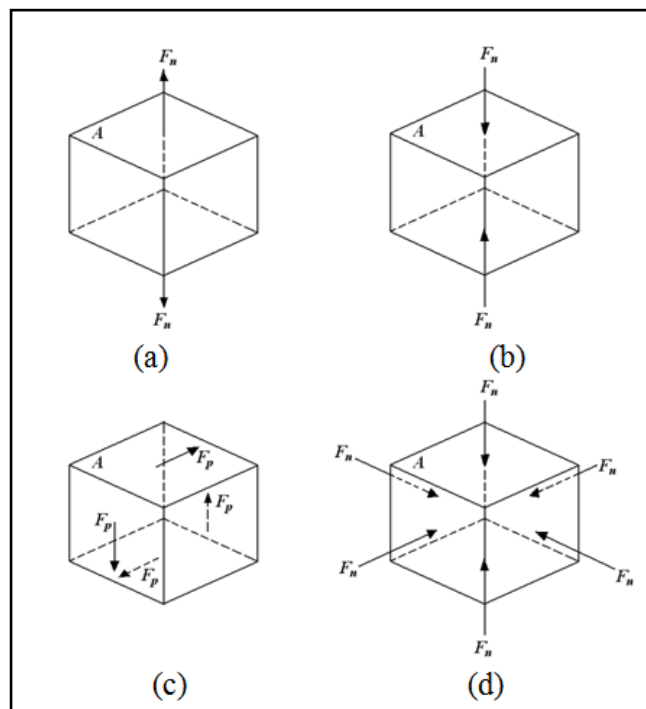


Figura 4. Tipos de esfuerzos: (a) De estiramiento: $\sigma = F_n/A$. (b) De compresión: $\sigma = F_n/A$. (c) De cizalla: $\sigma = F_p/A$. (d) De presión: $\sigma = P = F_n/A$.

Considere un pequeño elemento de volumen. Los esfuerzos que actúan en cualquiera de las seis caras del elemento pueden ser resueltos en componentes, como se muestra en la **Figura 5** por las dos caras perpendiculares al eje x . Los subíndices denotan los ejes x , y , y z respectivamente y σ_{ij} denota un esfuerzo paralelo al eje i (x , y o z) actuando en una superficie perpendicular al eje j (x , y o z). Cuando los subíndices son iguales (como σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz}) el esfuerzo es un esfuerzo normal y cuando los subíndices son diferentes (como σ_{xy}) el esfuerzo es de cizalla ⁽¹⁴⁾.

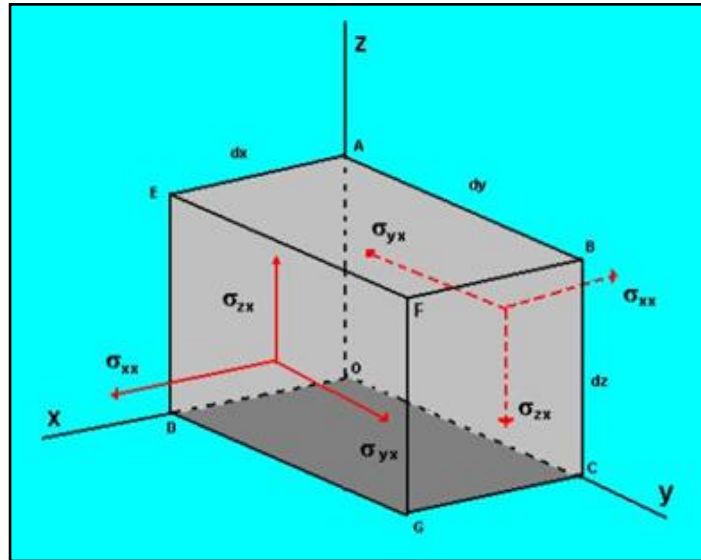


Figura 5. Componentes de Esfuerzo.

Cuando el medio está en equilibrio estático, las fuerzas deben estar balanceadas. Esto significa que los tres esfuerzos σ_{xx} , σ_{yx} y σ_{zx} actuando en la cara OABC pueden ser iguales y opuestos a los correspondientes esfuerzos mostrados en la cara opuesta DEFG, de la misma manera se hace para las cuatro restantes caras ⁽¹⁴⁾. Además, un par de esfuerzos de cizalla, así como por ejemplo σ_{yx} , constituye un par tendiendo a rotar el elemento en torno al eje z . La magnitud de este par está dada por el torque:

$$\text{Fuerza} \times \text{Brazo} = (\sigma_{yx} dy dz) dx \qquad \text{Ec. 2}$$

Si consideramos los esfuerzos en las otras cuatro caras, encontramos que este par es opuesto únicamente por la pareja debido al par de esfuerzos σ_{xy} con magnitud $(\sigma_{xy} dx dz) dy$ ⁽¹⁴⁾. Como el elemento está en equilibrio, el momento total debe ser cero:

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = 0$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

Ec. 3

Siendo τ_i el momento de fuerza o torque producido en cada una de las caras del elemento de volumen ⁽¹⁴⁾.

Dicho de una manera más general, La fuerza está completamente definida por sus componentes F_x , F_y y F_z . Como se muestra en la **Figura 6**, la componente de \vec{F} , que actúa en la dirección del eje x es designada F_x . El tamaño del elemento de superficie está caracterizado por su área A , mientras que su orientación está descrita por la dirección normal a la superficie ⁽¹⁾ ⁽¹⁸⁾.

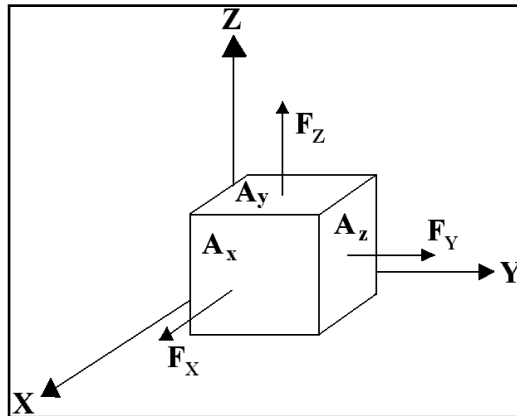


Figura 6. Fuerzas actuando sobre las caras principales del prisma rectangular.

La pequeña superficie con un área normal al eje x es designada A_x . La componente de fuerza F_x que actúa normal a la superficie A_x produce un esfuerzo o tensión normal designada por σ_{xx} . Las componentes de esfuerzos paralelas a los ejes y , y z , aplicados a la superficie A_x corresponden a esfuerzos de cizalla σ_{yx} y σ_{zx} dados por ⁽¹⁸⁾:

$$\sigma_{xx} = \lim_{A_x \rightarrow 0} \left(\frac{F_x}{A_x} \right)$$

$$\sigma_{yx} = \lim_{A_x \rightarrow 0} \left(\frac{F_y}{A_x} \right)$$

$$\sigma_{zx} = \lim_{A_x \rightarrow 0} \left(\frac{F_z}{A_x} \right)$$

Ec. 4

De modo similar, las componentes de la fuerza \vec{F} que actúan sobre un elemento de superficie A_y normal al eje y , definen un esfuerzo normal σ_{yy} y los esfuerzos de cizalla σ_{xy} y σ_{zy} , mientras que

las componentes de normal al eje z define un esfuerzo normal σ_{zz} y los esfuerzos de cizalla σ_{xz} y σ_{yz} . Los nueve esfuerzos definen completamente el estado de esfuerzos de un cuerpo. Ellos están descritos convenientemente por la matriz de esfuerzos ^{(1) (2) (3) (18)}:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 5}$$

Si las fuerzas sobre un cuerpo elástico están balanceadas como para no causar rotación ni desplazamientos, se dice entonces que la matriz de esfuerzos es simétrica ⁽¹⁴⁾. Es decir: $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$; $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$; $\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$ ^{(1) (2) (3)}.

Matemáticamente se tiene que el tensor de esfuerzo $\mathbf{p} = \vec{p}$ se define como la relación de la fuerza resultante \vec{F} a la superficie A:

$$\vec{p} = \frac{\vec{F}}{A} \quad \text{Ec. 6}$$

Para el caso tridimensional, \vec{p} tendrá componentes sobre cada una de las caras del cuerpo, por lo que puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \vec{p}_x &= \sigma_{xx}\hat{x} + \sigma_{xy}\hat{y} + \sigma_{xz}\hat{z} \\ \vec{p}_y &= \sigma_{yx}\hat{x} + \sigma_{yy}\hat{y} + \sigma_{yz}\hat{z} \\ \vec{p}_z &= \sigma_{zx}\hat{x} + \sigma_{zy}\hat{y} + \sigma_{zz}\hat{z} \end{aligned} \quad \text{Ec. 7}$$

Matricialmente:

$$\begin{pmatrix} \vec{p}_x \\ \vec{p}_y \\ \vec{p}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 8}$$

Los \vec{p}_i no son componentes sino vectores. Por ejemplo \vec{p}_x indica al vector \vec{p} actuando sobre la cara perpendicular a x ^{(1) (2) (3)}.

El vector \vec{p} es un vector con una orientación arbitraria. En particular se puede descomponer en la suma de un vector con solo componentes normales más uno con solo componentes tangenciales ⁽¹⁾:

$$\vec{p} = \vec{p}_n + \vec{p}_t = \left[\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \sigma_{yx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & 0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde $\begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix}$ representan los cosenos directores asociados a los planos donde los esfuerzos son normales, los cuales definen planos normales para cada σ_i y para los cuales no actúan esfuerzos tangenciales ⁽¹⁾.

Esta matriz es un tensor, por lo que una rotación del sistema de coordenadas usado para definir a p debe mantener invariable su norma. La siguiente rotación se hace con el fin de obtener los ejes principales de esfuerzo ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. Entonces se rota la matriz de esfuerzo hasta lograr que:

$$\vec{p} = \vec{p}_n \Rightarrow \vec{p} - \vec{p}_n = 0 \\ \vec{p}_t = 0 \quad \text{Ec. 10}$$

Matricialmente:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{yx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} - \sigma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

Donde σ indica la magnitud de las componentes normales del vector \vec{P}_n . Para garantizar que la matriz no tenga solución trivial, el determinante de la matriz debe ser cero, esto es:

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{yx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

La solución del determinante trae como resultado una ecuación cúbica con tres soluciones para σ :

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \sigma_1 \\ \sigma_{med} &= \sigma_2 \\ \sigma_{min} &= \sigma_3 \end{aligned} \quad \text{Ec. 13}$$

El tensor de esfuerzo resultante será:

$$\vec{p} = \sigma \cdot \hat{n} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 14}$$

Estos son los esfuerzos principales ⁽¹⁾.

Si se quiere los esfuerzos de cizalla se hace el mismo procedimiento salvo que ahora las componentes normales serian cero. Sin embargo se ha demostrado que los planos de los esfuerzos cortantes máximos o tangenciales se encuentran a 45° de los planos de los esfuerzos principales ⁽¹⁾, cuyas magnitudes son las siguientes:

$$\begin{aligned}\sigma_{yx} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \\ \sigma_{xz} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \text{Maximo} \\ \sigma_{yz} &= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\end{aligned}\quad \text{Ec. 15}$$

Las unidades del vector esfuerzo o tracción son unidades de presión (fuerza sobre unidades de área): N/m² o dina/cm². También en el sistema Internacional (SI) se usa el pascal (Pa). Esta unidad es pequeña por lo que se emplean múltiplos como el kilopascal (kPa), el megapascal (MPa) o el gigapascal (GPa). En el sistema americano, la fuerza es en libras y el área en pulgadas cuadradas, así el esfuerzo queda en libras sobre pulgadas cuadradas (psi). Particularmente en Venezuela la unidad más empleada es el kgf/cm² para denotar los valores relacionados con el esfuerzo. Otra unidad conveniente es el bar: 1bar = 10⁶ dina/cm² = 10⁵ N/m² = 1 atm.

Las relaciones entre unidades de uso corriente son:

$$1 \text{ psi} = 6.8 \times 10^{-2} \text{ bar.}$$

$$1 \text{ Pascal o Pa} = 1 \text{ N/m}^2.$$

$$1 \text{ MPa} = 145 \text{ psi.}$$

Vale destacar que estas deducciones prestan solo una excelente base para el conocimiento e interpretación de los parámetros mecánicos, considerando a la roca como un material homogéneo e isotrópico, y que el comportamiento mecánico de la matriz es debido a los esfuerzos externos que sobre dicha matriz actúan.

Ahora bien a nivel experimental, la matriz rocosa debido a procesos de formación presenta irregularidades y una distribución no uniforme del arreglo de los granos durante la consolidación y compactación. Un caso particular es el hecho de presencia de los espacios vacios (poros), que pueden estar llenos o no de fluidos como agua, gas e hidrocarburos. Estos pequeños espacios

cambian la estructura de la matriz rocosa y al mismo tiempo el comportamiento de la misma cuando se le es aplicado esfuerzos externos.

Si la roca es permeable y sus poros están bien interconectados, al saturar la muestra y someterla a esfuerzos externos axial (σ_1) y radial (σ_3), y si se impide la salida del agua, la presión de poros aumentará. Ya que esta presión es del tipo hidrostático, y además ténsil (del interior de los poros hacia afuera), contrarrestará los esfuerzos externos. De esta manera los esfuerzos aplicados en la roca disminuirán en una cantidad a la presión de poros y el esfuerzo resultante se denominará esfuerzo efectivo. Otras veces ocurre que, cuando los esfuerzos externos son rápidos y bruscos, el rompimiento de la roca no es debido a ese incremento de esfuerzos externos sino a una respuesta violenta por parte de la presión de poros, trayendo como consecuencia no un rompimiento sino un estallido de la matriz rocosa.

A continuación se presenta un análisis del efecto de los espacios porosos de una matriz rocosa como la de la **Figura 7**.

En un estado de relativo equilibrio se tiene por segunda y tercera ley de Newton lo siguiente:

$$F_{ext.} = F_{int.} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde F_{ext} corresponde a las fuerzas externas y F_{int} a las fuerzas internas

Tomando en cuenta las áreas internas y externa de la matriz rocosa, se tiene que:

$$\begin{aligned} \frac{F_{ext.}}{A_{int.}} &\gg \frac{F_{ext.}}{A_{ext.}} \\ \sigma_{int.} &\gg \sigma_{ext.} \end{aligned} \quad \text{Ec. 17}$$

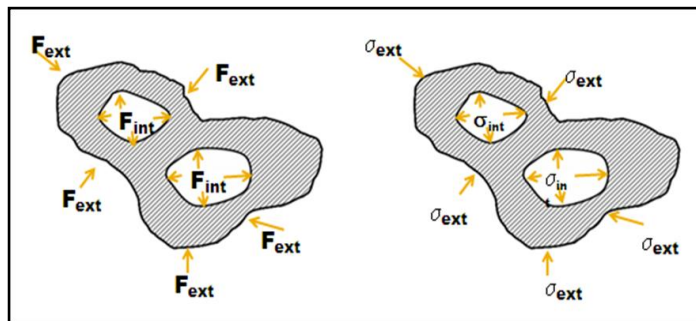


Figura 7. Esquema de fuerzas y esfuerzos en una matriz rocosa.

Es natural pensar que muchos de los cuerpos que poseen espacios porosos se comporten anisotrópicamente respecto a sus propiedades mecánicas, comparado con un material homogéneo e isotrópico. En particular, esta anisotropía es la causante del comportamiento no lineal en las curvas de Esfuerzo Vs. Deformación.

II.3 Deformación:

Como se mencionó al principio de este capítulo, las fuerzas aplicadas a un sólido deben producir cambios en el mismo. Estos cambios son conocidos como deformaciones, y dentro del rango elástico, estas deformaciones desaparecen una vez que las fuerzas externas dejen de actuar ^{(1) (13)}. Estas deformaciones son muy pequeñas comparadas con las dimensiones del sólido.

Si las deformaciones son infinitesimales, se aplica un principio fundamental conocido como el *principio de superposición*, el cual establece:

“La deformación producida en cualquier punto de un cuerpo por un sistema de esfuerzos puede ser sumada a aquellas producidas por otro sistema con el resultado final independiente del orden en que los esfuerzos fueron aplicados.”⁽¹⁴⁾

Este principio nos garantiza que podemos realizar un experimento sobre un sólido en cualquier orden y obtendremos siempre el mismo resultado.

Considere un rectángulo PQRS en el plano $x - y$ del diagrama de la **Figura 8**.

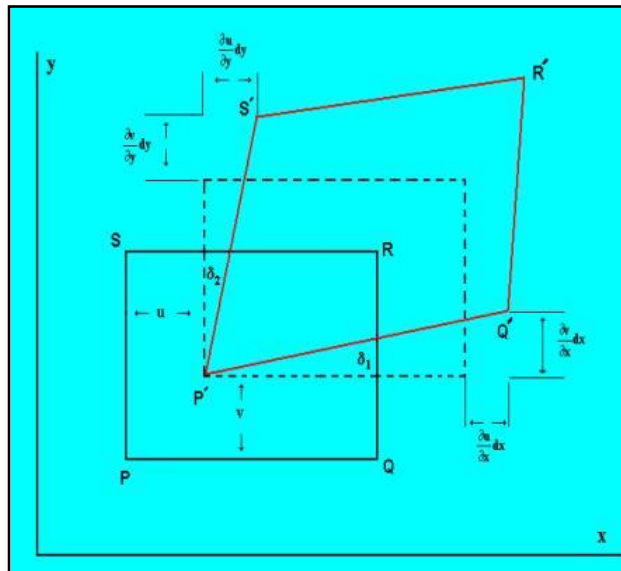


Figura 8. Diagrama de deformaciones en dos dimensiones.

Cuando los esfuerzos son aplicados. El punto P pasa a P', donde PP' tiene componentes u y v. Si los otros vértices (Q, R y S) tienen el mismo desplazamiento que P, el rectángulo simplemente es desplazado como un todo. En este caso no hay cambios en el tamaño y forma sino un simple desplazamiento. Si ahora u y v son diferentes para los diferentes vértices, el rectángulo está sometido a cambios en tamaño y/o forma ⁽¹⁴⁾.

Suponiendo que $u = u(x, y)$ y $v = v(x, y)$, las coordenadas de los vértices antes y después de someterse a esfuerzos deformantes son:

$$P(x, y), P'(x + u, y + v)$$

$$Q(x + dx, dy), Q'(x + dx + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx, y + v + \frac{\partial v}{\partial x} dx)$$

$$S(x, y + dy), S'(x + u + \frac{\partial u}{\partial y} dy, y + dy + v + \frac{\partial v}{\partial y} dy)$$

$$R(x + dx, y + dy), R'(x + dx + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy, y + dy + v + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy)$$

Estos cambios en las cantidades u y v, y los términos $\partial u/\partial x$ y $\partial u/\partial y$, son mucho más pequeños que las cantidades dx y dy bajo esa consideración se puede ver que:

- PQ incrementa en longitud una cantidad $(\frac{\partial u}{\partial x}) dx$ y PS una cantidad $(\frac{\partial v}{\partial y}) dy$, entonces $(\frac{\partial u}{\partial x})$ y $(\frac{\partial v}{\partial y})$ son incrementos fraccionales de longitud en la dirección de los ejes.
- Los ángulos infinitesimales δ_1 y δ_2 son iguales a $(\frac{\partial v}{\partial x})$ y $(\frac{\partial u}{\partial y})$ respectivamente.
- El ángulo recto en P decrece en la cantidad $(\delta_1 + \delta_2) = (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})$.
- El rectángulo como un todo ha sido rotado en el sentido contrario a las agujas del reloj a través del ángulo $(\delta_1 - \delta_2) = (\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y})$.

Las cantidades $(\frac{\partial v}{\partial x})$ y $(\frac{\partial u}{\partial y})$ representan el incremento de longitud en las direcciones de los ejes x, y, los cuales son llamados deformaciones normales. Las cantidades $(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})$ que son producidas por los esfuerzos aplicados y provocan un cambio en la forma del medio, son conocidas como deformaciones de cizalla y se denotan con el símbolo ϵ_{xy} . Las cantidades $(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y})$, representan

la rotación del cuerpo alrededor del eje z , la cual no involucra cambios de forma o tamaño, por lo tanto no hay deformaciones. Se puede denotar con el símbolo de $\theta_z^{(14)}$.

De esta información se entiende que las deformaciones están referidas al cambio relativo (es decir, al cambio fraccional) en una dimensión de tamaño o forma de un cuerpo. Se pueden reconocer dos tipos de deformación:

- *Homogénea*: Cuando cada parte de un cuerpo está sujeta a la misma deformación en cualquier dirección de desplazamiento, la deformación es considerada homogénea.
- *Heterogénea*: La deformación es heterogénea si no es la misma a través del cuerpo.

Si extendemos este análisis a tres dimensiones, se escriben las componentes de desplazamiento como (u, v, w) para un punto $P(u, v, w)$, donde las deformaciones elementales para este caso son:

- *Deformaciones normales*: También considerada como longitudinal o extensional, donde el cambio fraccional en longitud de un elemento es a lo largo del eje (Ver **Figura 9**) ⁽¹⁸⁾.

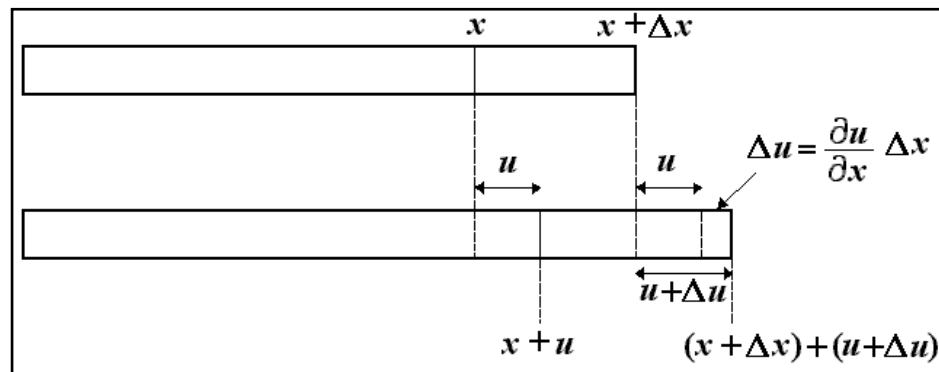


Figura 9. Deformación longitudinal en la dirección del eje x , experimentada por un cuerpo deformable.

Si el punto x es desplazado una cantidad infinitesimalmente pequeña u en la dirección del eje x , el punto $x + \Delta x$ se desplazará en una cantidad $u + \Delta u$, en donde $\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x$. La deformación longitudinal o extensión en la dirección del eje x , es el cambio fraccional en longitud de un elemento a lo largo del eje x ⁽¹⁸⁾. La separación original de los dos puntos era Δx , pero uno de ellos fue desplazado en una cantidad u mientras que el otro fue desplazado en una cantidad $u + \Delta u$, así que la nueva separación de los dos puntos es $\Delta x + \Delta u$. La componente de la

deformación paralela al eje x que resulta de un pequeño desplazamiento paralelo al eje x es denotada por ϵ_{xx} y es dada por ⁽¹⁴⁾:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\text{Variación en la separación}}{\text{Separación original}} = \frac{\left(\Delta x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x\right) - \Delta x}{\Delta x} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Ec. 18}$$

Para las demás componentes:

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{Ec. 19}$$

- *Deformaciones de cizalla:* Las componentes de esfuerzos de cizalla generan deformaciones de cizalla, las cuales se manifiestan como cambios en las relaciones angulares entre las partes de un cuerpo ⁽¹⁸⁾.

Esto es fácilmente ilustrado en dos dimensiones, como se puede apreciar en la **Figura 10**, donde se considera un rectángulo ABCD de lados Δx y Δy con la deformación debida a los esfuerzos de cizalla actuando en el plano x - y ⁽¹⁸⁾.

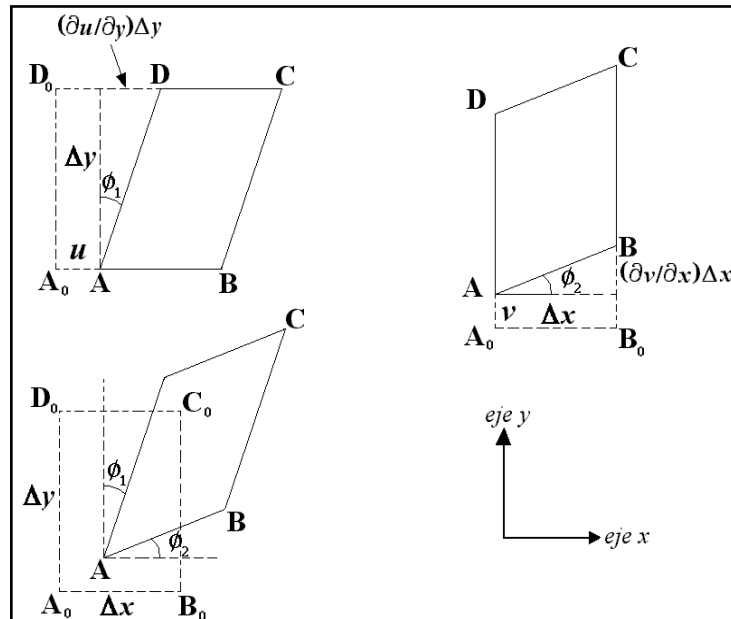


Figura10. Deformación de un cuerpo elástico sometido a esfuerzos de cizalla.

El punto A es desplazado en la dirección paralela al eje x en una cantidad u . Debido a la deformación de cizalla, los puntos entre A y D experimentan grandes desplazamientos, la

mayoría de ellos desde A. El punto D, el cual está a una distancia Δy sobre A, es desplazado en una cantidad $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\Delta y$ en la dirección del eje x ⁽¹⁸⁾.

Esto causa una rotación en el sentido horario del lado AD alrededor de un pequeño ángulo ϕ_1 dado por:

$$\tan \phi_1 = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\Delta y}{\Delta y} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Ec. 20}$$

Igualmente, el punto A es desplazado en dirección paralela al eje y por una cantidad v , mientras que el punto B, el cual está a una distancia horizontal Δx con respecto a A, es desplazado por la cantidad $\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\Delta x$ en la dirección del eje y ⁽¹⁸⁾. Como resultado el lado AB rota en sentido antihorario alrededor de un pequeño ángulo ϕ_2 dado por:

$$\tan \phi_2 = \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\Delta x}{\Delta x} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{Ec. 21}$$

Las deformaciones elásticas producen pequeños desplazamientos infinitesimales, y para ángulos pequeños se puede escribir $\tan \phi_1 = \phi_1$ y $\tan \phi_2 = \phi_2$.

La deformación de cizalla en el plano x - y (ϵ_{xy}) está definida como la media de la deformación angular total ⁽¹⁴⁾:

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \text{Ec. 22}$$

De modo similar, se pueden tener las demás componentes de deformación, las cuales (usando argumentos de simetría en unos casos) están definidas a continuación ⁽¹⁴⁾:

$$\begin{aligned} \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \epsilon_{zx} = \epsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \text{Ec. 23}$$

Además de presentar deformación el cuerpo, también el mismo está sujeto a una simple rotación la cual está dada por ⁽¹⁴⁾:

$$\begin{aligned}\theta_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \theta_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \theta_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad \text{Ec. 24}$$

La deformación longitudinal y de cizalla queda definida entonces por la matriz simétrica de deformaciones:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{yx} & \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{zy} \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}\quad \text{Ec. 25}$$

Significado físico de las deformaciones:

Las deformaciones ϵ_{ij} tienen dependiendo de los valores de los subíndices i,j significados físicos diferentes.

- En el caso de $i=j$, las deformaciones ϵ_{ij} se denominan *deformaciones normales* y estas, como se muestra en la **Figura 11**, representan los cambios de longitud por unidad de longitud en las direcciones de los ejes de coordenadas ^{(1) (14)}.

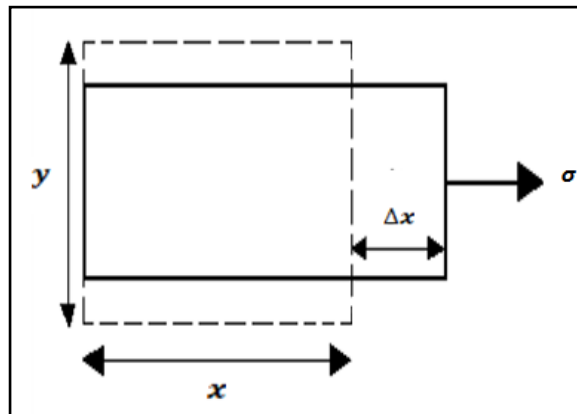


Figura11. Deformación normal en una de las caras de un cubo elemental.

Para el caso de tres dimensiones, si el cuerpo está sometido a esfuerzos normales, estos esfuerzos traen cambios en el volumen (ver **Figura 12**), los cuales están representados por la dilatación Δ que establece la variación relativa del volumen dada por ⁽¹⁴⁾:

$$\Delta = \frac{V_f - V_o}{V_o} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \varepsilon_{ii} \quad \text{Ec. 26}$$

Con:

$$V_o = dx \, dy \, dz$$

$$V_f = dx(1 + \varepsilon_{xx}) + dy(1 + \varepsilon_{yy}) + dz(1 + \varepsilon_{zz}) \quad \text{Ec. 27}$$

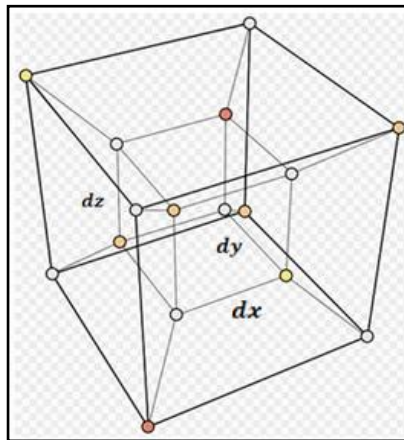


Figura 12. Variación en el volumen de un cubo elemental.

- En los casos en que $i \neq j$, las deformaciones son un poco más complicadas, las cuales se denominan *deformaciones de cizalla* y representan la mitad de los cambios de longitud por unidad de longitud de un eje con respecto a otro, es decir, que ocurre un cambio a lo largo de un eje cuando se deforma el cuerpo a lo largo de otro eje ⁽¹⁴⁾.

La unidad utilizada para medir las deformaciones normales es el mili-strain (me), todas las deformaciones ε_{ij} , bien sea con $i \neq j$ o $i = j$, no tienen dimensiones ya que representan cambios relativos de longitud ⁽¹⁴⁾.

Basándose una vez más en la evidencia experimental, se tiene que la mayoría de los materiales presentan un comportamiento mecánico (definido a través de análisis de curvas de Esfuerzo Vs. Deformación) afectado por la porosidad en gran parte, dependiendo del tipo de material sometido al estudio.

Comúnmente se aprecia que para un material elástico lineal, siempre existe una relación constante entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante, sin importar la magnitud del esfuerzo y la deformación. La relación esfuerzo-deformación para tal material es además una línea recta, como se muestra en la **Figura 13-a**. Algunos materiales no obedecen a la relación

lineal esfuerzo-deformación y se comportan de una manera no lineal. El comportamiento no lineal puede tener varias causas, y aparecer en muchas formas diferentes. La **Figura 13-b** muestra un ejemplo. Este material tiene una relación esfuerzo deformación no lineal, dado que la relación de esfuerzo a la deformación no es la misma para todos los esfuerzos. La relación es, sin embargo, idéntica para el proceso de carga y descarga. Tales materiales son denominados perfectamente elásticos.

La relación esfuerzo-deformación mostrada en la **Figura 13-c**, es comúnmente observada en suelos y rocas. La trayectoria de descarga es diferente de la trayectoria de carga; este efecto es llamado histéresis. Para materiales con comportamiento parecido, el trabajo hecho durante la carga no es enteramente abandonado durante la descarga, es decir, una parte de la energía de deformación se disipa en el material.

Si como en la **Figura 13-c**, las deformaciones desaparecen cuando el esfuerzo retorna a cero, el material se considera elástico. Si no, como en la **Figura 13-d**, el material ha sufrido una deformación permanente durante el ciclo de carga/descarga. Para esfuerzos suficientemente grandes, muchas rocas entran a una fase donde ocurren deformaciones permanentes, y todavía el material es capaz de resistir carga, o sea, la pendiente de la curva esfuerzo-deformación es aún positiva. El material es entonces considerado *dúctil*. El punto donde la transición de comportamiento elástico a dúctil ocurre, es llamado *punto de cedencia*⁽¹⁷⁾.

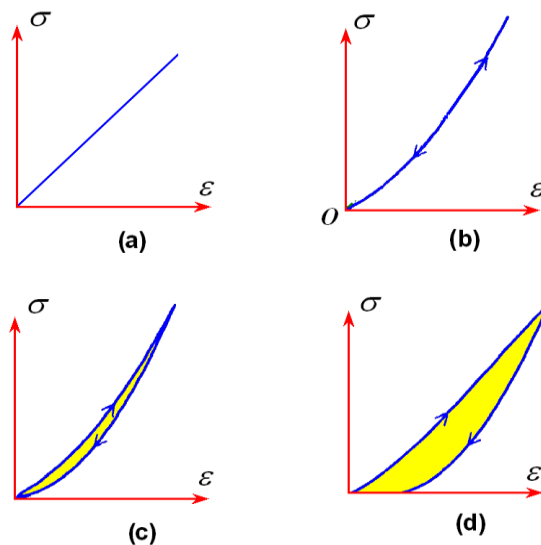


Figura 13. Relación de Esfuerzo Vs. Deformación para (a) un material elástico lineal, (b) material elástico no lineal, (c) material elástico con histéresis, (d) material que sufre deformaciones permanentes.

II.4 Diagrama Esfuerzo Vs. Deformación, Ley de Hooke y Constantes Elásticas:

El diseño de elementos estructurales y caracterización de estructuras en yacimientos implica determinar la resistencia y rigidez del material estructural. Estas propiedades se pueden relacionar si se evalúa un cuerpo sometido a una fuerza (axial o de confinamiento) para la cual se registra simultáneamente la fuerza aplicada y el alargamiento producido. Estos valores permiten determinar el esfuerzo y la deformación que al graficar originan el denominado *diagrama de esfuerzo y deformación*.

En casos reales, los diagramas son similares si se trata del mismo material y de manera general permite agrupar los materiales dentro de dos categorías con propiedades afines que se denominan materiales *dúctiles* y materiales *frágiles*. Los diagramas de materiales dúctiles se caracterizan por ser capaces de resistir grandes deformaciones antes de la rotura, mientras que los frágiles presentan un alargamiento bajo cuando llegan al punto de rotura.

Elementos del diagrama Esfuerzo Vs. Deformación:

En el diagrama de la **Figura 14** se observa un tramo de recta inicial hasta un punto denominado límite de proporcionalidad. Este límite tiene gran importancia para la teoría de los sólidos elásticos.



Figura 14. Diagrama de Esfuerzo Vs. Deformación.

Los puntos importantes del diagrama de esfuerzo deformación son:

- Límite de proporcionalidad: hasta este punto la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal;
- Límite elástico: más allá de este límite el material no recupera su forma original al ser descargado, quedando con una deformación permanente;
- Punto de cedencia: aparece en el diagrama un considerable alargamiento o cedencia sin el correspondiente aumento de carga. Este fenómeno no se observa en los materiales frágiles;
- Esfuerzo último: máxima ordenada del diagrama esfuerzo – deformación;
- Punto de ruptura: cuanto el material falla.

Dado que el límite de proporcionalidad, elasticidad y punto de cedencia están tan cerca se considera para la mayoría de los casos como el mismo punto. De manera que el material al llegar a la cedencia deja de tener un comportamiento elástico y la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación deja de existir⁽¹³⁾.

Un esquema real de un diagrama de esfuerzo-deformación, se muestra a continuación en la **Figura 15**, donde se aprecia los rangos de comportamiento real de un material sometido a esfuerzos:

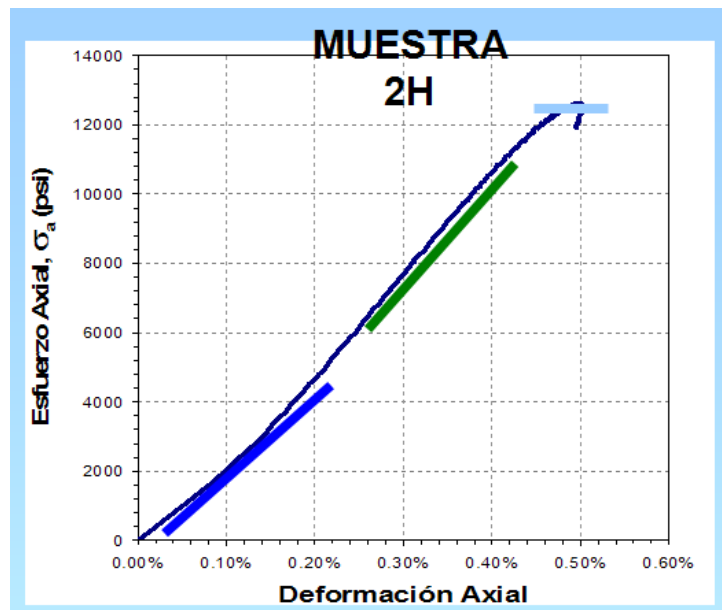


Figura 15. Rangos del Diagrama de Esfuerzo Vs. Deformación de una muestra real: Elástico (línea azul oscura), Plástico (línea verde) y Fracturamiento (línea azul clara).

Ley de Hooke:

En los diagramas de Esfuerzo Vs. Deformación, la línea recta indica que la deformación es directamente proporcional al esfuerzo en el tramo elástico, este principio conocido como la *ley de Hooke*. En este rango elástico, las deformaciones son pequeñas por lo que se establece una relación entre los esfuerzos y deformaciones de un cuerpo sometido a cambios en tamaño y forma.

Esta ley establece que:

“Una deformación dada es directamente proporcional a los esfuerzos producidos”⁽¹⁴⁾

En general la Ley de Hooke es una relación complicada pero cuando el medio es Isotrópico, es decir, cuando las propiedades del medio no dependen de la dirección, esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\sigma_{ii} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{ii} \\ \sigma_{ij} &= \mu\varepsilon_{ij}\end{aligned}\quad \text{Ec. 28}$$

Donde las cantidades λ y μ son parámetros que relacionan los esfuerzos aplicados con las deformaciones producidas conocidas como constantes de Lamé, donde μ también es conocida como módulo de cizalla o módulo de rigidez, y λ conocida como módulo de dilatación.

- La primera expresión establece que un esfuerzo normal puede producir deformación en otra dirección que la dirección del esfuerzo.
- La segunda expresión establece que un esfuerzo cortante produce solo deformaciones cortantes.
- Las deformaciones resultantes de los esfuerzos que exceden este límite no desaparecen completamente cuando los esfuerzos son removidos⁽¹⁴⁾.

Constantes elásticas:

En el sistema masa resorte se aprecia que existe una relación simple entre la fuerza aplicada a la masa y la deformación del resorte. Esta relación lineal viene expresada matemáticamente de la siguiente forma:

$$F = kx \quad \text{Ec. 29}$$

Donde k representa la constante de proporcionalidad o constante de rigidez del resorte. En el caso de un sólido rígido se ha encontrado que las deformaciones sufridas por un sólido rígido también son linealmente proporcionales a los esfuerzos aplicados. La ley que rige este fenómeno se conoce como la ley generalizada de Hooke. El enunciado de esta ley establece que:

“Para cada punto de un cuerpo tridimensional y linealmente elástico, las seis componentes del tensor de esfuerzo están linealmente relacionadas con las seis componentes del tensor de deformación por medio de un tensor constante llamado tensor de rigidez y denominado como

$$C_{klmn}.”^{(1)}$$

Matemáticamente expresamos esta relación como:

$$\sigma_{kl} = C_{klmn} \epsilon_{mn} \quad \text{Ec. 30}$$

Conforme a lo establecido en la *Ley de Hooke*, cuando un cuerpo se deforma elásticamente, la razón o cociente entre el esfuerzo y la deformación definen el módulo elástico del cuerpo (de acuerdo a la relación lineal entre esfuerzo y deformación). Aunque anteriormente definimos la ley de Hooke por medio de las constantes de Lamé (λ y μ), en la práctica se suele trabajar con otras constantes derivadas de estas y que tienen un significado físico mucho más práctico. Considerando la **Ec. 26**, podemos obtener otras constantes elásticas haciendo las siguientes consideraciones:

- Considerando un sólido, el cual está sometido a presión hidrostática, es decir cada punto del cuerpo recibe el mismo esfuerzo. entonces los esfuerzos de cizalla son cero y el cuerpo se dilata o comprime sin cizallamiento, por lo que las deformaciones de cizalla son nulas ⁽¹⁴⁾.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda\Delta + 2\mu\epsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda\Delta + 2\mu\epsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda\Delta + 2\mu\epsilon_{zz} \end{aligned} \quad \text{Ec. 31}$$

Sumando las componentes de esfuerzo y notando que $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -P$ (que es la presión hidrostática) se tiene que:

$$-3P = (3\lambda + 2\mu)\Delta \quad \text{Ec. 32}$$

Entonces se define el *módulo de Bulk* a través de la relación de la presión hidrostática P con la dilatación Δ :

$$K = -\frac{P}{\Delta} = \frac{(3\lambda + 2\mu)}{3} \quad \text{Ec. 33}$$

El módulo de Bulk, es el parámetro utilizado para medir la propiedad de algunos materiales de resistirse al cambio de volumen sin experimentar cambio de forma. Es la relación entre el esfuerzo o presión y el cambio unitario de volumen (dilatación) ⁽¹⁸⁾.

- Considerando el inverso de módulo de Bulk, K^{-1} se obtiene el conocido *módulo de compresibilidad* β ⁽¹⁴⁾:

$$\beta = K^{-1} = \frac{1}{K} = \frac{3}{3\lambda + 2\mu} \quad \text{Ec. 34}$$

- Considerando un sólido sometido a un esfuerzo uniaxial, es decir el cuerpo recibe una presión a lo largo de un solo eje del sistema de coordenadas como indica la **Figura 16** ⁽¹⁴⁾:

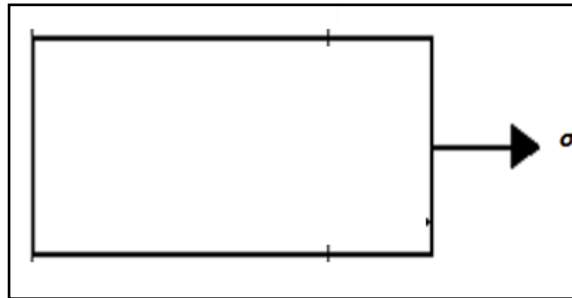


Figura 16. *Cuerpo sometido a esfuerzo axial.*

La aplicación de la Ley de Hooke para este caso dará:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu)\epsilon_{xx} + \lambda\epsilon_{yy} + \lambda\epsilon_{zz} \\ 0 &= \lambda\epsilon_{xx} + (\lambda + 2\mu)\epsilon_{yy} + \lambda\epsilon_{zz} \\ 0 &= \lambda\epsilon_{xx} + \lambda\epsilon_{yy} + (\lambda + 2\mu)\epsilon_{zz} \end{aligned} \quad \text{Ec. 35}$$

Donde de estas expresiones se obtiene:

$$\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = -\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}\epsilon_{xx} \quad \text{Ec. 36}$$

De esta forma se define el *módulo de Young* como:

$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}} = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad \text{Ec. 37}$$

Esta representa la relación entre el esfuerzo uniaxial aplicado a un sólido y la deformación sufrida a lo largo del eje de aplicación del esfuerzo. Este parámetro es empleado para medir la resistencia de un material al someterlo a esfuerzos de estiramiento y compresión ⁽¹⁾.

- Si consideramos que al aplicar un esfuerzo uniaxial, no solo ocurre una contracción longitudinal como se ve en la **Figura 17**, sino que también debe existir una expansión lateral:

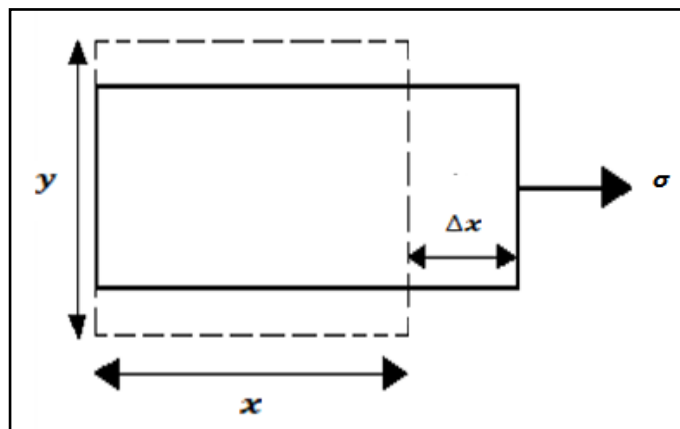


Figura 17. Variación del tamaño y forma de un cuerpo sometido a un esfuerzo uniaxial.

Se define entonces la constante de proporcionalidad ν (*Relación de Poisson*) al dividir la deformación transversal unitaria entre la deformación longitudinal unitaria ⁽¹⁴⁾:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}} = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad \text{Ec. 38}$$

La Relación de Poisson es una cantidad adimensional. El valor de la constante elástica ν de un material deformado, varía entre 0 (ausencia de deformación lateral) y un valor máximo de 0.5 (sin variaciones en volumen) para un fluido incompresible. En muchos casos, las rocas rígidas como el granito tienen un valor de ν cercano a 0.45, mientras que en rocas blandas, como sedimentos poco consolidados, ν está alrededor de 0.05. En el interior de la Tierra, ν comúnmente tiene un valor que oscila entre 0.24 y 0.27. Un cuerpo para el cual el valor de ν es igual a 0.25 es considerado algunas veces un *cuerpo ideal de Poisson*⁽¹⁶⁾.

En la **Tabla 3** se puede apreciar diferentes valores de la relación de Poisson para diferentes tipos de componentes del suelo.

Tabla 3. Valores de relación de Poisson para diferentes materiales.

<i>Material</i>	ν
<i>Arenas limpias</i>	0.15 - 0.22
<i>Arenas saturadas</i>	0.20 - 0.33
<i>Caliza</i>	0.20 - 0.39
<i>Lutita</i>	0.28 - 0.40
<i>Carbón</i>	> 0.40
<i>Agua (Incompresible)</i>	0.5

Todos estos parámetros elásticos, pueden ser expresados en términos del módulo de Young y el cociente de Poisson u otra de las constantes elásticas antes mencionadas. La **Tabla 4** resume lo antes explicado:

Tabla 4. Matriz de módulos elásticos.

	E	ν	K	μ	λ
E, ν	E	ν	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{(1+2\nu)}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
E, k	E	$\frac{3k-E}{6k}$	k	$\frac{3kE}{9k-E}$	$\frac{3k(3k-E)}{9k-E}$
E, μ	E	$\frac{E-2\mu}{2\mu}$	$\frac{\mu E}{3(3\mu-E)}$	μ	$\frac{\mu(E-2\mu)}{(3\mu-E)}$
E, λ	E	$\frac{2\lambda}{E+\lambda+R}$	$\frac{E+3\lambda+R}{6}$	$\frac{E+R-3\lambda}{4}$	λ
ν, k	$3k(1-2\nu)$	ν	k	$\frac{3k(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	$\frac{3k\nu}{1+\nu}$
ν, μ	$2\mu(1+\nu)$	ν	$\frac{2\mu(1-\nu)}{3(1-2\nu)}$	ν	$\frac{2\nu\mu}{1-2\nu}$
ν, λ	$\frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$	ν	$\frac{\lambda(1+\nu)}{3\nu}$	$\frac{\lambda(1-2\nu)}{2\nu}$	λ
k, μ	$\frac{9k\mu}{6k+\mu}$	$\frac{3k-2\mu}{6k+\mu}$	k	μ	$k-\frac{2}{3}\mu$
k, λ	$\frac{9k(k-\lambda)}{3k-\lambda}$	$\frac{\lambda}{3k-\lambda}$	k	$\frac{3}{2}(k-\lambda)$	λ
μ, λ	$\frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\frac{3\lambda+2\mu}{3}$	μ	λ

Con: $R = \sqrt{E^2 + 9\lambda^2 + 2E\lambda} > 0$

II.5 Ecuación de Ondas:

Como decíamos anteriormente, el espacio poroso es el principal responsable de la mayoría de los comportamientos físicos que observamos en las rocas. En particular, en ensayos no destructivos de propagación de ondas las velocidades de ondas elásticas que se propagan en el interior de un sólido son función de las constantes elásticas. Entonces, el espacio poroso debe afectar directamente la velocidad de las ondas elásticas, así como también el comportamiento elástico de las rocas.

La propagación de una onda a través de un medio heterogéneo es extremadamente compleja. El hecho más importante acerca de la propagación de una distorsión sísmica es asumir que ésta viaja por medio de desplazamientos elásticos en el medio, donde las partículas del medio llevan a cabo un movimiento armónico simple y la energía sísmica es transmitida como un complejo juego de movimientos ondulatorios ⁽¹⁸⁾.

Para un medio sólido homogéneo e isotrópico en equilibrio estático, la fuerza neta que actúa en el cuerpo es cero. Si quitamos esta restricción de estado de equilibrio, se producen ondas longitudinales y transversales en el medio. Considerando la **Figura 6** (componentes de esfuerzo), y asumiendo que los esfuerzos en las caras trasera y delantera son diferentes ⁽¹⁴⁾.

Los esfuerzos de la cara frontal son:

$$\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx \quad \sigma_{yx} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} dx \quad \sigma_{zx} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} dx \quad \text{Ec. 39}$$

Cada stress σ_{ij} tiene su recíproco u opuesto $-\sigma_{ij}$ (que actúan en la cara opuesta), entonces los esfuerzos desequilibrantes netos son:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx \quad \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} dx \quad \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} dx \quad \text{Ec. 40}$$

Estos esfuerzos actúan sobre una cara que tiene un área ($dydz$), y ellos afectan al volumen total efectivo ($dx dy dz$), entonces las fuerzas que actúan por unidad de volumen en las direcciones de los ejes x , y y z tienen valores:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \quad \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} \quad \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} \quad \text{Ec. 41}$$

Note que estos valores son para la cara perpendicular al eje x . Expresiones similares se obtienen en las otras caras. Luego la fuerza total por unidad de volumen en la dirección del eje x es:

$$\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} \right) \quad \text{Ec. 42}$$

La segunda ley de Newton establece que la sumatoria de las fuerzas debe ser igual a la masa por su aceleración. Entonces obtenemos la ecuación de movimiento análoga a esta ley:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} \right) \quad \text{Ec. 43}$$

Donde ρ es la densidad del medio donde se propaga la onda. Ecuaciones similares pueden ser obtenidas para el movimiento a lo largo del eje y y z ⁽¹⁴⁾.

Esta ecuación relaciona los desplazamientos con los esfuerzos, aunque se pueden involucrar solo desplazamientos valiéndonos de la Ley de Hooke, donde se relacionan los esfuerzos con las deformaciones, y expresadas en términos de las constantes de Lamé ⁽¹⁴⁾, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} = \lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial \epsilon_{xx}}{\partial x} + \mu \frac{\partial \epsilon_{yx}}{\partial y} + \mu \frac{\partial \epsilon_{zx}}{\partial z} \\ &= \lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \left[2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \right] \\ &= \lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \end{aligned} \quad \text{Ec. 44}$$

Análogamente se pueden escribir las ecuaciones para v y w :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 w \end{aligned} \quad \text{Ec. 45}$$

Para obtener la ecuación de onda, tomamos las diferenciales de esas tres ecuaciones respecto a x , y , y z respectivamente y los sumamos, para así obtener:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta}{\partial z^2} \right) + \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} &= (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Delta \end{aligned} \quad \text{Ec. 46}$$

De esta expresión se obtiene la relación entre la velocidad de onda p (V_p) con las constantes de Lamé:

$$V_p^2 = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \quad \text{Ec. 47}$$

Si tomamos ahora la **Ecuación 45** y derivamos la primera expresión respecto a z y la segunda respecto a y , luego las restamos obtenemos:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} &= \mu \nabla^2 \theta_x \end{aligned} \quad \text{Ec. 48}$$

Donde se obtiene la relación de velocidad de onda s (V_s) con las constantes de Lamé:

$$V_s^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ec. 49}$$

Mediante restas apropiadas se pueden obtener resultados similares para θ_y y θ_z ⁽¹⁴⁾.

El resultado del análisis mecánico de la ecuación de onda, demuestra la existencia de las ondas p y s por medio de ecuaciones que expresan la velocidad en términos de la densidad ρ y de los coeficientes elásticos de un material. La **Tabla 5** muestra la relación de velocidades de estas ondas con los diferentes módulos elásticos:

Tabla 5. Módulos elásticos a través de las velocidades de ondas.

Módulo de Bulk (K)	$\rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$
Módulo de Rigidez o Cizalla (μ)	ρV_s^2
Módulo de Young (E)	$\frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$
Relación de Poisson (ν)	$\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$
Módulo de Dilatación (λ)	$\rho (V_p^2 - 2V_s^2)$

Ahora bien cuando en un ensayo de propagación de ondas la energía sísmica es liberada repentinamente en un punto P cercano a la superficie de un medio homogéneo e isotrópico (ver **Figura 18**).

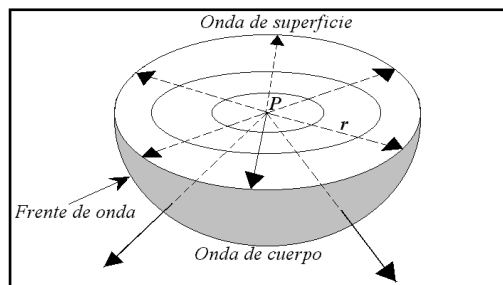


Figura 18. Tipos de Ondas que se Propagan en un Medio: Ondas de Cuerpo y Ondas de Superficie.

Parte de la energía se propaga a través del cuerpo del medio como una *onda de cuerpo* u *onda interna*. La parte restante de la energía sísmica se propaga por la superficie como una *onda superficial*, de manera similar a las ondulaciones producidas en un charco de agua en el cual se ha lanzado una piedra ⁽¹⁸⁾.

Las *ondas internas* son entonces aquellas que viajan en el interior de un medio elástico y se pueden distinguir dos tipos: Ondas Longitudinales y Ondas Transversales.

- Las *ondas longitudinales* son aquellas en las que el movimiento de vibración de las partículas se produce en la misma dirección de propagación (ver **Figura 19**). Estas ondas también se les conocen como ondas de compresión y dilatación o *de condensación*; en sismología se les conoce como *ondas primarias* u *ondas P*, por ser las primeras que son registradas en los terremotos. Estas son las ondas que se utilizan en prospección sísmica de reflexión y de refracción para el estudio del subsuelo ^{(18) (19)}.

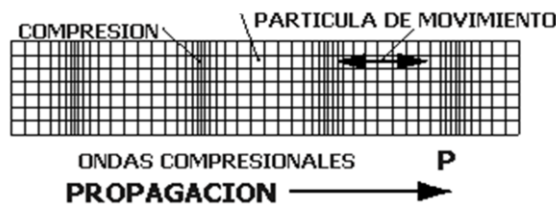


Figura 19. Onda P. La figura muestra la contracción y dilatación del medio en la dirección de propagación de la onda.

- Las *ondas transversales* son aquellas en las que el movimiento de vibración de las partículas se produce en la dirección perpendicular a la dirección de propagación (ver **Figura 20**).

Estas ondas se les conocen también como *ondas de corte* o *cizalla*; en sismología se les conoce como *ondas secundarias* u *ondas S*, ya que son las segundas en registrarse en un estudio sísmico. Pueden ser verticales (SV) y horizontales (SH) ^{(18) (19)}.



Figura 20. Onda S. La figura muestra el movimiento del medio en la dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Por el otro lado las *ondas superficiales* son aquellas que se propagan en la superficie libre de un medio elástico y se distinguen dos tipos principales: *Ondas Rayleigh* (L_R) y *ondas Love* (L_L).

- Las *ondas Rayleigh* son una combinación de las ondas longitudinales y transversales. Como se ve en la **Figura 21**, las vibraciones de las partículas se efectúan en un plano perpendicular a la superficie y, por tanto, a la dirección de propagación; siendo su movimiento elíptico y retrógrado ^{(18) (19)}.

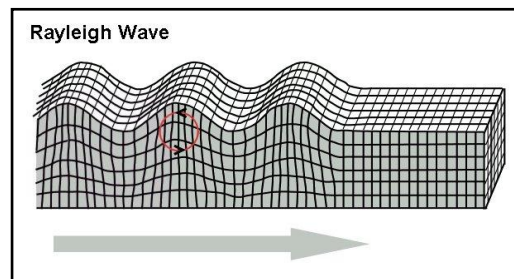


Figura 21. Onda Rayleigh.

- Las *ondas Love*, al igual que las ondas Rayleigh, son también una combinación de las ondas longitudinales y transversales, en las que el desplazamiento de las partículas es únicamente horizontal y perpendicular a la dirección de propagación (ver **Figura 22**) ^{(18) (19)}.

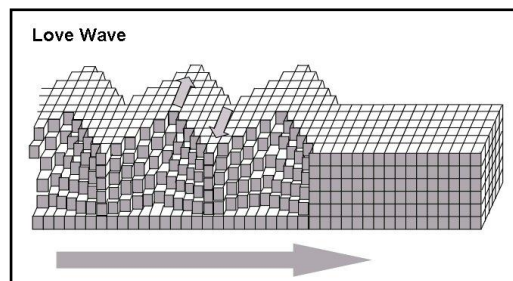


Figura 22. Onda Love.

II.6 Efectos de la anisotropía:

A nivel experimental, la mayoría de las rocas presentan altos grados de anisotropía respecto a su resistencia a la compresión debido a la disposición de los planos formados por la depositación de los granos que conforman la matriz rocosa. Cuando esto ocurre la resistencia a la compresión, para un mismo estado de esfuerzos, varía según el ángulo entre los planos de depositación y la dirección con que se aplica el esfuerzo, pudiendo presentar valores muy diferentes.

Al ser la dirección más favorable a la rotura, la roca presentará su mínima resistencia si los planos de depositación están para valores comprendidos entre los 0 y 90° (ver **Figura 23.b**). La roca tendrá la máxima resistencia para orientaciones según $\theta = 0^\circ$ (ver **Figura 23.a**), correspondiente por las muestras verticales (muestras cuya extracción es perpendicular a la disposición de los planos de depositación), y $\theta = 90^\circ$ (ver **Figura 23.c**), correspondiente por las muestras horizontales (muestras cuya extracción es paralela a la disposición de los planos de depositación). En estos dos últimos casos esfuerzos tangenciales son nulos ⁽¹⁶⁾.

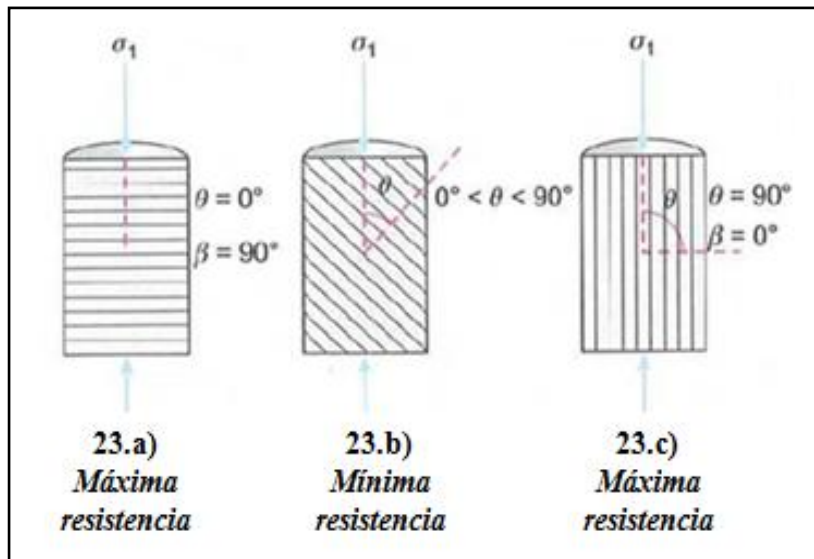


Figura 23. Resistencia de las rocas para diferentes superficies de laminación.

Esta variabilidad en la resistencia a la compresión de la matriz rocosa supone una incertidumbre para asignar un valor del esfuerzo axial σ_1 . La evaluación de la resistencia de la matriz rocosa en función de la dirección de anisotropía puede realizarse mediante:

- Ensayos de laboratorio en probetas con diferentes orientaciones de los planos de debilidad.
- Aplicación de los criterios de rotura empíricos, como el de Mohr-Coulomb ⁽⁵⁾.

Las rocas anisotrópicas son difíciles de ensayar por la variabilidad de su resistencia siendo necesarios numerosos ensayos para obtener parámetros representativos de todo el rango de resistencias.

A nivel de laboratorio, especialmente en ensayos destructivos, un factor importante es la presencia de espacios vacíos (poros) en la matriz rocosa, donde la resistencia en la misma disminuye al actuar la presión de poros en contra del esfuerzo aplicado.

Además en un ensayo triaxial, aparte de determinar los parámetros de resistencia al corte de un suelo, también son utilizados para obtener datos destinados a predecir el exceso de presión de poros inicial que se produce en una masa rocosa cuando ocurre un cambio en las condiciones de esfuerzos totales ⁽¹²⁾. Tales predicciones son necesarias conjuntamente con los análisis de estabilidad en esfuerzos efectivos y se hacen mediante los parámetros de presión de poros que se determinan experimentalmente.

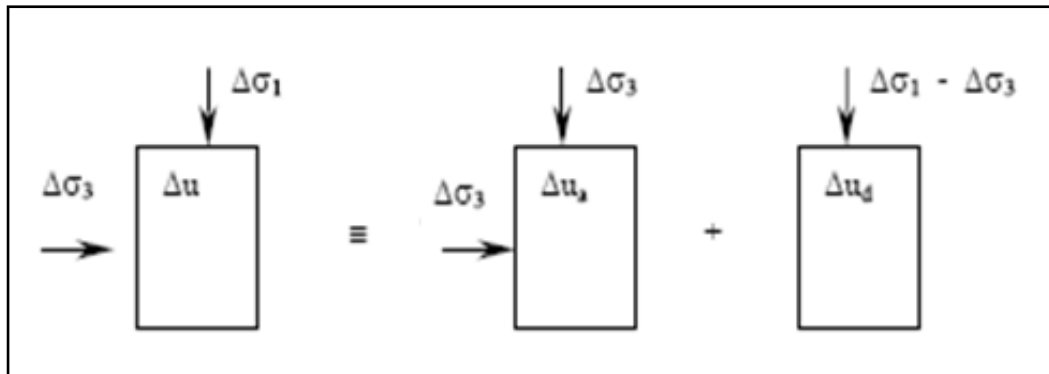


Figura 24. Generación de exceso de presión de poros con el incremento de los esfuerzos.

Para introducir la idea de los parámetros de presión de poros, es bueno considerar una muestra rocosa como el que se muestra en la **Figura 24**, donde el elemento se somete a una carga triaxial en la cual $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$. Es posible considerar que este estado de esfuerzos se compone de un cambio de esfuerzos isotrópico $\Delta\sigma_3$ más un cambio uniaxial del esfuerzo desviador $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$. Este, por supuesto, es el estado de esfuerzos que se impone en el ensayo triaxial y es claro que el

exceso de presión de poros que se genera al interior del elemento resulta, en primer lugar, del cambio del esfuerzo isotrópico que reina alrededor del elemento y, en segundo lugar, del cambio del esfuerzo desviador ⁽¹²⁾. Si Δu_a significa el exceso de presión de poros inducido en el elemento por la aplicación de $\Delta\sigma_3$, y Δu_d aquel que induce $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ entonces, si se supone que estas presiones intersticiales están relacionadas linealmente con los esfuerzos aplicados, puede escribirse como:

$$\begin{aligned}\Delta u_a &= B\Delta\sigma_3 \\ \Delta u_d &= \bar{A}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)\end{aligned}\quad \text{Ec. 50}$$

Donde B y \bar{A} son los parámetros de presión de poros que se determinan experimentalmente. Si Δu significa el exceso de presión de poros total en el elemento, entonces si se aplica el principio de superposición, tenemos:

$$\begin{aligned}\Delta u &= \Delta u_a + \Delta u_d \\ \Delta u &= B\Delta\sigma_3 + \bar{A}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)\end{aligned}\quad \text{Ec. 51}$$

Este problema fue estudiado por Skempton en el año 1954 quien obtuvo que:

$$\begin{aligned}\Delta u &= B \left[\Delta\sigma_3 + \frac{\bar{A}}{B}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \right] \\ \Delta u &= B [\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]\end{aligned}\quad \text{Ec. 52}$$

Estos parámetros de presión de poros se obtienen mediante ensayos destructivos de compresión triaxial. El parámetro B se determina midiendo, en la fase de saturación de la muestra, el incremento de presión de poros que resulta del incremento de la presión de cámara (presión confinante), y varía desde 1 en los suelos completamente saturados hasta 0 en los suelos secos⁽¹²⁾.

$$B = \frac{\Delta u_a}{\Delta\sigma_3}\quad \text{Ec. 53}$$

El parámetro \bar{A} , y por consiguiente A , se determina midiendo la presión de poros que induce en la muestra la aplicación del esfuerzo desviador en la etapa de cizallamiento ⁽¹²⁾. Con este parámetro se determina la compactación de las muestras.

$$A = \frac{\Delta u_d}{B(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)}\quad \text{Ec. 54}$$

El valor de A depende del esfuerzo de consolidación inicial (que puede ser isotrópico o anisotrópico), de la historia de esfuerzos (que está dada por el grado de preconsolidación), de la proporción del esfuerzo de falla aplicado (es decir, la deformación de la muestra) y del tipo de cambio de esfuerzos (puede ser en carga o en descarga) ⁽¹²⁾. Los valores típicos del parámetro A para muestras de arcillas se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Valores del parámetro de presión de poros A al momento del fracturamiento para algunas arcillas.

<i>Tipo de Arcilla</i>	<i>A</i>
<i>Arcilla altamente sensitiva</i>	<i>0.75 – 1.5</i>
<i>Arcilla normalmente consolidada</i>	<i>0.5 – 1.0</i>
<i>Arcilla arenosa compactada</i>	<i>0.25 – 0.75</i>
<i>Arcilla ligeramente sobre-consolidada</i>	<i>0.0 – 0.5</i>
<i>Arcillas gravosas compactadas</i>	<i>-0.25 – 0.25</i>
<i>Arcillas muy sobre-consolidadas</i>	<i>-0.5 – 0.0</i>

En ensayos de laboratorio se ha observado que los módulos elásticos de las rocas obtenidos mediante ensayos de velocidad de ondas (ensayos dinámicos) son mayores a los módulos obtenidos en ensayos estáticos de compresión triaxial. La **Tabla 7** muestra los valores del módulo de Young dinámico, módulo de Young estático y Relación de Poisson para diferentes rocas. Se indican los rangos más frecuentes de variación de estos parámetros, que en ocasiones son muy amplios debido a la alta variabilidad de propiedades físicas y el carácter anisótropo de algunas rocas (presencia de laminación, esquistosidad, etc.). Para la mayoría de las rocas, el coeficiente de Poisson varía entre 0.25 y 0.33 ⁽¹⁶⁾.

Tabla 7. Módulos elásticos (estáticos y dinámicos) de algunas rocas.

<i>Roca Intacta</i>	<i>Módulo de Young Estático E (GPa)</i>	<i>Módulo de Young Dinámico E_d (GPa)</i>	<i>Relación de Poisson ν</i>
<i>Andesita</i>	30 – 40		0.23 – 0.32
<i>Anfibolita</i>	13 – 92	46 – 105	
<i>Anhidrita</i>	1.5 – 76		
<i>Arenisca</i>	3 – 61	5 – 56	0.1 – 0.4
<i>Basalto</i>	32 – 100	41 – 87	0.19 – 0.38
<i>Caliza</i>	15 - 90	8 – 99	0.12 – 0.33
<i>Cuarcita</i>	22 - 100		0.08 – 0.24
<i>Diabasa</i>	69 - 96	60 – 98	0.28
<i>Diorita</i>	2 - 17	25 – 44	
<i>Dolomía</i>	4 - 51	22 – 86	0.29 – 0.34
<i>Gabro</i>	10 - 65		0.12 – 0.2
<i>Gneis</i>	17 - 81	25 – 105	0.08 – 0.4
<i>Esquisto</i>	6 - 39		0.01 – 0.31
<i>Granito</i>	17 - 77	10 – 84	0.1 – 0.4
<i>Limolita</i>	53 - 75	7 – 65	0.25
<i>Lutita</i>	3 - 22	10 – 70	0.25 – 0.29
<i>Mármol</i>	28 - 72		0.1 – 0.4

II.7 Caracterización de litologías a través de los ensayos acústicos y triaxiales:

Para aplicaciones petrofísicas, la interpretación del tiempo de tránsito de ondas compresionales a través de los poros depende, en parte, del conocimiento del tipo de roca. Esto se debe a una ecuación lineal que vincula a la porosidad con el tiempo de viaje que viene dado en términos de la velocidad de compresión en la matriz de la roca.

La determinación de la litología de un pozo mediante mediciones acústicas se basa en las variaciones de los parámetros elásticos entre los tipos de roca. Estas variaciones se reflejan tanto en las velocidades de corte y velocidades de compresión. Un método conveniente de clasificación de litologías es comparar la relación de velocidades de onda de compresión V_p y velocidades de onda de corte V_s , con la relación de Poisson según lo sugerido por Pickett ⁽¹⁾.

Pickett compiló tanto los datos de laboratorio como los de campo, para muchas formaciones diferentes, mostrando que estas relaciones entre velocidades y la relación de Poisson se ajustan también a la curva teórica de la relación de Poisson en función de las velocidades, dada por la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \right] \quad \text{Ec. 55}$$

Con la disponibilidad de las velocidades de onda de corte y velocidades de compresión esta técnica resulta útil para la determinación de la litología y la identificación de gas. Trabajar con datos originales de Pickett, permite determinar la relación de Poisson para todas las muestras de otras rocas.

En el **Gráfico 1** se aprecia los valores de la relación de Poisson (ν) en función de la relación entre V_p/V_s obtenidos por Pickett ⁽¹⁰⁾, donde se muestra una separación clara entre las muestras arenisca y calizas a pesar de la amplia gama de valores asociados a estos dos tipos de roca.

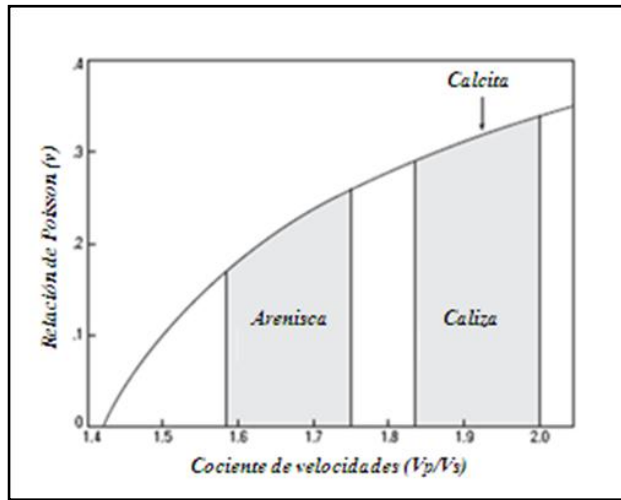


Gráfico 1. Curva resumen de los datos en muestras de rocas obtenidos por Pickett.

Por otra parte, para ensayos mecánicos destructivos, la caracterización es corroborada por el sistema de clasificación de rocas sedimentarias propuesto en el año 1966 por Deere y Miller que establecen la siguiente forma de clasificación litológica a través de las medidas simultáneas del módulo de Young y el esfuerzo uniaxial (**Gráfico 2**):

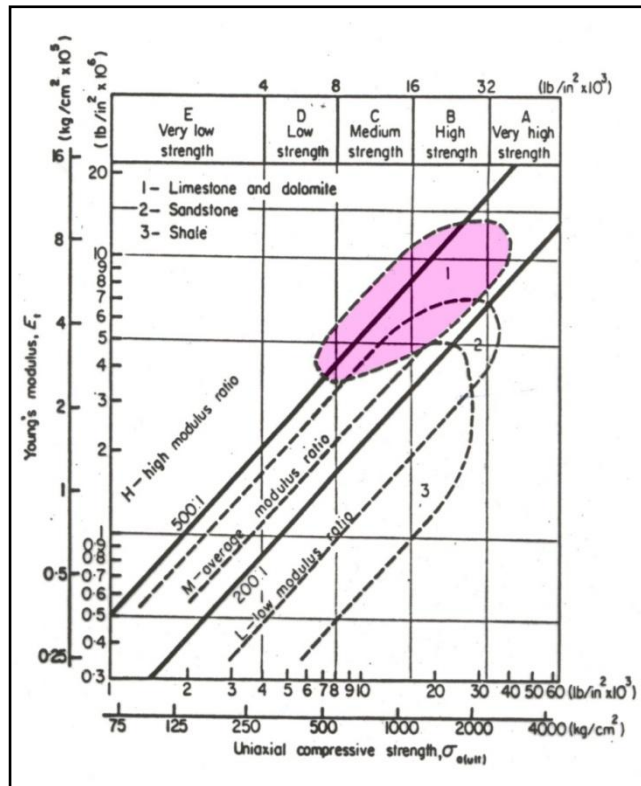


Gráfico 2. Módulos de Young Vs. Esfuerzo uniaxial para distintas rocas sedimentarias. Sistema de clasificación de Deere y Miller (1966).

II.8 Lutita:

En los estudios de estabilidad de hoyo es fundamental determinar las propiedades de la roca, es decir de las formaciones que deben atravesarse durante el proceso de perforación. Para la caracterización se debe disponer de muestras de núcleos que no hayan sufrido perturbaciones aun más en formaciones lutíticas sensibles a cambios físicos y químicos considerables ⁽⁵⁾.

Ahora bien en ensayos en tapones de núcleos de pozos se debe considerar que la lutita es una roca de grano fino, con numerosos poros pequeños, baja permeabilidad, y alto contenido de arcillas y salmuera como fluido innato de la formación ⁽⁵⁾.

Desde el punto de vista litológico los materiales se clasifican de acuerdo a su génesis o formación, siendo la lutita una roca sedimentaria formada por granos cementados por consolidación y depositados por cargas, generando planos de estratificación ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾.

Estas rocas están conformadas por partículas plásticas de arcillas que las hacen susceptibles a expansión, con permeabilidad entre 10^{-6} y 10^{-12} Darcies.

Las arcillas son principalmente hidróxidos de aluminio microcristalinos, formando capas de silicatos, los cuales tienen una estructura en capas o partículas laminares.

Las lutitas son uno de los materiales más complejos desde el punto de vista de estabilidad de hoyo. La mayoría presentan una resistencia al corte de mediana a baja, aunque existen algunas muy resistentes. En la **Figura 25** se muestra un ejemplo de una muestra de lutita.

De acuerdo con el tamaño y composición de las partículas que la conforman, las lutitas pueden ser arcillosas, limosas, arenosas o calcáreas. En cuanto a las partículas de arcilla que lo conforman, principalmente está compuesta por las caolinitas, illitas, esmectitas y siderita ⁽⁵⁾.



Figura 25. Muestra de lutita de la formación Paují del pozo TOM25.

Capítulo III

MARCO METODOLÓGICO

III.1 Población y Muestra:

Se contó con 61 tapones de núcleos de lutita tomados de pozos petroleros. Los mismos fueron extraídos de un intervalo de la formación Paují comprendido entre 14.874 y 15.127 pies de profundidad.

Se aplicó un criterio de selección de muestras de núcleos de la formación para una profundidad específica con el objeto de realizar ensayos acústicos y los respectivos ensayos de compresión triaxial.

III.2 Criterio de Selección:

- Se tomó un total de 10 núcleos a profundidades distintas y con separación considerable en profundidad.
- Cinco (5) de las muestras fueron tomadas con planos de laminación vertical (muestras horizontales extraídas de forma paralela a los planos de depositación de los granos) y las restantes con planos de laminación horizontal (muestras verticales extraídas de forma perpendicular a los planos de depositación de los granos).
- Cada muestra estuvo conformada por dos muestras, una con relación longitud-diámetro mayor a dos ($\frac{L}{D} \geq 2$) para ser sometida a ensayos destructivos de compresión triaxial, y una muestra con relación longitud diámetro menor a 1.5 ($\frac{L}{D} \leq 1.5$) para ser sometida a ensayos acústicos.
- Todas las muestras deben estar acondicionadas e instrumentadas respectivamente según los estándares internacionales: Refrentamiento de las caras transversales, enchaquetamiento y previa saturación en aceite mineral.

III.3 Ensayos de Laboratorio:

La fase de laboratorio de ensayos mecánicos en tapones de núcleos de pozos se compone, en forma general, de cuatro (4) etapas fundamentales, en cada una se aplican determinados procedimientos desde la obtención de la muestra hasta el análisis e integración de los datos:

Para cada etapa de la fase de laboratorio se consta de una disposición de equipos y materiales al mismo tiempo de sus respectivos procedimientos (explicados a continuación), basados en los protocolos de ensayos mecánicos establecidos por los estándares internacionales y especificaciones mínimas en el control de calidad.

III.3.1 Etapa de revisión y selección de muestras del pozo:

En esta etapa se lleva a cabo una inspección del estado de los núcleos con la finalidad de examinar las características sedimentarias y la mejor información petrofísica para la selección de las profundidades de interés a analizar, tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- La homogeneidad de la roca, ya sea yacimiento o sello, y las variaciones que tengan las mismas.
- Tipo de cementación y la posible distribución de porosidad y permeabilidad.
- La presencia de hidrocarburos en el reservorio.
- Los tipos de minerales presentes microscópicamente obtenidos mediante ensayos por difracción de rayos X y ensayos de microscopía electrónica.
- Presencia de fracturas (naturales o inducidas) y su posible orientación e los planos de estratificación de la formación.

Se determinan y seleccionan las muestras (tapones) de diferentes profundidades del pozo que se someterán a ensayos mecánicos, identificando con su respectiva etiqueta la dirección del corte en el que fue extraído el tapón, bien sea perpendicular o paralelo al eje del núcleo, es decir, sí es Horizontal o Vertical.

III.3.2 Etapa de corte, emparejamiento y pulido de las muestras del pozo:

Luego haber seleccionado las profundidades candidatas para someterse a ensayo, se realiza el corte transversal de las caras y luego el emparejamiento o pulido de las superficies de la muestra, para su posterior control de calidad en el indicador de cuadrante analógico.

Según las Normas de la ASTM (American Society for Testing & Materials) y los estándares de la Mecánica de Rocas, sugieren que los especímenes más apropiados destinados a ensayos son cilindros circulares con una relación longitud-diámetro mayor a 2.0 o 2.5 para muestras sometidas a ensayos triaxiales (**Figura 26**) y con relación longitud-diámetro menor a 1.5 para muestras sometidas a ensayos acústicos. Todas las muestras deben tener un diámetro no menor de 1-7/8 pulgadas (47 mm.) y además 10 veces más grande que el diámetro del grano más grande ⁽²¹⁾. La razón de esto es que la muestra debe ser lo suficientemente larga para:

- Producir un plano de corte penetrante a través de las paredes laterales. De ser la muestra demasiado corta, el plano de corte penetrará a través de los extremos (caras externas).
- Reducir La fricción entre las caras externas que están en contactos con los cabezales (acústicos o mecánicos). Mientras mayor sea la longitud de la muestra conforme al diámetro de la misma, esta al ser sometida a carga axial tendrá menos fricción entre los extremos y los cabezales.

Para el corte de las muestras se sugiere que los extremos de las muestras tienen que estar paralelas entre sí y con ángulo recto al eje longitudinal axial, del mismo modo con las exigencias de la relación longitud-diámetro mayor a dos dados por los estándares internacionales de la ASTM ⁽²¹⁾.

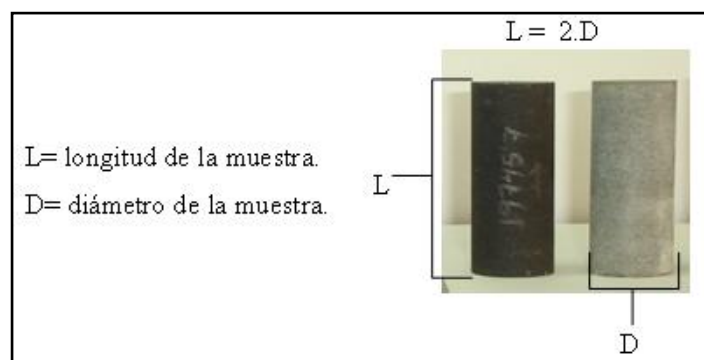


Figura 26. Medidas estándares para la extracción de tapones.

El corte de una muestra se realiza midiendo primero la longitud requerida en el tapón, siendo de 1 pulgada de diámetro y de 2, 3 o 4.25 pulgadas de longitud respectivamente, luego se coloca en la cortadora con disco de diamante (**Figura 27**) y se procede al corte automático de la muestra. La **Figura 28** muestra una secuencia de corte de los tapones con la cortadora de disco de diamante.

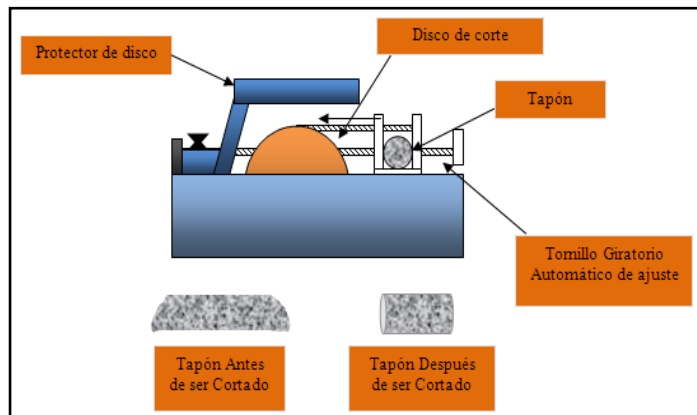


Figura 27. Esquema de la cortadora de caras con disco de diamante.

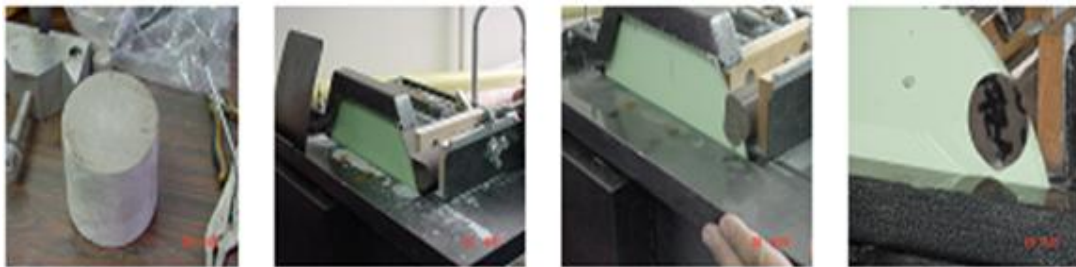


Figura 28. Secuencia de pasos para el emparejado de las caras con la cortadora de disco de diamante.

Otra sugerencia dadas por los estándares internacionales de la ASTM, es que los lados de los especímenes deben estar generalmente lisos y libre de abruptas irregularidades, no mayores a 0.020 pulgadas (0.50 mm.) ⁽²¹⁾. Para ello, las muestras son sometidas a pulido mediante el uso de la refrentadora o pulidora de caras transversales (ver **Figura 29**) marca WILTON modelo 52APSG-68. La **Figura 30** muestra la secuencia para el pulido de las caras de las muestras.

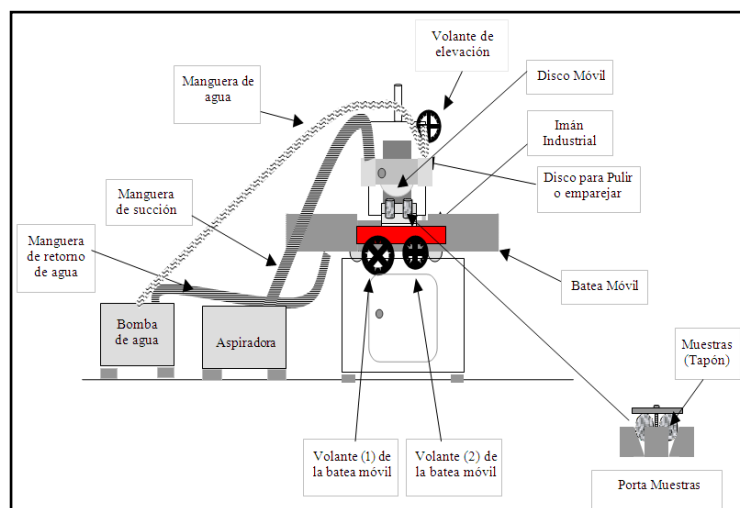


Figura 29. Esquema de la refrentadora o pulidora de superficies.



Figura 30. *Secuencia de pasos para el pulido de las caras transversales con la refrentadora de superficies.*

Para garantizar el paralelismo de las caras del tapón se hace un control de calidad mediante el uso del verificador de cuadrantes analógico (**Figura 31**), donde la muestra es colocada y girada lentamente sobre la base y se verifica que el indicador no exceda la centésima de pulgada (0.01”). La **Figura 32** muestra la secuencia de verificación de cuadrantes.

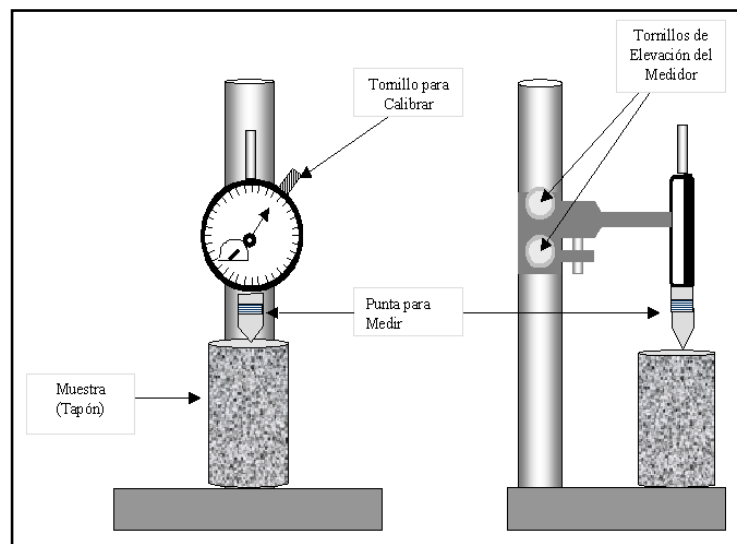


Figura 31. *Esquema del verificador de cuadrante analógico.*



Figura 32. *Secuencias de pasos para la verificación de cuadrantes en las caras transversales del tapón.*

III.3.3 Etapa de acondicionamiento de muestras del pozo:

Después que se han tomado los tapones de núcleos, se han cortado sus caras y pulido, y realizado el proceso de limpieza, se realiza una descripción de la muestra; tomando las medidas definitivas de longitud y diámetro peso y densidad del tapón.

Posteriormente se procede a acondicionar las muestras dependiendo del tipo de ensayo:

- Para *ensayos acústicos*:

El acondicionamiento de las muestras consistió en el uso de cabezales transductores (ver **Figura 33**) con cristales piezoeléctricos como el cuarzo y la turmalina que cumplen con dos funciones: Primero el pulso (con una frecuencia central del 750KHz) excita el transductor emisor para producir un voltaje, generando una señal que se propaga a través de la muestra hasta el receptor donde es amplificada y filtrada para ser presentada en un osciloscopio digital. Para permitir el paso de las ondas del transductor emisor, al transductor receptor (pasando a través de la muestra) se utiliza acoplante acústico entre las superficies en contacto, luego con bandas de goma se ajusta y refuerza el acople entre los cabezales transductores y la muestra. La **Figura 33** muestra un esquema del acondicionamiento de las muestras sometidas a ensayos acústicos.

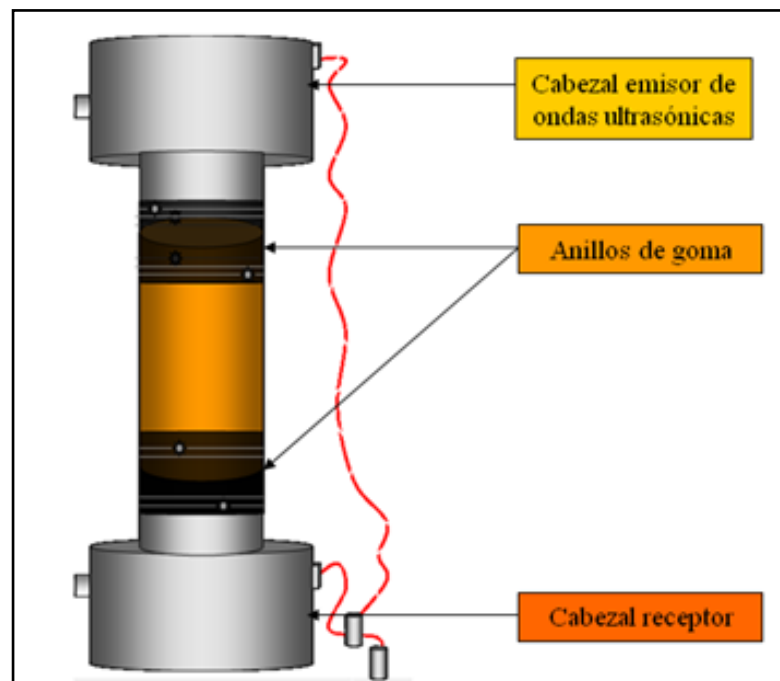


Figura 33. Componentes característicos para ensayos acústicos.

- Para *ensayos de compresión triaxial*:

El método tradicional sugiere como paso inicial para la instrumentación de muestras poco permeables como la lutita la instalación de un drenaje lateral. Este sistema de drenaje consta de un papel de filtro tipo Whatman que permite el paso del fluido de presión de poros como se aprecia en la **Figura 34**. Sin embargo, este método presenta problemas cuando se acondicionan muestras muy poco permeables como la lutita, ya que el papel de filtro tipo Whatman no permite el paso del fluido de presión de poros cuando se incrementa la presión de confinamiento.

Para este trabajo se propone el uso de un sistema de drenaje lateral que consiste en el uso de telas absorbentes tipo guata o tipo fieltro reforzado con material plástico termoencogible usado para evitar la comunicación entre el fluido de presión de poros y el fluido de presión de confinamiento (Ver **Figura 34**). El uso de este drenaje lateral tiene como objetivo crear una ruta de drenaje adicional a fin de acelerar la saturación del sistema y reducir el tiempo de estabilización de la presión de poros con respecto a los cambios de presión de confinamiento en la fase de saturación y de presión de confinamiento en la fase de fracturamiento.

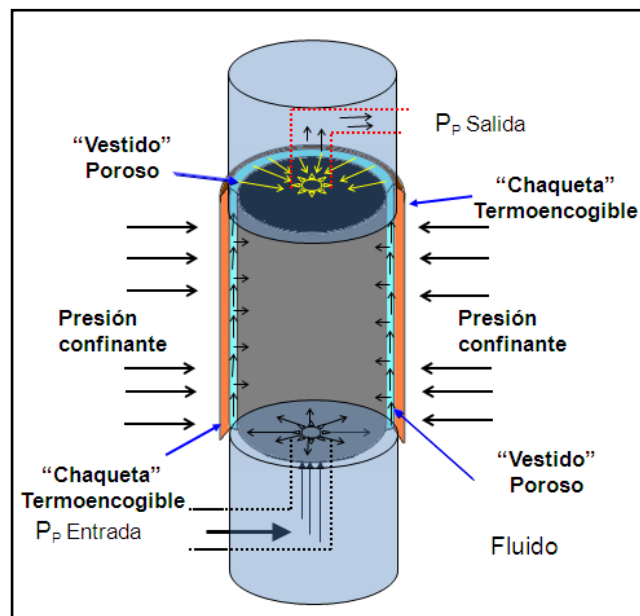


Figura 34. Sistema de drenaje lateral en muestras sometidas a ensayos triaxial

Una vez colocado el sistema de drenaje lateral (verificando previamente que no haya una posible comunicación entre el fluido de la presión de poros y el fluido de confinamiento cuando se baje la celda, se procede a colocar los transductores diferenciales de variación lineal o LVDT's (siglas

en inglés de Linear Variable Differential Transformer) axiales y radiales dispuestos de manera que dos de ellos midan variación de la deformación de forma axial y uno mida deformación radial como se ve en la **Figura 35**. Estos son un tipo común de transductor electromecánico que puede convertir el movimiento rectilíneo de un objeto acoplado mecánicamente al núcleo de una bobina, produciendo una señal eléctrica proporcional desplazamiento del material. Estos sensores de posición lineal pueden medir movimientos tan pequeños como unas pocas millonésimas de pulgada hasta varias pulgadas.

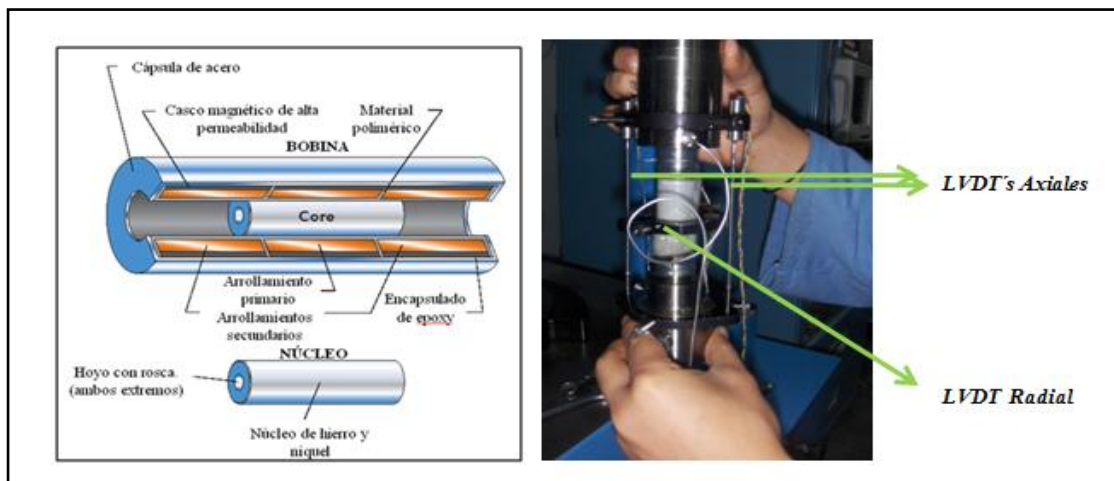


Figura 35. Componentes de un transductor diferencial de deformación lineal (LVDT) y disposición en las muestras.

III.3.4 Etapa de ensayos con el equipo AutoLab2000:

Previo a realizar los ensayos mecánicos se requiere hacer un diseño de los mismos de acuerdo a las condiciones "in situ": profundidad, esfuerzos, presión de poro. Se sabe que la resistencia al corte, no es un valor único. Estos están fuertemente influenciado por factores tales como:

- Estado del suelo (relación de vacíos, el tamaño y forma de los granos que conforman el suelo).
- Tipo de suelo (arena, limo, grava, arcilla, etc., y/o la cantidad relativa de estos materiales presentes en la masa del suelo).
- Contenido de agua, particularmente para la arcilla (con una frecuente extensión de muy blandos a rígidos dependiendo de su humedad)

- Tipo de esfuerzo y velocidad de propagación de ondas, en la que, por medio de la teoría de consolidación, se puede notar que un esfuerzo no controlado puede producir una respuesta violenta de la presión de poro.

- Anisotropía, causan que la resistencia de la roca para un plano de estratificación normal al esfuerzo desviador sea diferente de aquel con un plano e estratificación paralelo a ese esfuerzo.

Particularmente para muestras como la lutita, el tiempo de desarrollo de estos ensayos depende de la permeabilidad de la misma.

Estos ensayos son comúnmente empleados para obtener los parámetros elásticos de las muestras están influenciados por:

- Exceso de presión de poros.
- Contenido de agua.
- Velocidad de propagación de ondas en la roca.

Dos de los ensayos establecidos para el desarrollo de este proyecto son los siguientes:

- Ensayo dinámicos de propagación de ondas acústicas con presión confinante.*
- Ensayos de compresión triaxial con presión de poros.*

Descripción del Equipo:

- Equipo AutoLab2000 constituido por una consola electrónica, una plataforma de ensayos y un sistema computarizado de cálculo y recolección de información (ver **Figura 36**).



Figura 36. Sistema AutoLab2000: Plataforma de ensayos (Izquierda), Consola electrónica y sistema computarizado (Derecha).

El sistema AutoLab2000 es un aparato triaxial versátil útil para mediciones petrofísicas y propiedades mecánicas de rocas en condiciones in situ. Sobre la base de las necesidades experimentales, el aparato fue diseñado para funcionar a presiones de confinamiento de 30.000 psi (200 MPa) y presiones de poro y presión axial de 100 y 150 MPa respectivamente. De igual modo cuenta con comandos para registrar propagaciones de ondas, ensayos uniaxiales, ensayos de confinamiento y al mismo tiempo a través del sistema computarizado programar ensayos combinados en muestras de rocas.

Procedimiento de ensayo:

a) *Para ensayos acústicos:*

Estos ensayos dinámicos a nivel de laboratorio se basan en la teoría del método sísmico y la teoría de elasticidad, utilizando la propagación de ondas a través de un medio poroso según las propiedades elásticas de las rocas.

A través de este ensayo (ver **Figura 37**) se mide la velocidad de las ondas elásticas longitudinales V_p y transversales V_{s1} y V_{s2} que viajan dentro de la muestra cuando es emitido un pulso por el cabezal emisor hasta el cabezal receptor y que es registrado por un osciloscopio y el sistema computarizado⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾.

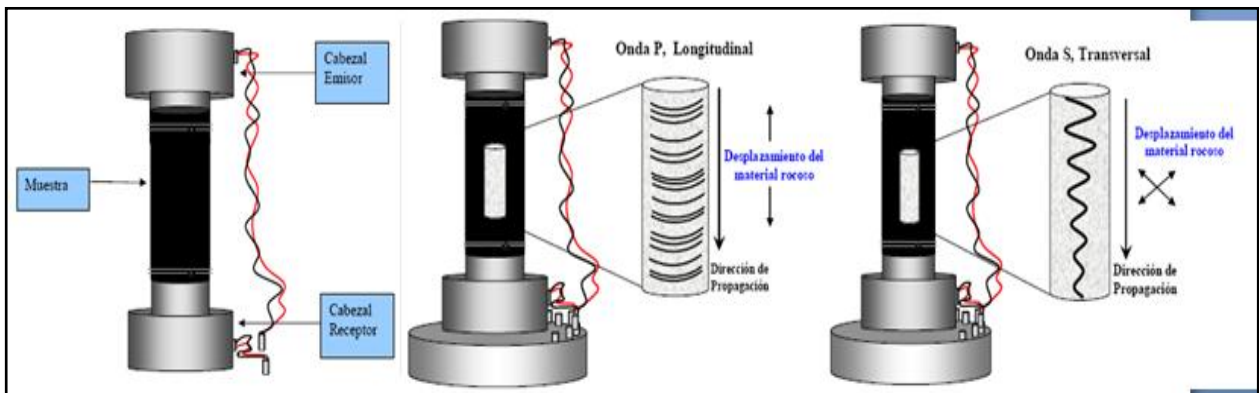


Figura 37. Esquema de ensayo acústico y las ondas propagadas a través del medio.

Como la velocidad de onda está relacionada con las características físicas del material (su resistencia y deformabilidad), entonces a partir de las mismas se calculan los módulos de deformación elásticos dinámicos del medio a través de la siguiente tabla de parámetros acústicos:

Tabla 8. Parámetros acústicos medidos en los ensayos de propagación de ondas a través de muestras rocosas.

Parámetros		Error
<i>Longitud</i>	L	ΔL
<i>Masa</i>	m	Δm
<i>Volumen</i>	$Vol.$	$\Delta Vol. = \frac{\pi}{4} D(2L + D)\Delta L$
<i>Densidad</i>	ρ	$\Delta \rho = \frac{1}{Vol.} \left(\Delta m - m \frac{\Delta Vol.}{Vol.} \right)$
<i>Velocidad de Onda</i>	$V_p = \frac{1000L}{(t_p - 11.81)}$	$\Delta V_p = \frac{10}{(t_p - 11.81)} \left[100\Delta L + \frac{L \cdot \Delta t_p}{(t_p - 11.81)} \right]$
	$V_s = \frac{1000L}{(t_s - 21.06)}$	$\Delta V_s = \frac{10}{(t_s - 21.06)} \left[100\Delta L + \frac{L \cdot \Delta t_s}{(t_s - 21.06)} \right]$
<i>Rigidez o Cizalla</i>	$\mu = \rho \cdot V_s^2$	$\Delta \mu = V_s(V_s \cdot \Delta \rho + 2\rho \cdot \Delta V_s)$
<i>Lamé</i>	$\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2)$	$\Delta \lambda = \Delta \rho(V_p^2 - 2V_s^2) + 2\rho(V_p \cdot \Delta V_p - 2V_s \cdot \Delta V_s)$
<i>Young</i>	$E = \frac{\mu(3\lambda + 4\mu)}{(\mu + \lambda)}$	$\Delta E = \frac{1}{(\lambda + \mu)^2} [(3\lambda^2 + 4\mu \cdot \lambda + 2\mu^2)\Delta \mu + \mu^2 \cdot \Delta \lambda]$
<i>Bulk</i>	$k = \frac{(3\lambda + 2\mu)}{3}$	$\Delta k = \frac{1}{3}(3\Delta \lambda + 2\Delta \mu)$
<i>Relación de Poisson</i>	$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	$\Delta \nu = \frac{1}{2(\lambda + \mu)^2} (\lambda \cdot \Delta \mu + \mu \cdot \Delta \lambda)$

b) *Para ensayos triaxiales:*

Los ensayos destructivos consisten en someter a la muestra a esfuerzos de confinamiento, presión de poros y presión axial, para determinar su deformación. A partir de la curva de esfuerzo deformación se determinan algunas propiedades de resistencia de la roca. Entre estas propiedades se encuentran las propiedades elásticas: *Módulo de Young estático, relación de Poisson*, y los parámetros *A* y *B* de la ley de Skempton.

Estos ensayos estáticos están basados en lo propuesto por Skempton (*Ec. 52*) con el fin de controlar el exceso de presión de poros inicial que se produce en la masa de roca, cuando ocurre un cambio en las condiciones de esfuerzos totales o efectivos. Estos ensayos están divididos por las siguientes fases:

- *Fase de Saturación:*

En esta etapa se debe garantizar que la muestra debe permanecer sumergida en aceite mineral durante la totalidad del ensayo, lo cual puede tomar de 2 horas a 1 día. La saturación en las lutitas viene dada por el fluido innato de la formación, es por ello que durante la preservación, transporte y almacenamiento se debe garantizar la estabilidad y conservación interna del agua innata.

La probeta de lutita ya instrumentada, se monta en el equipo triaxial, y se realizan las conexiones necesarias para el control y monitoreo de la presión de poros. La presión de poros es registrada por los sensores de presión ubicados en los cabezales de deformación. Una vez bajada la celda de ensayos se procede a aplicar una presurización en la muestra para eliminar las posibles burbujas de aire que pudiese contener la muestra y los espacios conectores del sistema. Garantizando que el aire no se acumule entre la muestra, membrana, chaqueta ni conductos, se inician los chequeos del parámetro *B* de Skempton. Este parámetro se calcula dividiendo el diferencial del exceso de la presión de poros entre el diferencial del aumento de la presión confinante (*Ec. 53*):

$$B = \frac{\Delta u_h}{\Delta \sigma_3} \qquad \text{Ec. 53}$$

Por lo general si el parámetro B resulta mayor a 0,9 se continúa con la etapa de cizallamiento de la muestra. Esto a nivel experimental depende el sistema de drenaje de presión de poros usado y del tiempo que se cuenta para esta fase de saturación de la misma.

La fase de saturación en este trabajo se realizó en dos modalidades:

✓ *El método tradicional*, que consiste en rampas de incremento de presión de confinamiento con descansos (**Figura 38**), donde los comandos estaban referidos al modo “scripter” para la respectiva estabilización de la presión de poros según lo propuesto por Skempton.

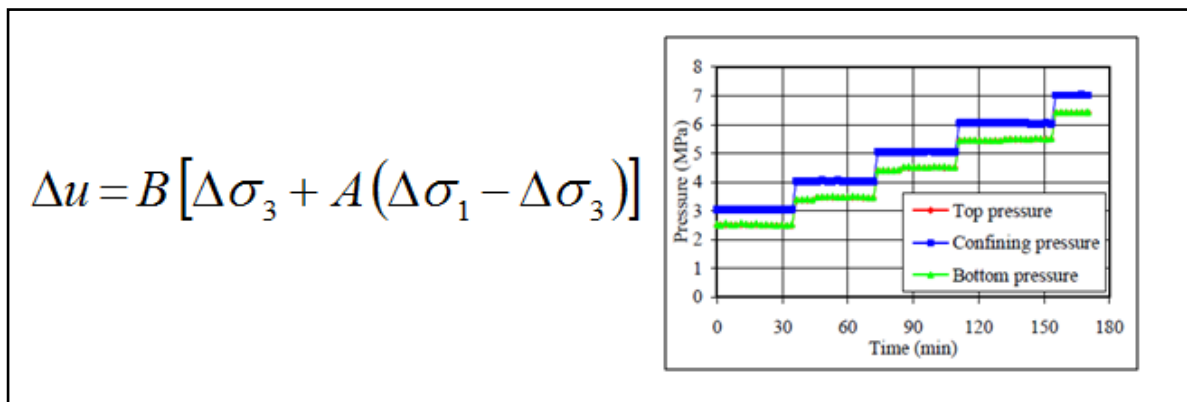


Figura 38. Esquema de ensayo hidrostático por el método tradicional de rampas escalonadas de confinamiento.

✓ *El método de estados transitorios* (**Figura 39**), que consiste en rampas de incremento y descenso de confinamiento en tres ciclos. Los comandos del ensayo estaban referidos al modo “Bulk Modulus”, donde se introducen los datos de: Rata de incremento y descenso de la presión de confinamiento por segundo, la amplitud de presión confinante por ciclo y el número de ciclos del ensayo.

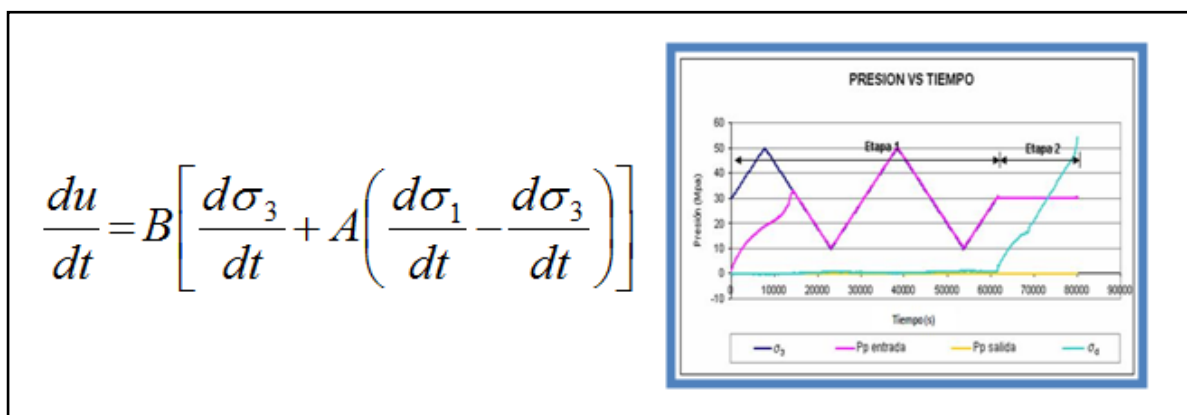


Figura 39. Esquema de ensayo hidrostático por ciclos de incremento y descenso de presión de confinamiento.

La idea de introducir el método de los estados transitorios resulta de la intención de reducir los tiempos en la etapa de saturación y obtener una mejor aproximación de parámetro B de Skempton. En esta modalidad se modifica el estado estacionario (**Figura 38**) del método tradicional al estado transitorio (**Figura 39**), en el que se impone una dependencia temporal en la presión de poros con los cambios en tiempo del confinamiento, cuidando durante el experimento que $P_P < P_C$.

- *Fase de Fracturamiento:*

En esta etapa se aplica la carga axial desviadora, en una fase no drenada, la cual genera deformaciones controladas hasta alcanzar el punto de ruptura o fallamiento de la muestra.

Son muy importantes los parámetros adquiridos durante la etapa de saturación, principalmente para calcular el parámetro A de Skempton (*Ec. 54*), el cual varía con la magnitud de las deformaciones cortantes, densidad inicial y condiciones iniciales de consolidación de la roca.

$$A = \frac{\Delta u_d}{B(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)} \quad \text{Ec. 54}$$

Luego de haber cizallado la muestra se procede al cálculo de los módulos elásticos estáticos mediante el uso de las respectivas curvas de Esfuerzo Vs. Deformación, cuya pendiente en la zona elástica arroja los valores del módulo de Young, y con el negativo del cociente de la deformación radial y deformación axial obtenemos el valor de la relación de Poisson. Los demás módulos elásticos son obtenidos a través de estos dos módulos como se muestra en la **Tabla 4** (Matriz de Módulos Elásticos).

El módulo de Young puede ser obtenido de tres formas diferentes: *medio*, según la pendiente de la parte lineal de la curva Esfuerzo Vs. Deformación (**Figura 40.a**); *tangente*, según el cociente del esfuerzo entre la deformación punto a punto en la zona más lineal de la curva (**Figura 40.b**); y *secante*, calculado por medio de la pendiente desde el punto cero hasta el punto de máximo esfuerzo (**Figura 40.c**). De igual forma se procede para el cálculo de la relación de Poisson, pero esta vez solo medio y punto a punto⁽¹⁶⁾.

La fase de cizallamiento fue ejecutada en el comando “Uniaxial Stress” donde se programó la rata de incremento de presión axial por segundo y la amplitud de la carga axial, donde estos controlan la velocidad del rompimiento de la muestra.

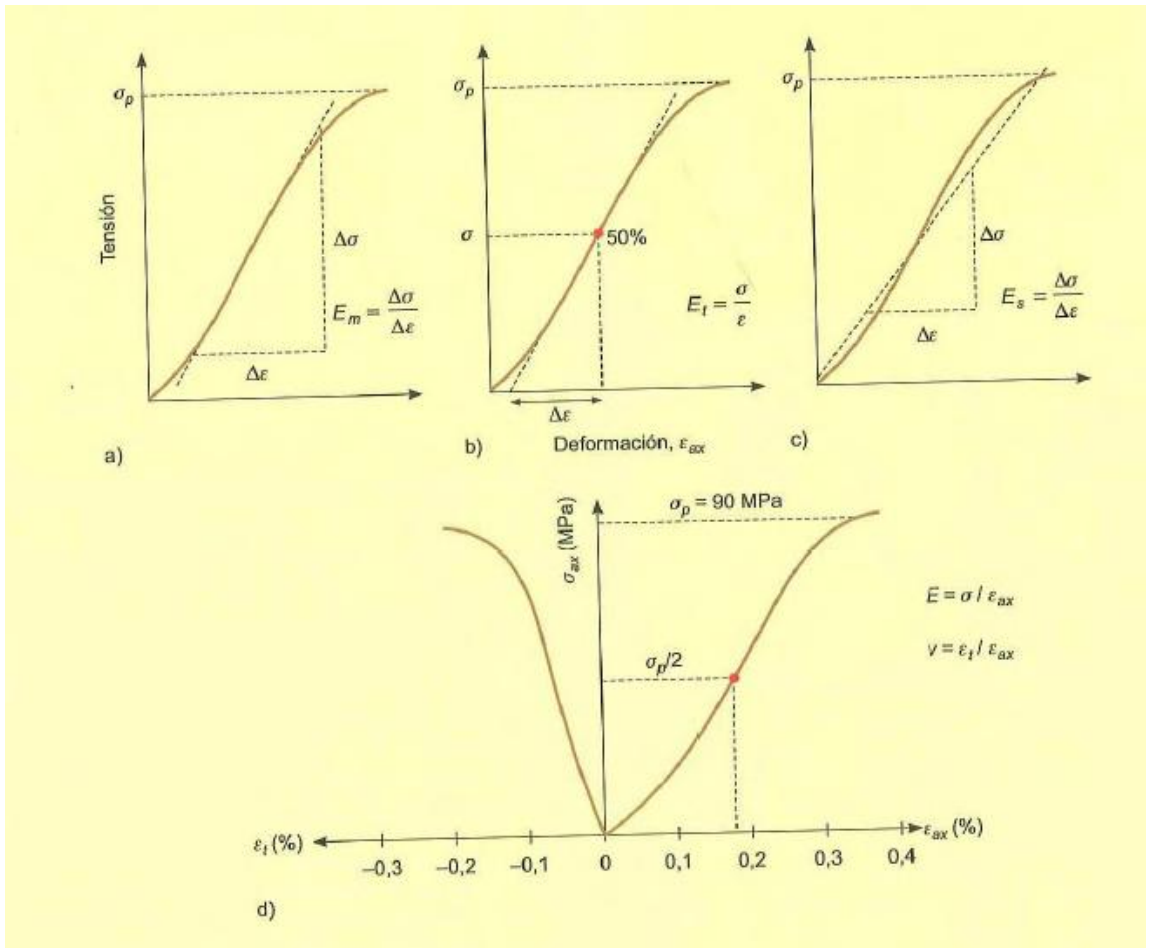


Figura 40. Cálculos de módulo de Young y relación de Poisson a partir de las curva de Esfuerzo Vs. Deformación.

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

IV.1 Descripción de las muestras:

Previo al sometimiento de las muestras a ensayos dinámicos de propagación de ondas o estáticos de compresión triaxial, se realizó una inspección de las muestras para identificar los compuestos que conforman a la roca en estudio, mediante análisis de difracción de rayos "X" (RX) y de microscopía electrónica (EDS) y cuyos resultados muestran valores semi-cuantitativos (debido a la naturaleza de la muestra) de elementos en mayor proporción como el Silicio (Si), Oxígeno (O), Aluminio (Al) y elementos en menor proporción como Potasio (K), Hierro (Fe), Sodio (Na), Titanio (Ti) y Calcio (Ca). La **Figura 41** muestra parte de la información referente acerca de los compuestos identificados mediante análisis RX:

Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Chemical Formula
03-065-0466	79	Quartz low, syn	-0,013	O2 Si
00-029-1488	48	Nacrite-1Md	-0,153	Al2 Si2 O5 (O H)4
01-085-0849	42	Calcium Carbonate	-0,037	Ca C O3
01-078-2110	36	Kaolinite	-0,068	Al4 (O H)8 (Si4 O10)
01-083-1764	26	Siderite	-0,094	Fe (C O3)

Figura 41. Compuestos identificados mediante análisis de difracción de rayos "X" (DRX).

La información más completa está referida como anexo en la base de dato suministrada de reportes e imágenes del proyecto.

IV.2 Resultados de Ensayos Acústicos:

A continuación se presentan la primera información introducida al sistema computarizado del equipo AutoLab2000 para poder hacer los respectivos cálculos de los módulos elásticos en función de las velocidades de propagación de ondas y obtener los reportes suministrados por el equipo en el modo de velocidades acústicas.

Tabla 9. Valores de dimensiones, orientación y densidades de las muestras sometidas a ensayo acústico.

Profundidad (pies)	Orientación (H/V)	Masa	Diámetro	Longitud	Densidad (gr./cm ³)		L/D
		$m \pm 0.01$ (gr.)	$D \pm 0.01$ (mm)	$L \pm 0.01$ (mm)	ρ	$\pm \Delta\rho$	
14885'11"	H	30.32	25.32	23.19	2.600	± 0.004	0.92
14894'10"	H	26.07	25.33	20.07	2.580	± 0.004	0.79
14993'	H	39.62	25.35	30.23	2.600	± 0.004	1.19
15014'10"	H	45.07	25.34	34.57	2.590	± 0.003	1.36
15122'	H	45.34	25.35	34.66	2.590	± 0.003	1.37
14877'60"	V	36.02	25.35	27.67	2.580	± 0.004	1.09
14997'10"	V	29.64	25.35	22.72	2.580	± 0.004	0.90
15017'	V	27.93	25.32	21.36	2.600	± 0.004	0.84
15019'10"	V	15.6	25.34	11.98	2.580	± 0.004	0.47
15124'90"	V	23.49	25.35	17.93	2.600	± 0.004	0.71

Los valores de densidad y dimensiones fueron introducidos al equipo AutoLab2000 a medida que se iban ensayando las muestras. Conforme a lo exigido en el criterio de ensayo para el desarrollo de esta tesis, se aprecia que la relación Longitud-Diámetro de cada muestra (para ensayos acústicos) fue menos a dos, esta exigencia permitió que no hubiese atenuación de ondas S y así poder tener registros de ellas para su respectivo procesamiento.

Importante destacar que los reportes adquiridos para cada profundidad están anexados a la base de datos suministrados en este tomo donde se establece el resumen de operaciones y datos adquiridos al momento del ensayo: descripción de la muestra, tiempos de llegadas de ondas P , S_1 y S_2 , velocidades de ondas, "Picking" de Ondas, Módulo de Young y Relación de Poisson. A continuación se presentan los gráficos adquiridos durante los ensayos acústicos a distintos valores de presión confinante correspondientes a cada profundidad:

IV.2.1 TOM25 – 14885'11''H:

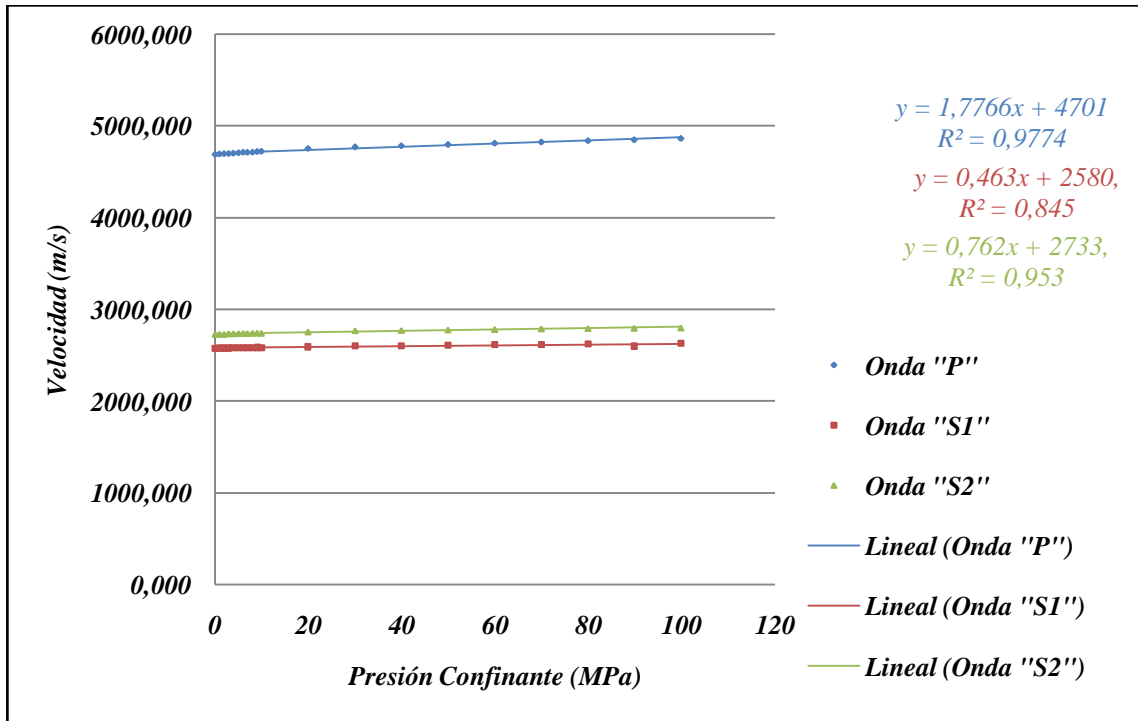


Gráfico 3. Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 14885'11''H del Pozo TOM25.

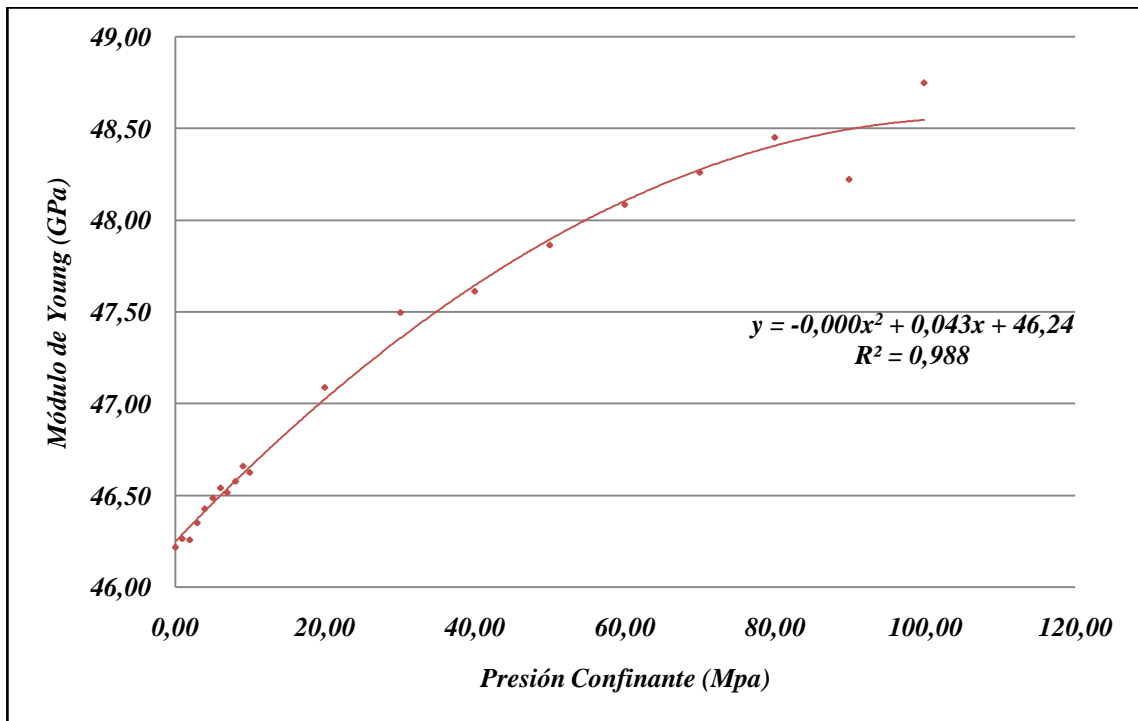


Gráfico 4. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14885'11''H del pozo TOM25.

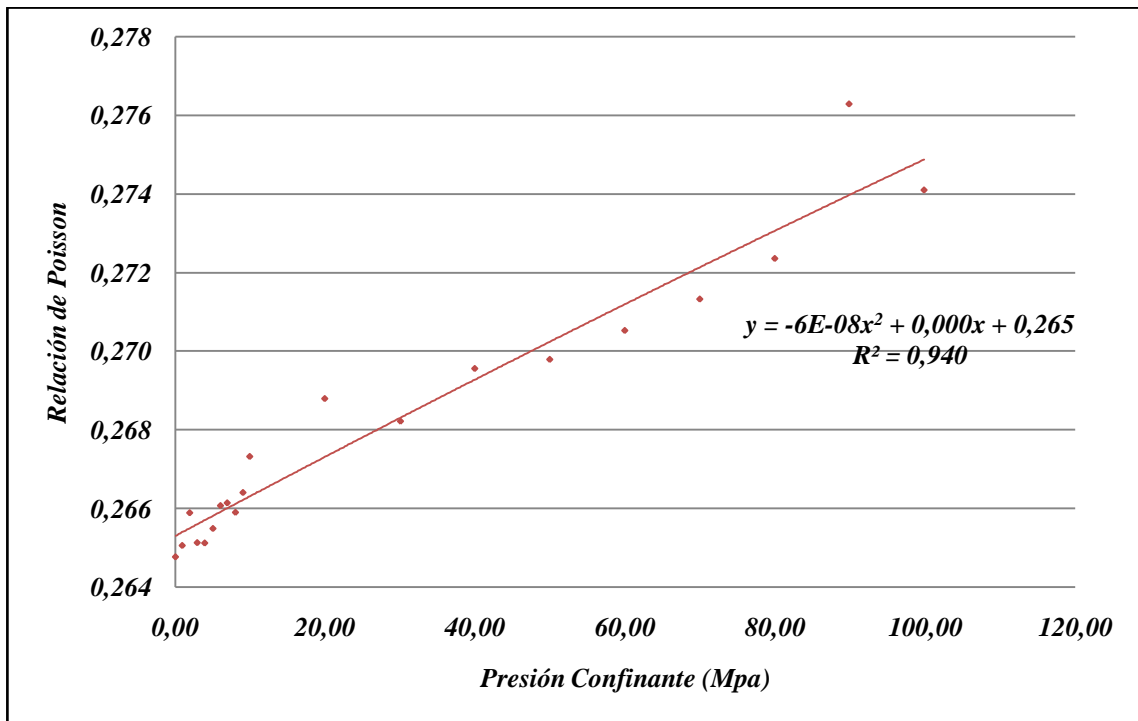


Gráfico 5. Variación de la relación de Poisson en función de la presión confinante en la muestra 14885'11'H del pozo TOM25.

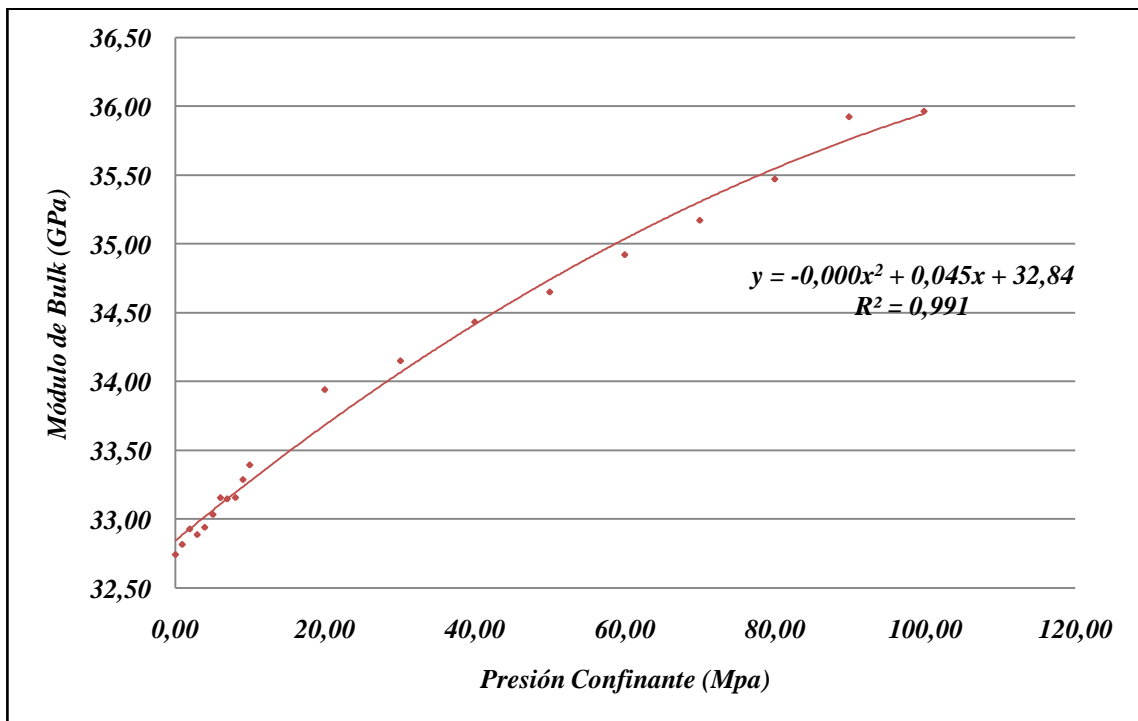


Gráfico 6. Variación del Módulo de Bulk en función de la presión confinante en la muestra 14885'11'H del pozo TOM25.

IV.2.2 TOM25 – 14894'10''H:

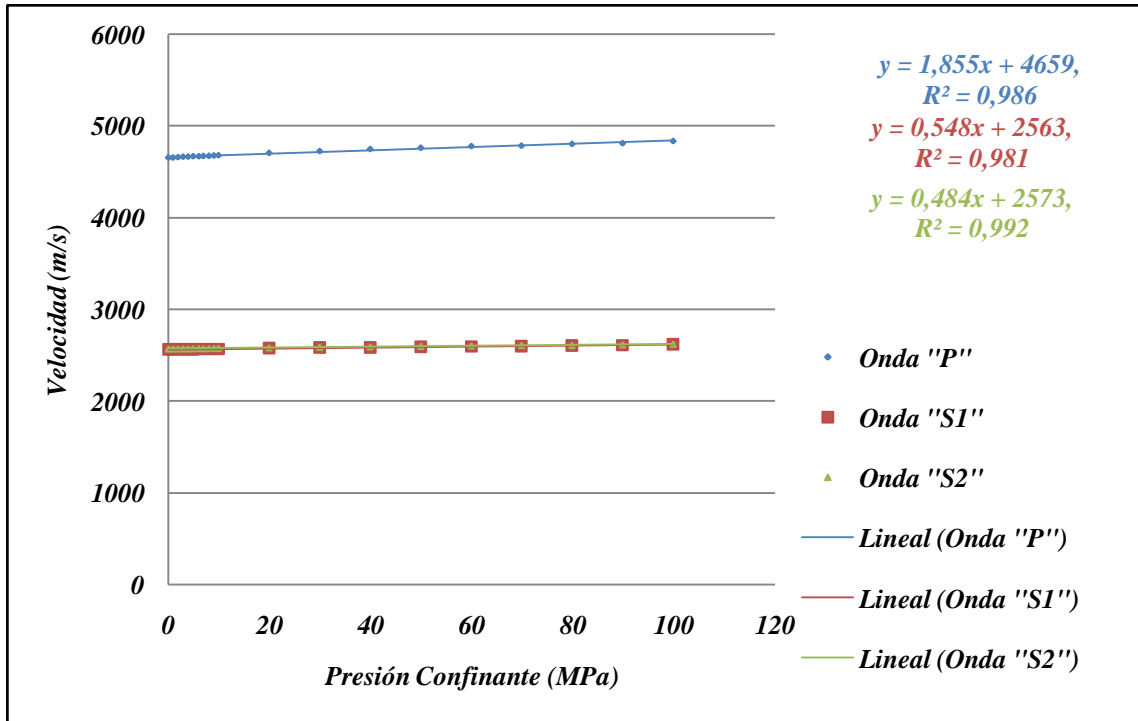


Gráfico 7. Variación de las velocidades de ondas en función de la presión confinante en la muestra 14894'10''H del pozo TOM25.

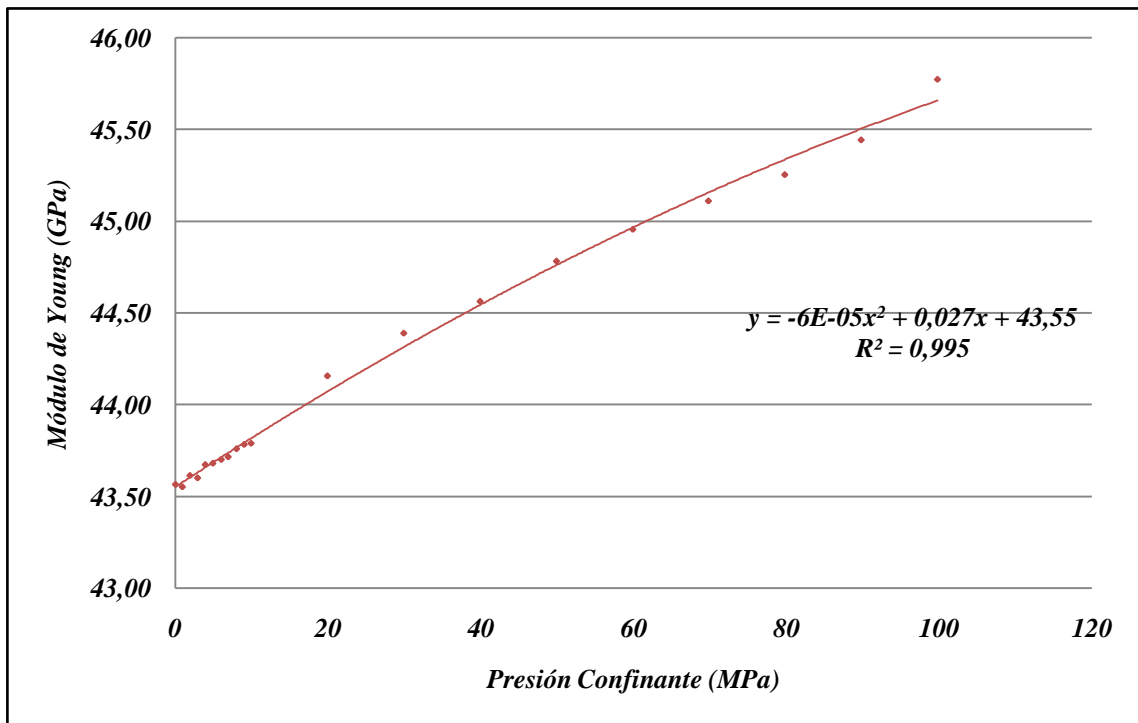


Gráfico 8. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14894'10''H del pozo TOM25.

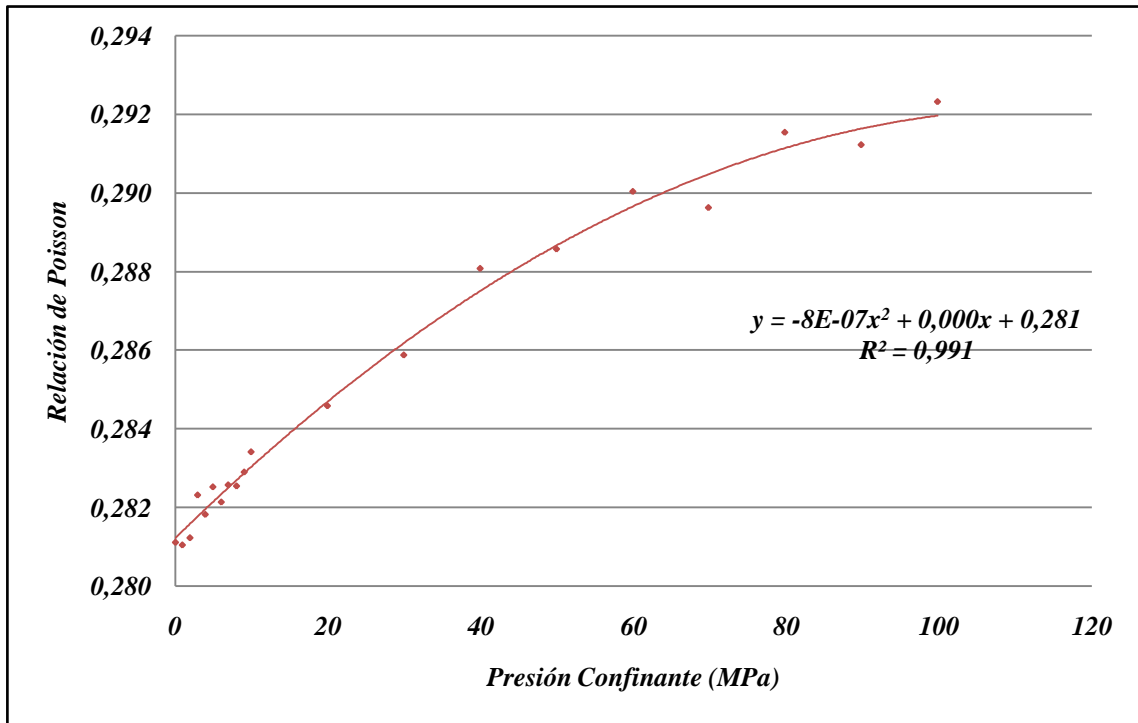


Gráfico 9. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 14894'1'H del pozo TOM25.

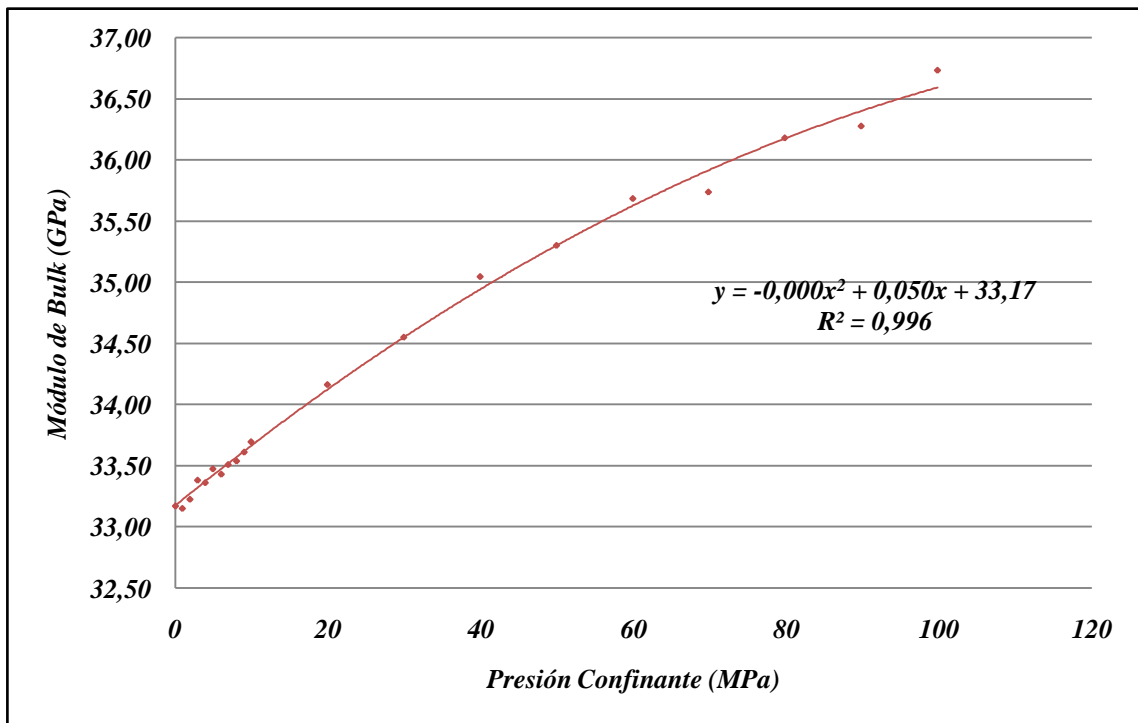


Gráfico 10. Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 14894'1'H del pozo TOM25.

IV.2.3 TOM25 – 14993 'H:

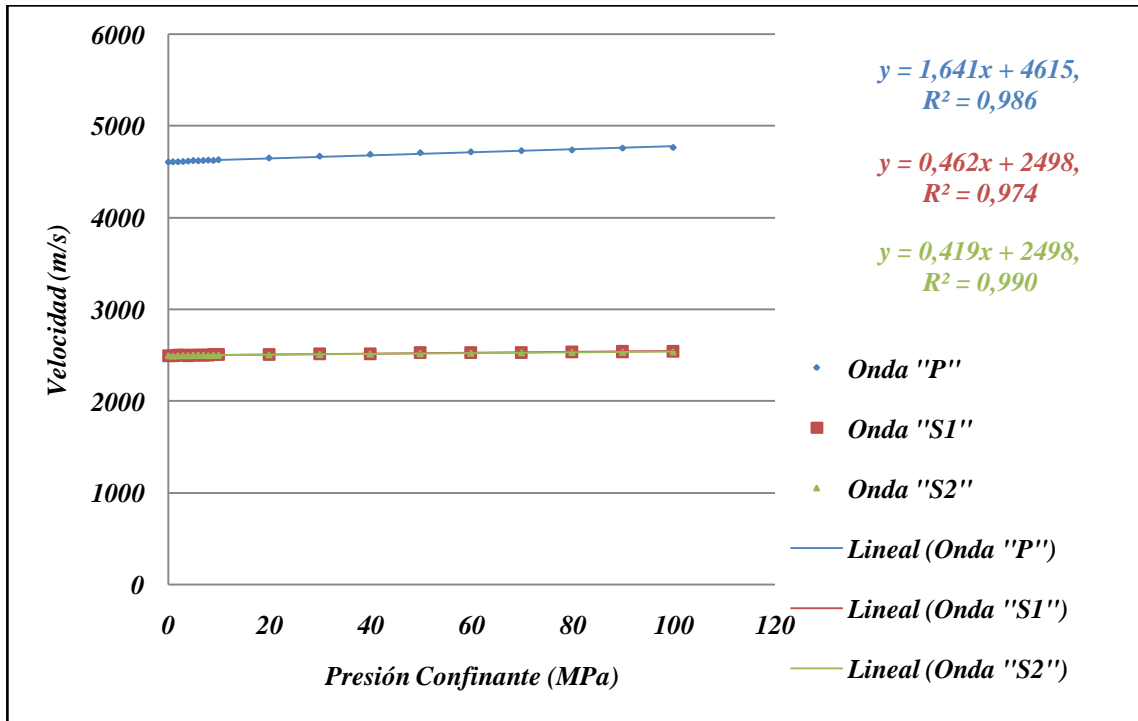


Gráfico 11. Variación de las velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 14993 'H del pozo TOM25.

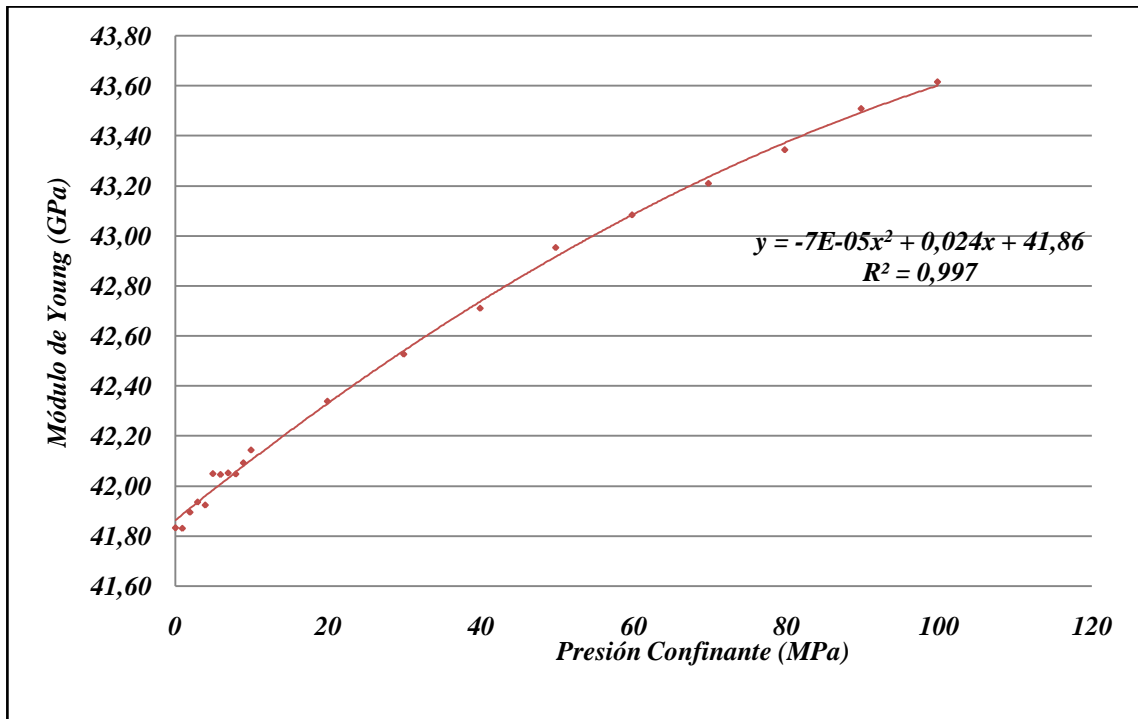


Gráfico 12. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14993 'H del pozo TOM25.

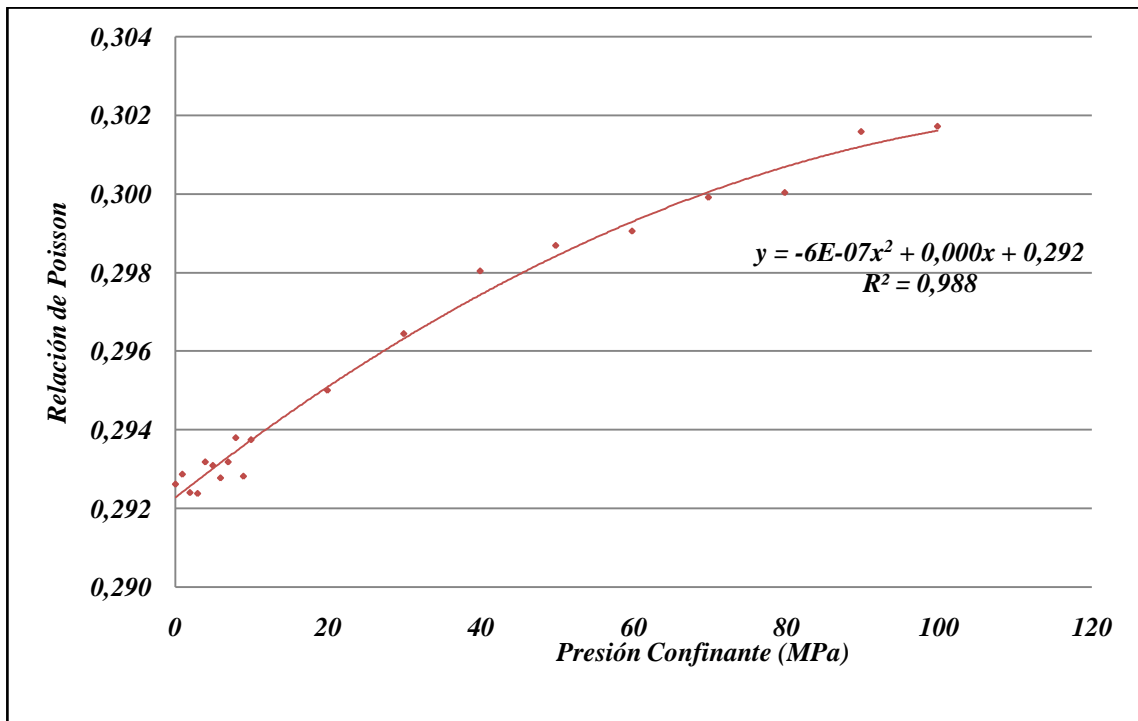


Gráfico 13. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 14993 H del pozo TOM25.

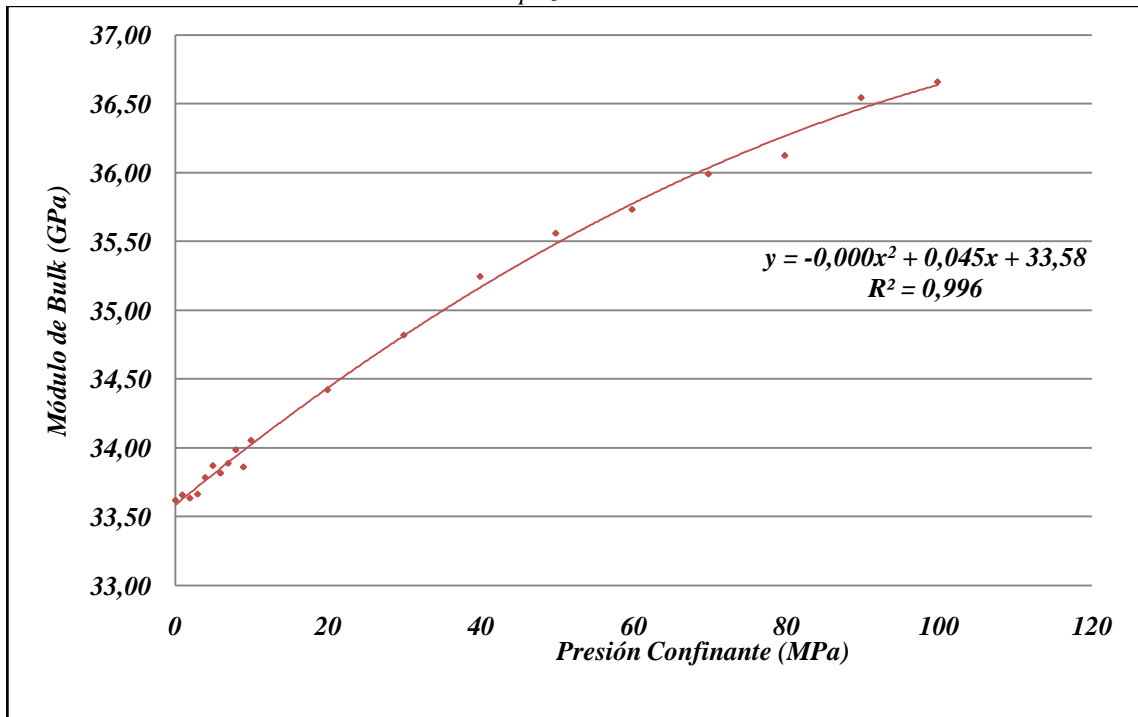


Gráfico 14. Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 14993 H del pozo TOM25.

IV.2.4 TOM25 – 15014'10''H:

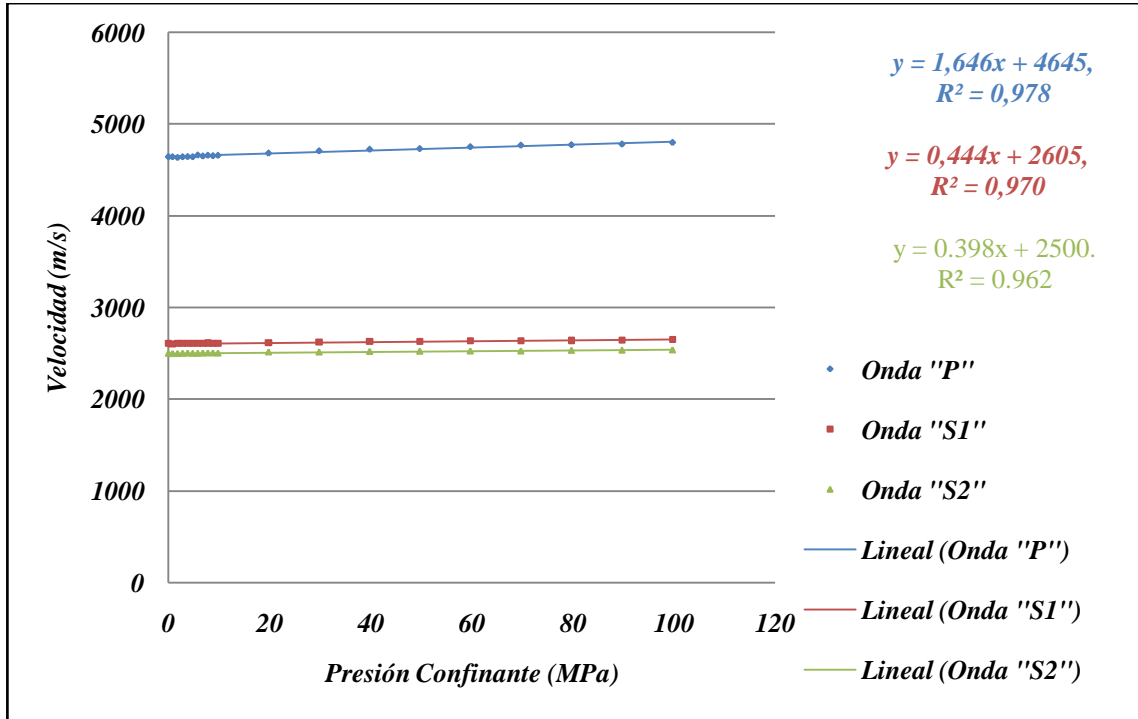


Gráfico 15. Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 15014'10''H del pozo TOM25.

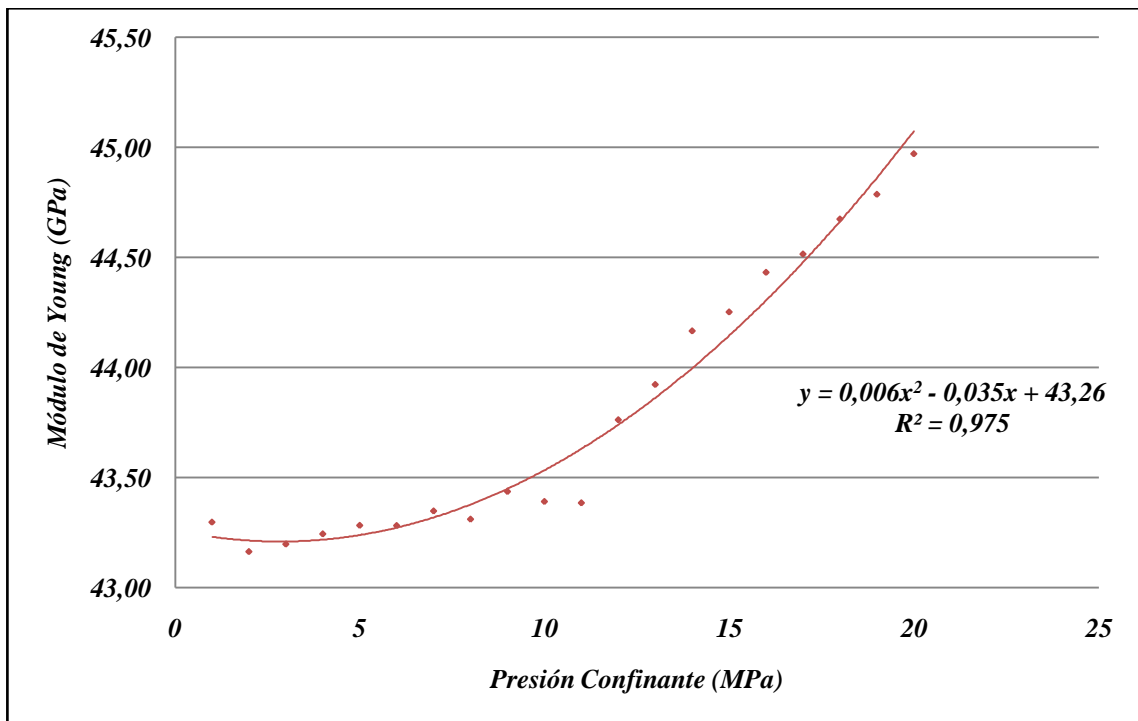


Gráfico 16. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15014'10''H del pozo TOM25.

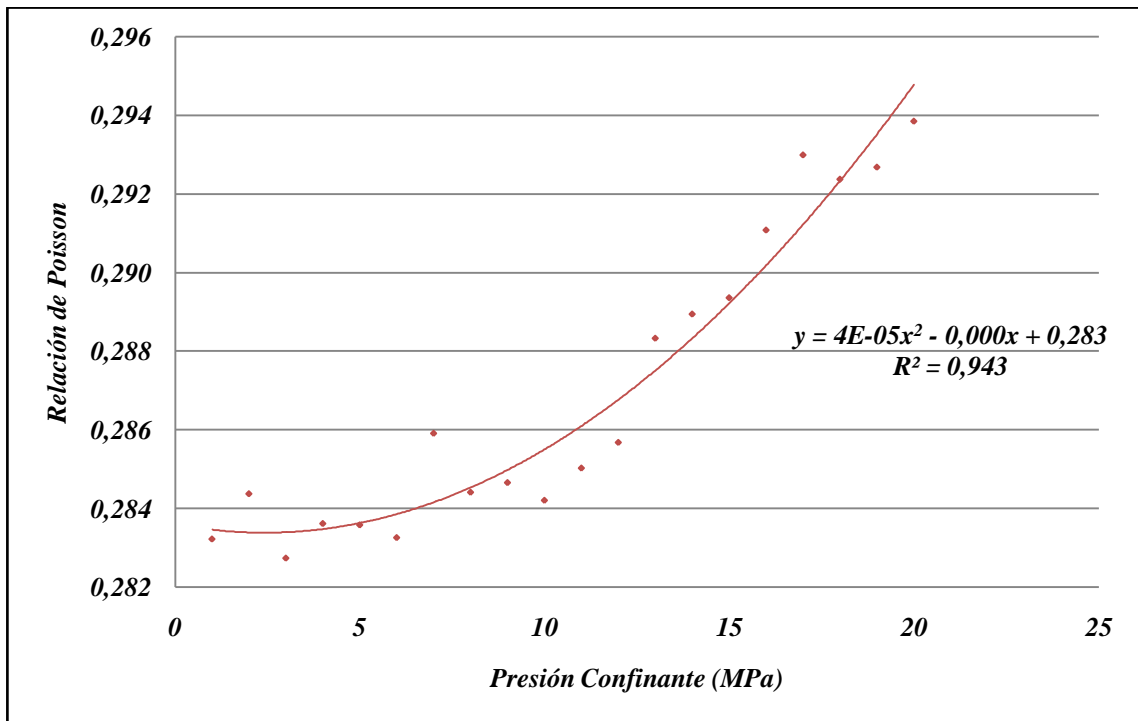


Gráfico 17. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15014'10'H del pozo TOM25.

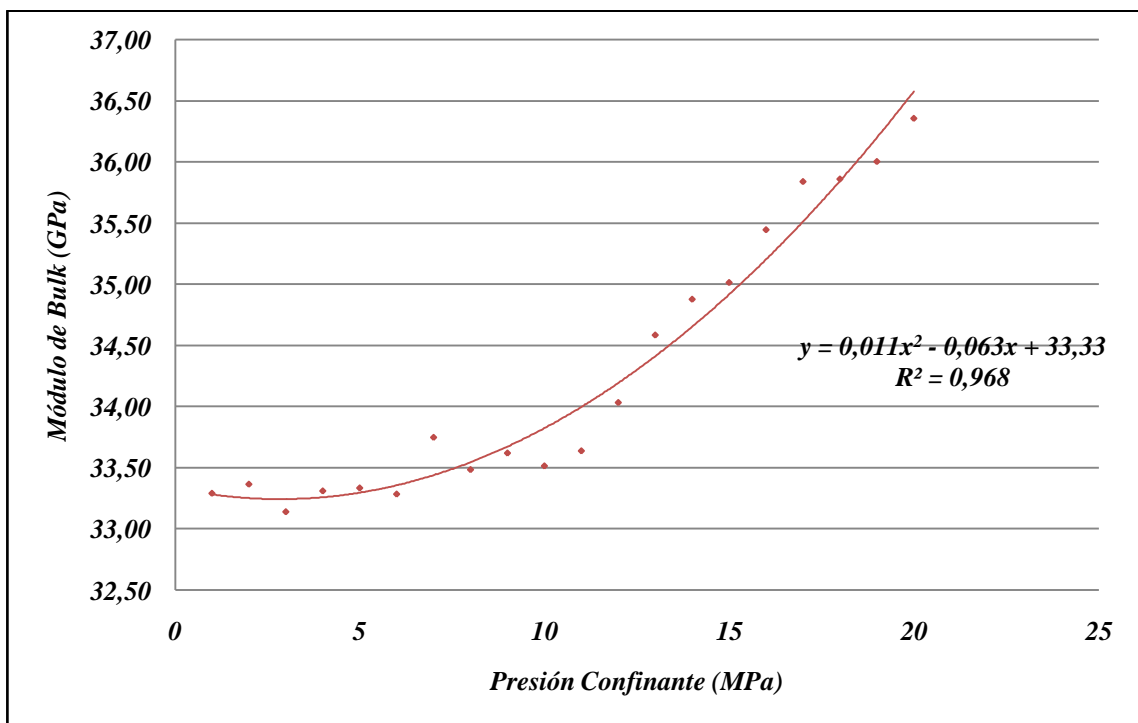


Gráfico 18. Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15014'10'H del pozo TOM25.

IV.2.5 TOM25 – 15122 'H:

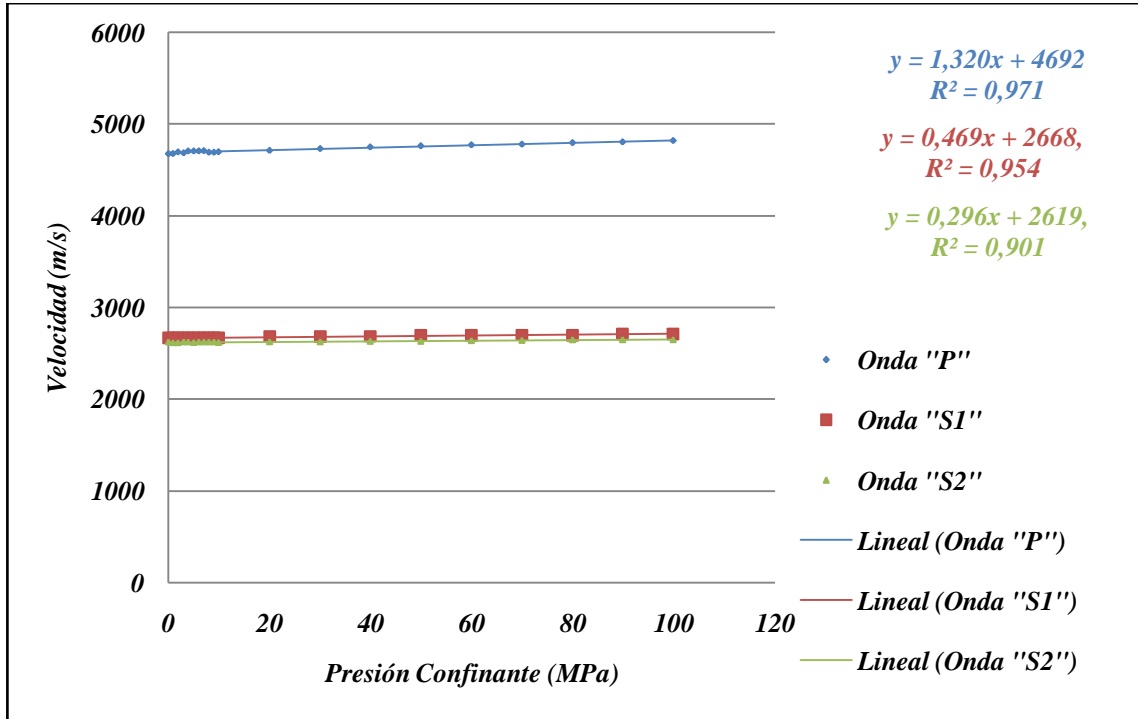


Gráfico 19. Variación de velocidades de ondas en función de la presión del confinamiento en la muestra 15122 'H del pozo TOM25.

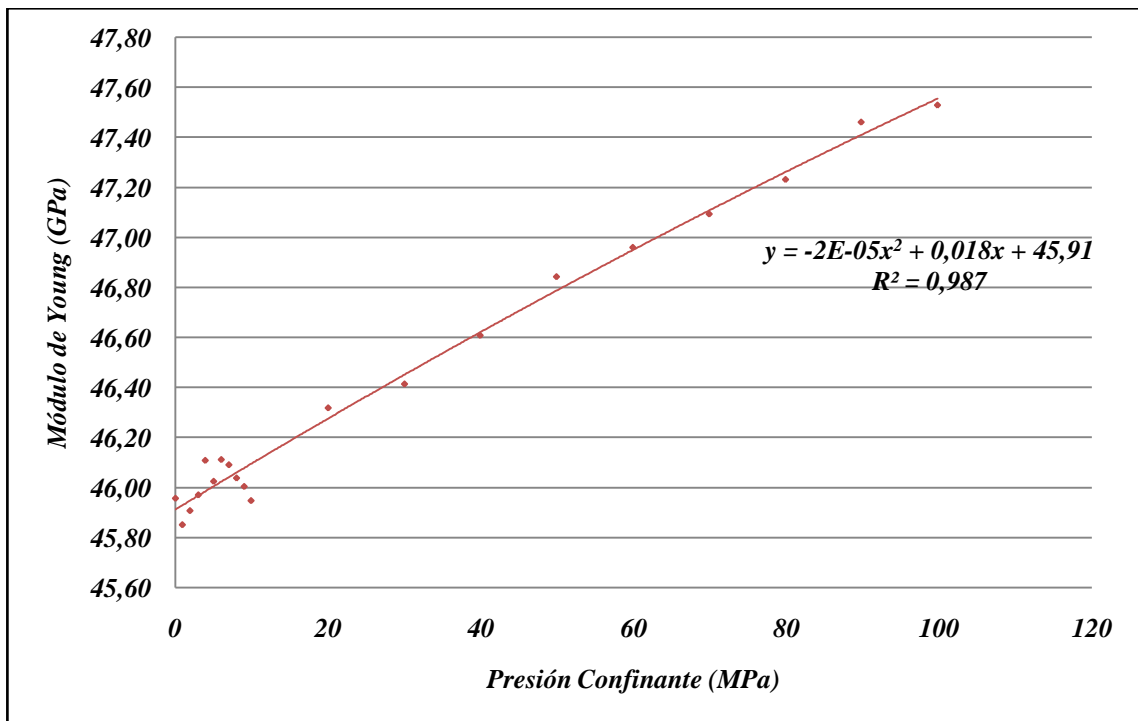


Gráfico 20. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15122 'H del pozo TOM25.

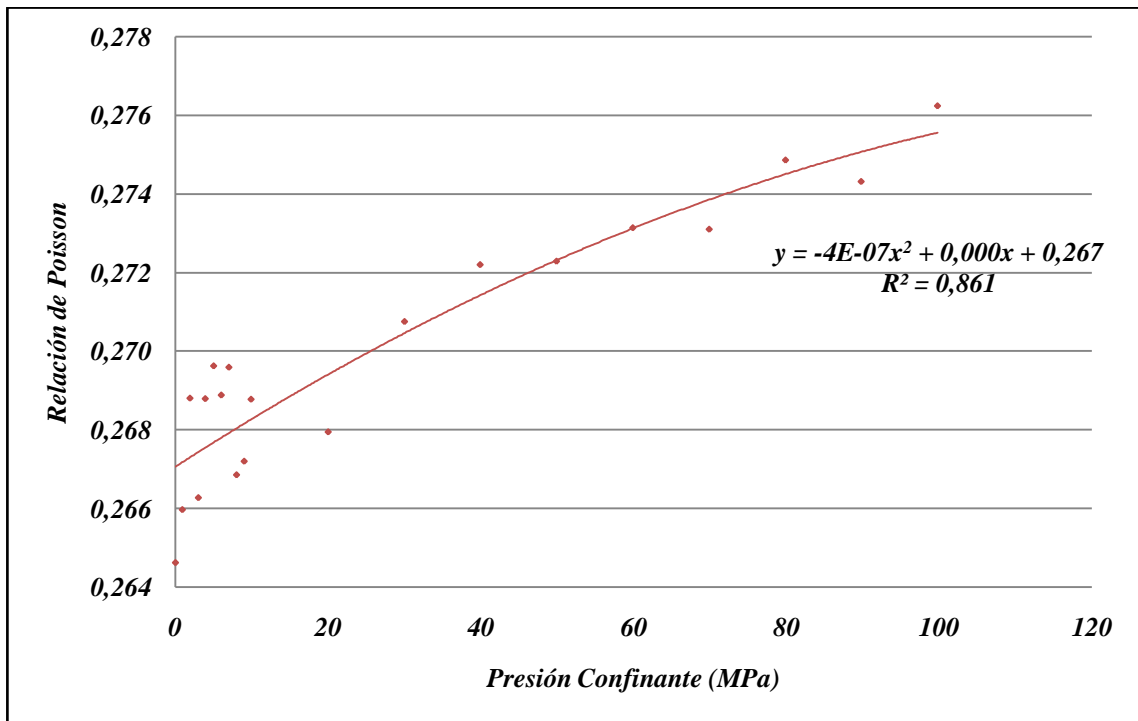


Gráfico 21. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15122 'H del pozo TOM25.

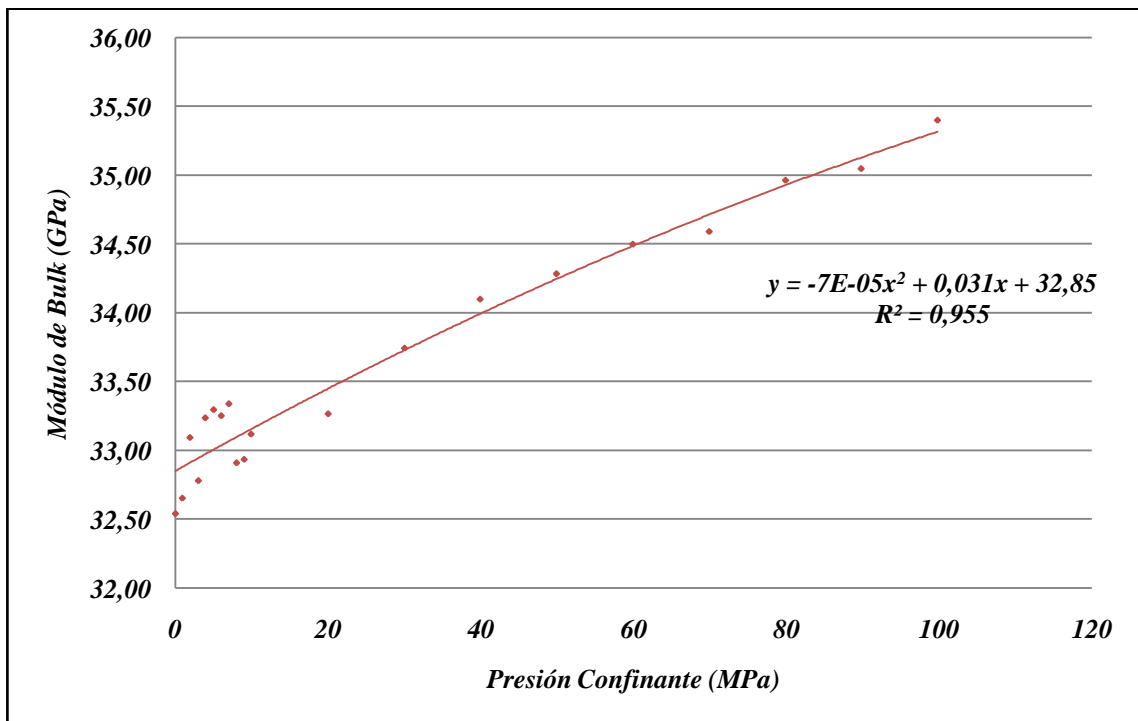


Gráfico 22. Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15122 'H del pozo TOM25.

- **Discusión de resultados acústicos para muestras horizontales:**

Siguiendo las recomendaciones del Trabajo Especial de Grado de la Lic. Silvia Bejarano ⁽⁸⁾, se realizaron medidas de velocidades en función de la presión confinante para un rango comprendido entre los 0 a 100 MPa. Para los primeros 10 MPa los saltos de presión confinante fueron de forma consecutiva con el objeto de determinar si hay alguna variación con el incremento del confinamiento. Después de los 10 MPa, los saltos de presión confinante fueron de 10 en 10 MPa.

En los **Gráficos 3, 7, 11, 15 y 19**, se observa contrariamente que en las arenas, la invariabilidad en las velocidades (véase las pendientes), esto da indicio de la posible poca porosidad y alta compactación de las muestras. Se puede apreciar también que hay una pequeña diferencia entre las velocidades de las ondas S_1 y S_2 , lo que demuestra la alta homogeneidad y compactación de las muestras.

En los reportes acústicos (suministrados como anexos en el CD de base de datos procesados y adquiridos de los ensayos de las muestras de pozo), correspondiente a cada profundidad, se muestran los tiempos de las primeras llegadas de las ondas capturadas por el sistema AutoLab2000 (ondas “ P ”, “ S_1 ” y “ S_2 ”) observándose que, en promedio para muestras horizontales, las velocidades son de 4711.52 m/seg para ondas “ P ”, y de 2580.04 m/seg para ondas “ S ”.

En los **Gráficos 4, 8, 12, 16 y 20** se observa poca variabilidad en el modulo de Young en función de el gran rango de variación de presión confinante, lo que corrobora la baja porosidad de la muestra, además se aprecia un valor promedio del módulo de Young para muestras horizontales de 44.81 GPa.

De igual forma, en los **Gráficos 5, 9, 13, 17 y 21** la variación de la relación de Poisson es pequeña para la alta variación de presión confinante, lo que podría indicar poca deformabilidad de la muestra. Esto se atribuye a la baja porosidad o tal vez al cierre de los poros por efecto de la presión hidrostática.

En los **Gráficos 6, 10, 14, 18 y 22** se observa que el modulo de Bulk presenta pequeña variación según la presión confinante, es decir la muestra es poco deformable volumétricamente.

IV.2.6 TOM25 – 14877'6''V:

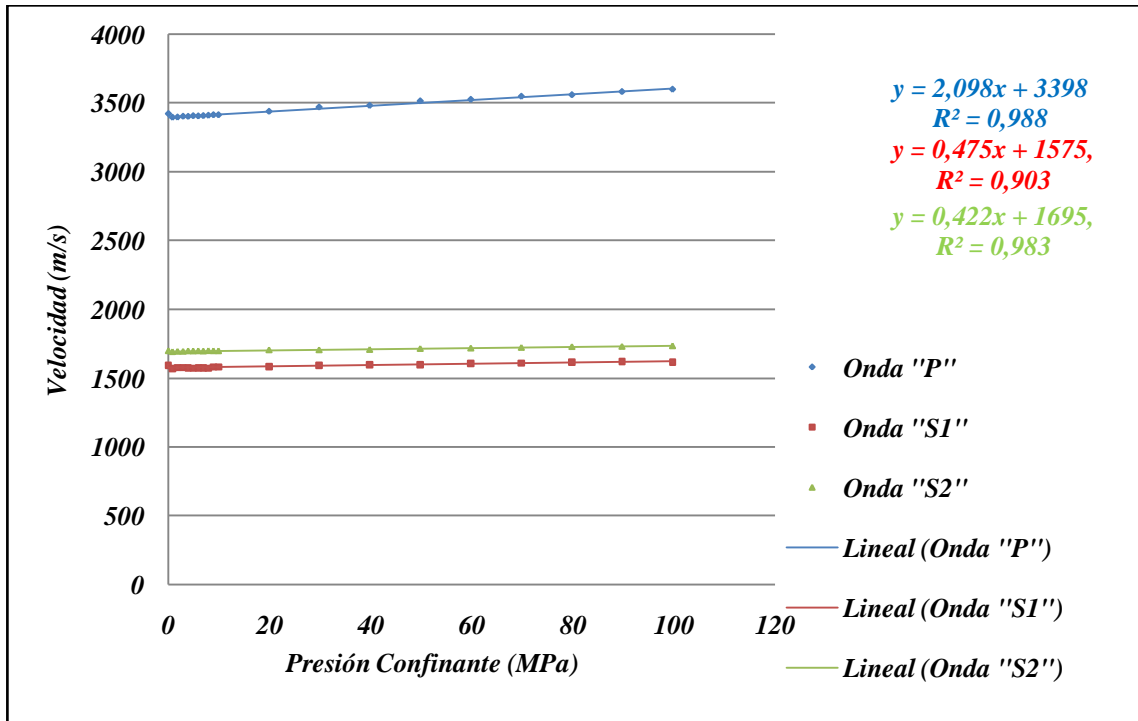


Gráfico 23. Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 14877'6''V del pozo TOM25.

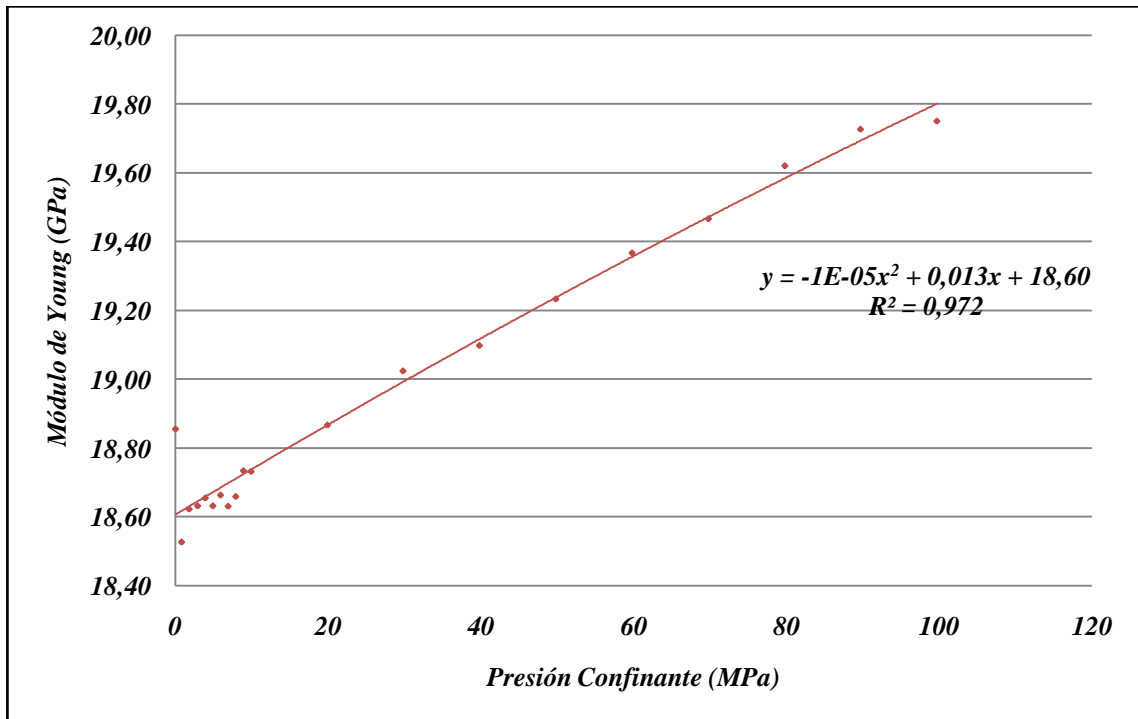


Gráfico 24. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14877'6''V del pozo TOM25.

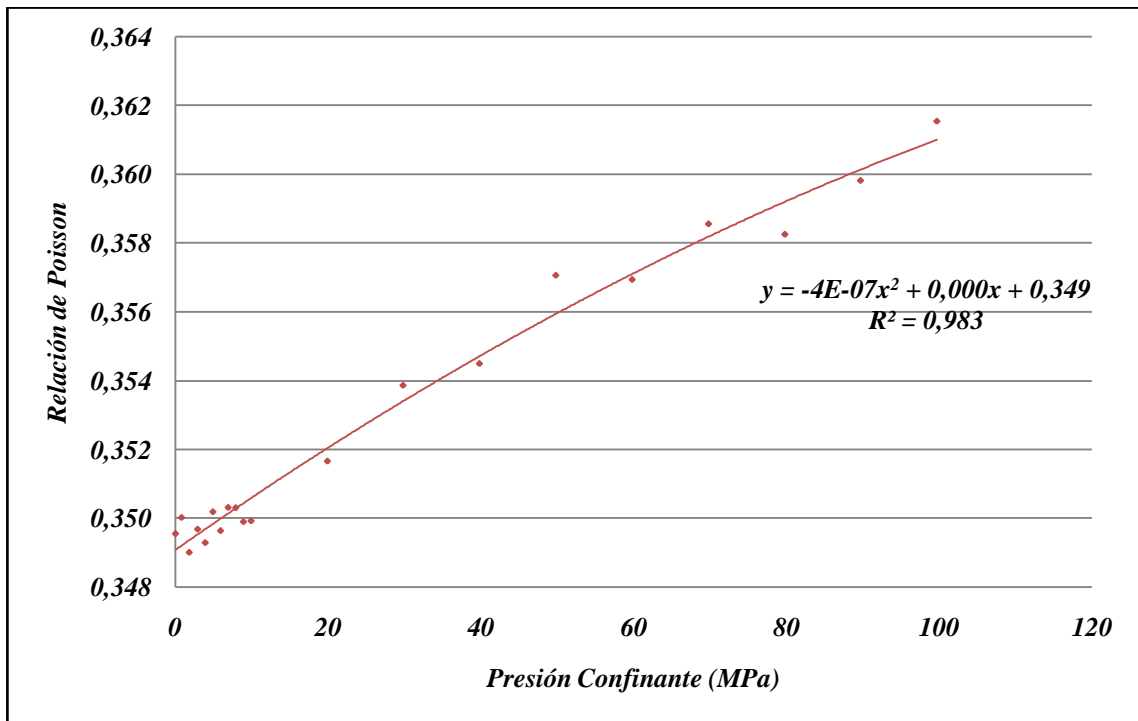


Gráfico 25. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 14877'6'V del pozo TOM25.

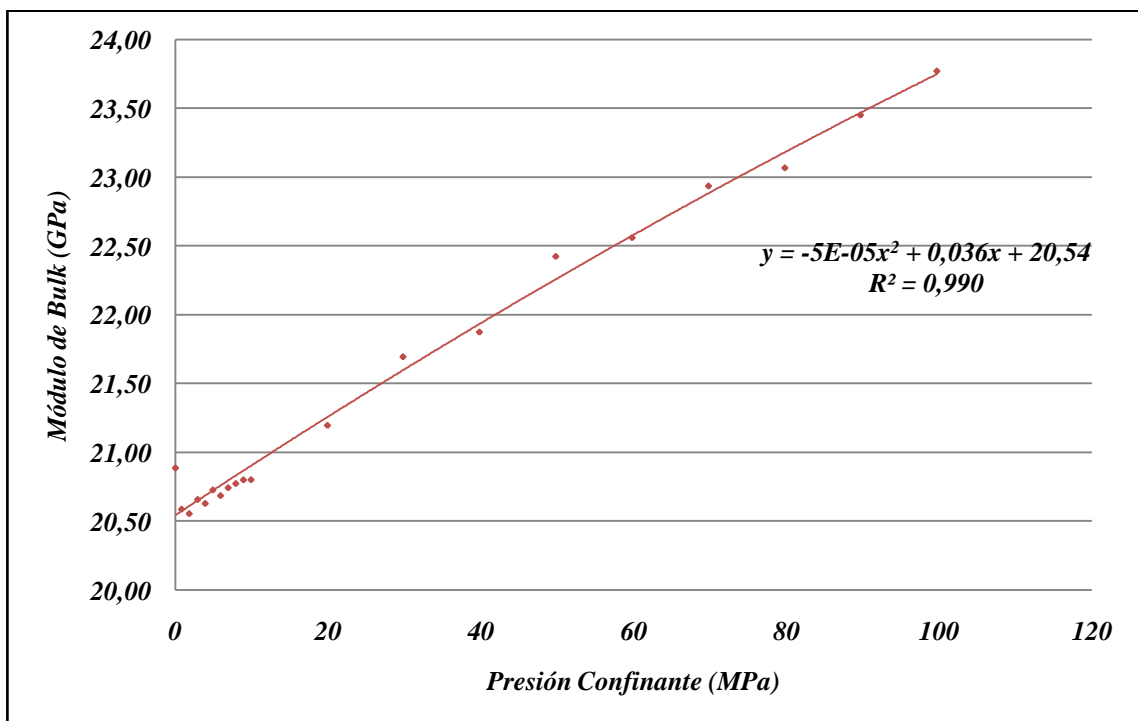


Gráfico 26. Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 14877'6'V del pozo TOM25.

IV.2.7 TOM25 – 14997'10''V:

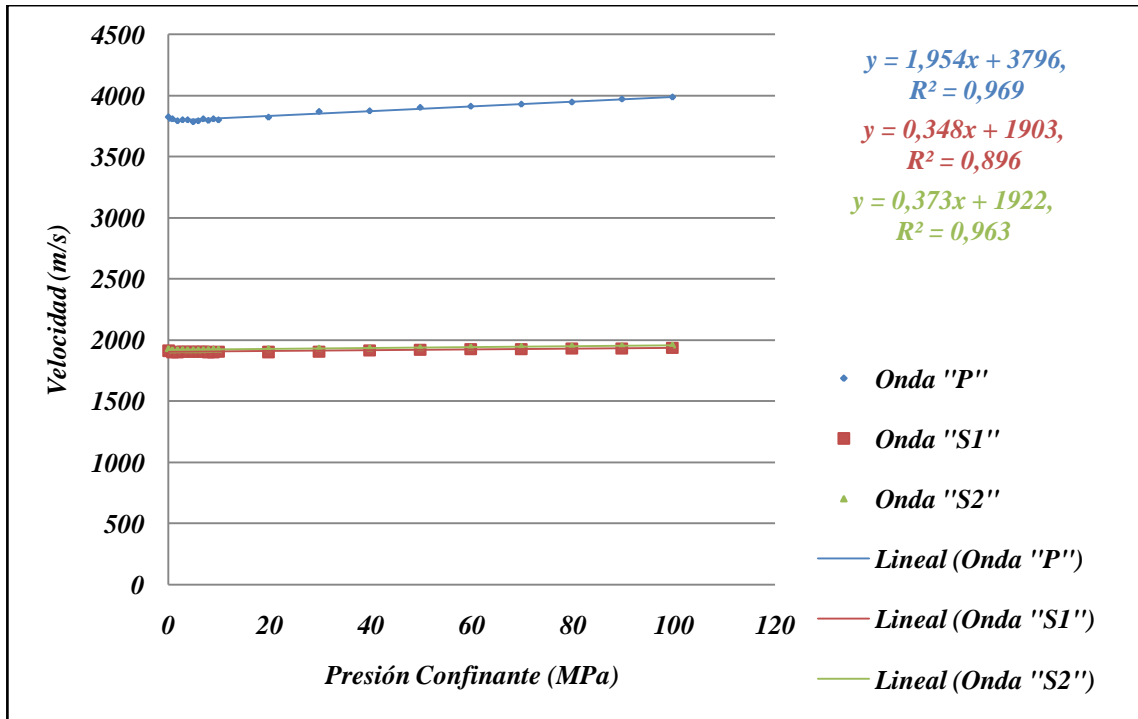


Gráfico 27. Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 14997'10''V del pozo TOM25.

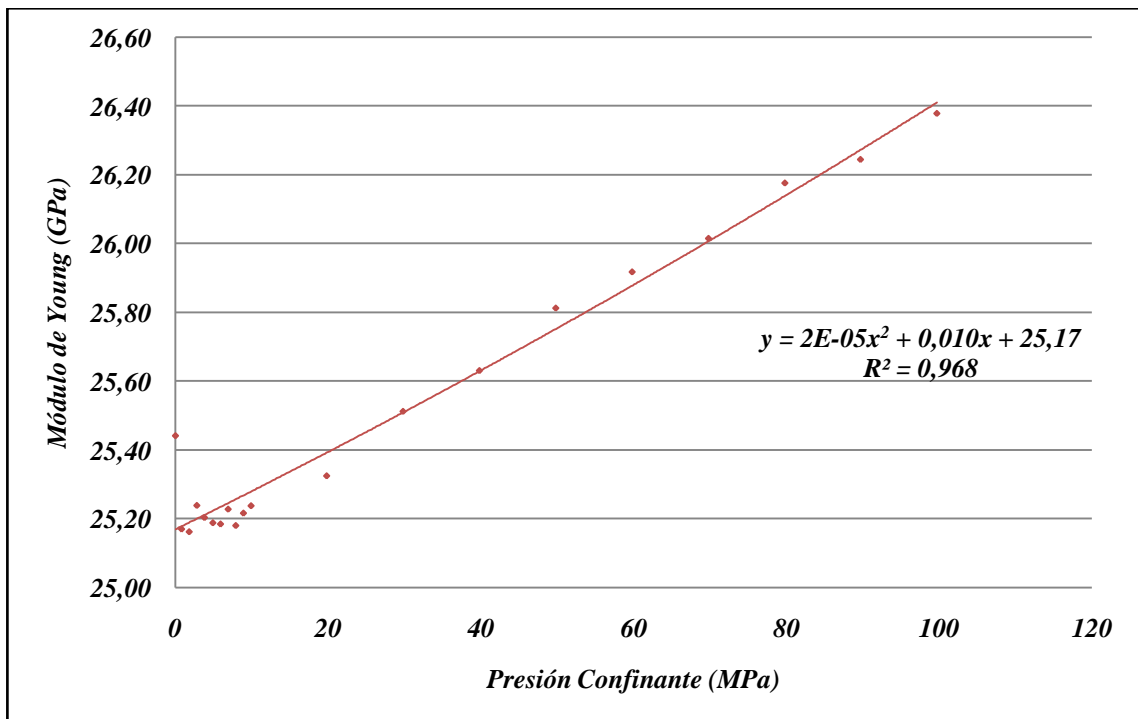


Gráfico 28. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 14997'10''V del pozo TOM25.

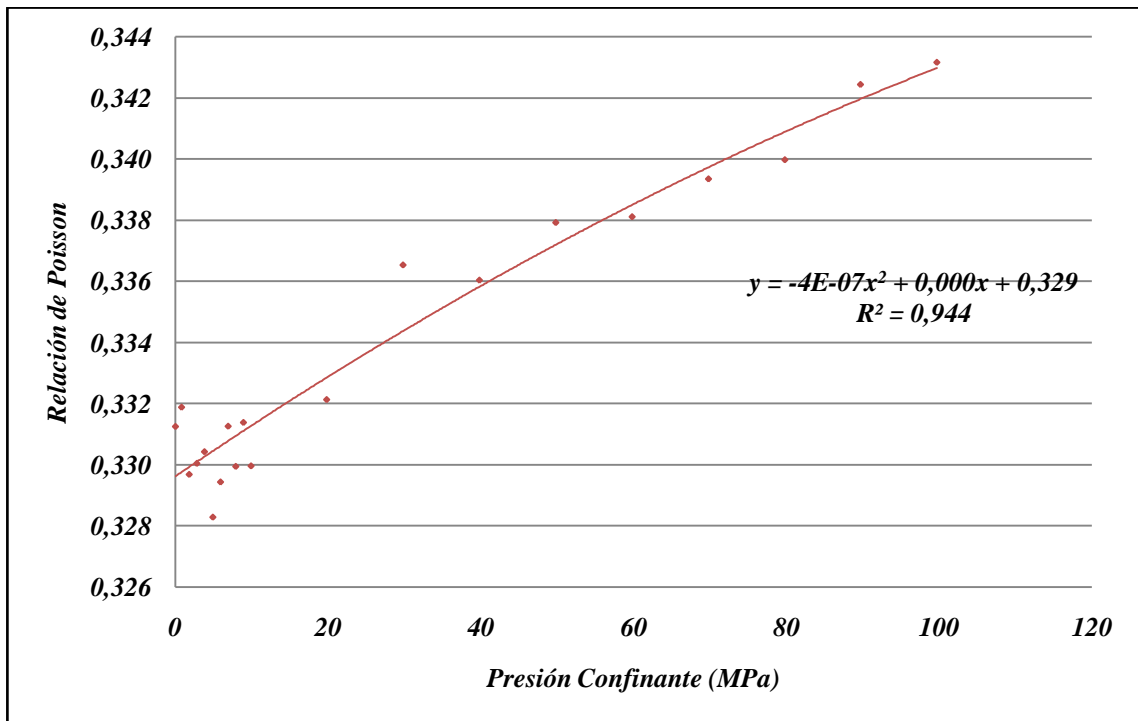


Gráfico 29. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 14997'1'V del pozo TOM25.

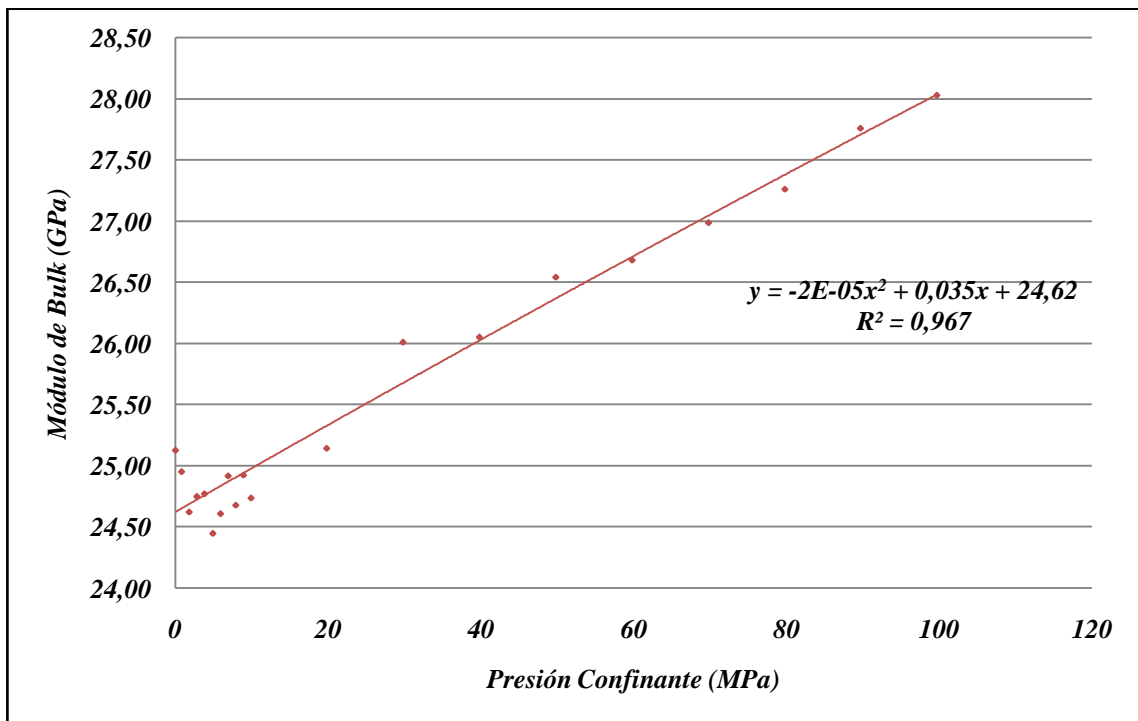


Gráfico 30. Variación del módulo de Bulk en función de la presión confinante en la muestra 14997'1'V del pozo TOM25.

IV.2.8 TOM25 – 15017 V:

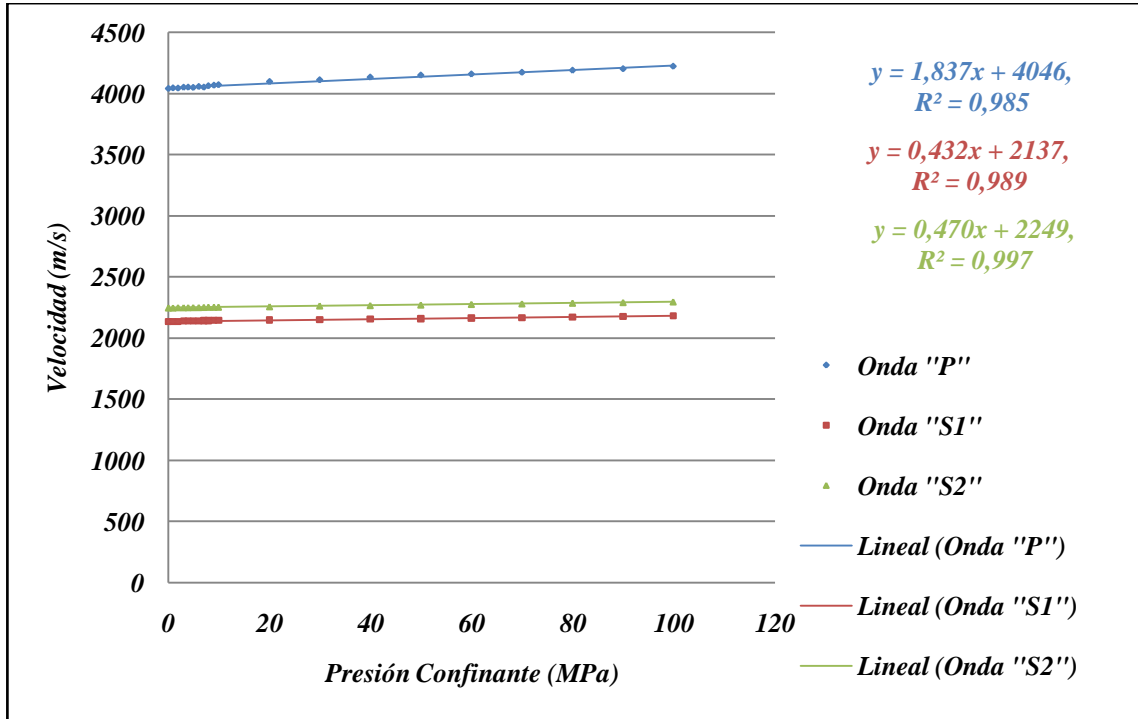


Gráfico 31. Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 15017 V del pozo TOM25.

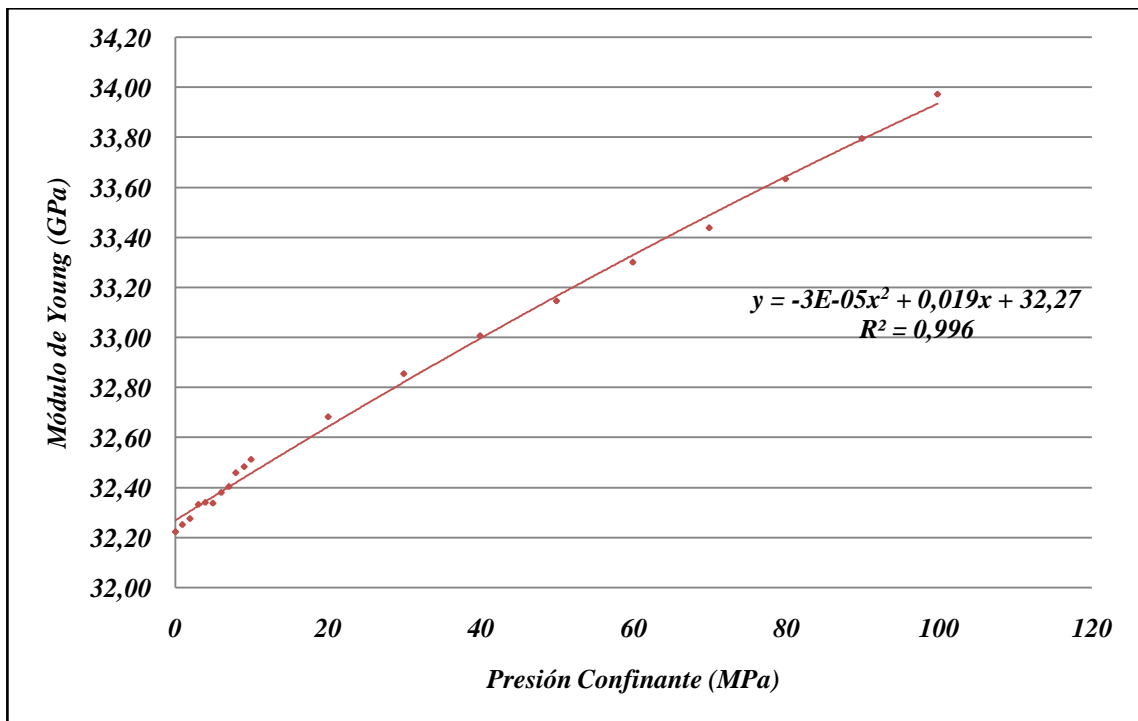


Gráfico 32. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15017 V del pozo TOM25.

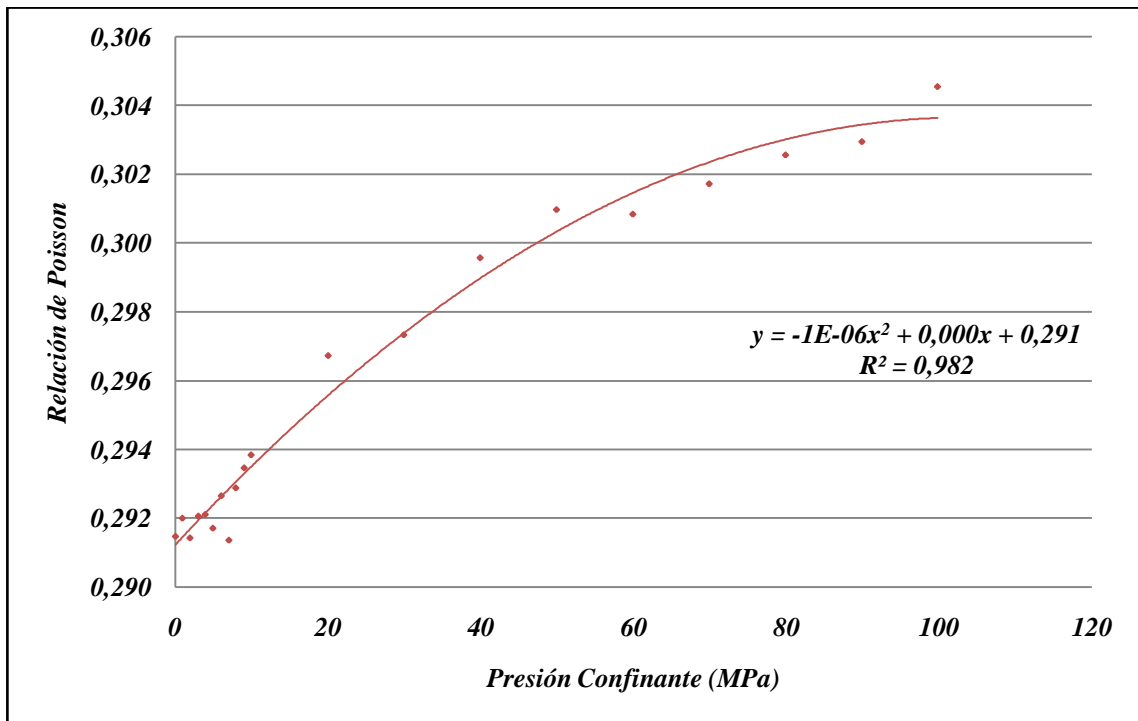


Gráfico 33. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15017V del pozo TOM25.

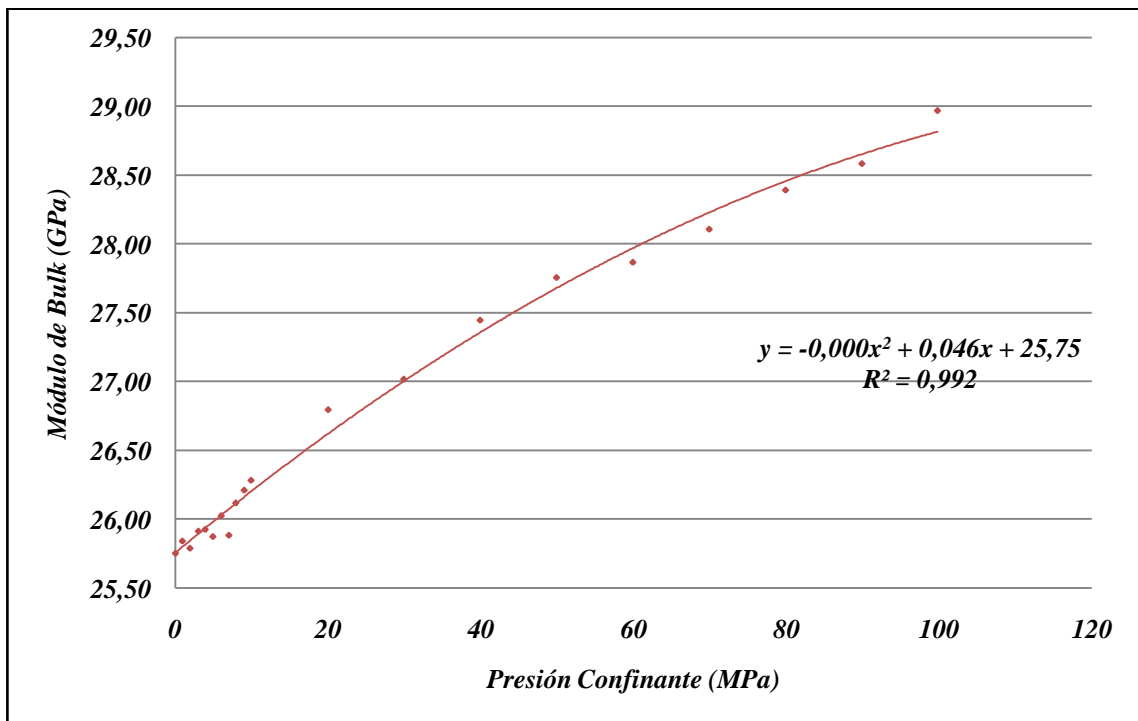


Gráfico 34. Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15017V del pozo TOM25.

IV.2.9 TOM25 - 15019'10''V:

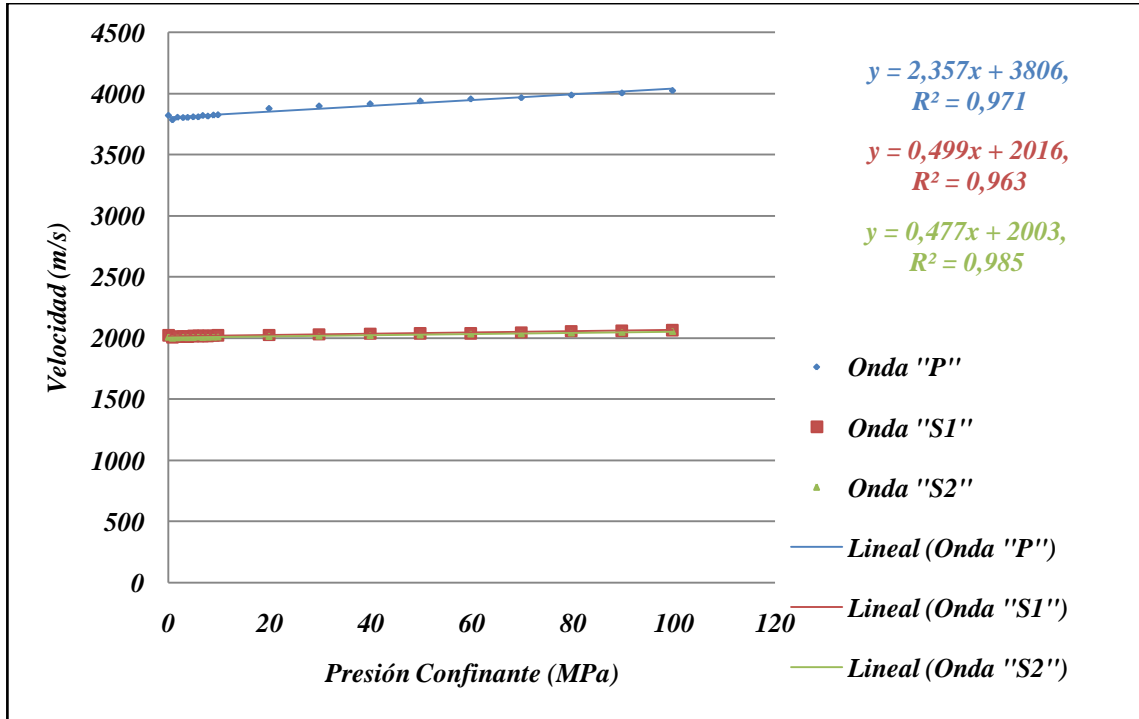


Gráfico 35. Variación de velocidades de ondas en función de la presión de confinamiento en la muestra 15019'10''V del pozo TOM25.

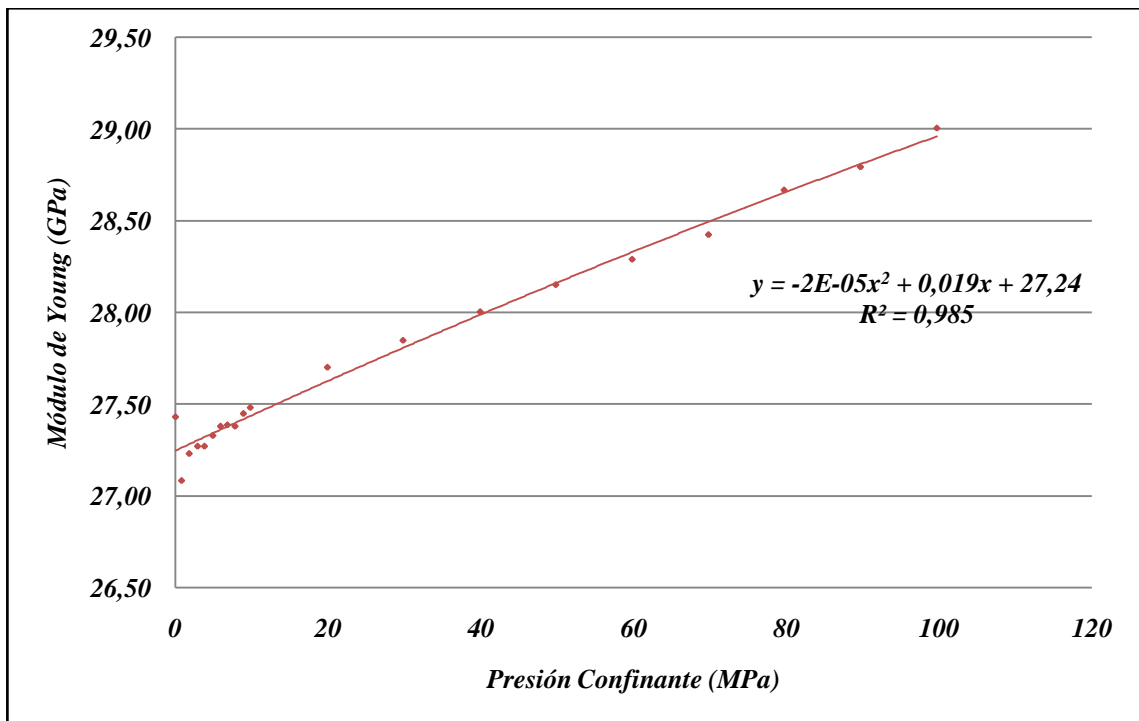


Gráfico 36. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15019'10''V del pozo TOM25.

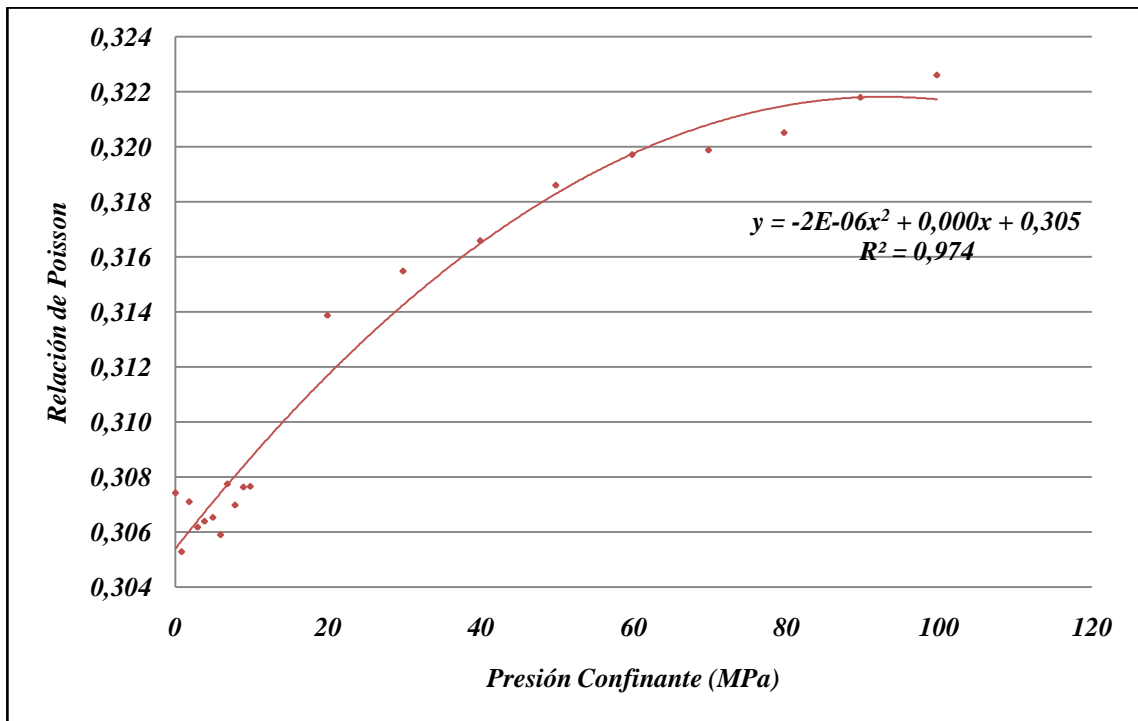


Gráfico 37. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15019'1'V del pozo TOM25.

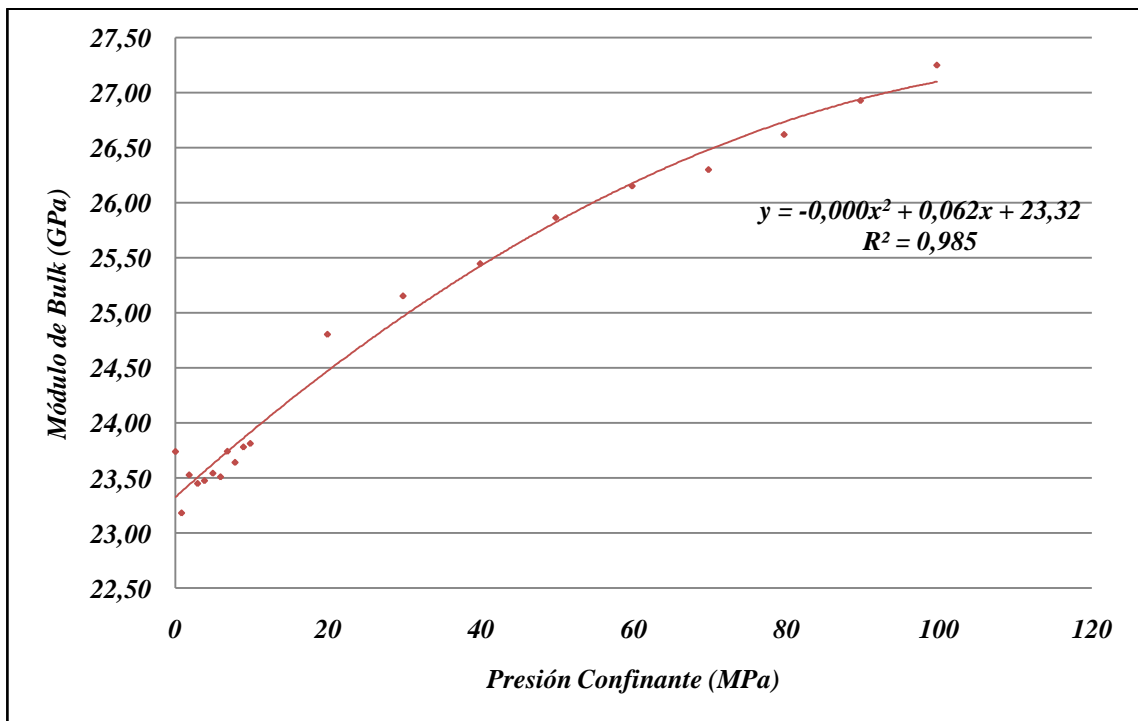


Gráfico 38. Variación del módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15019'1'V del pozo TOM25.

IV.2.10 TOM25 - 15124'9''V:

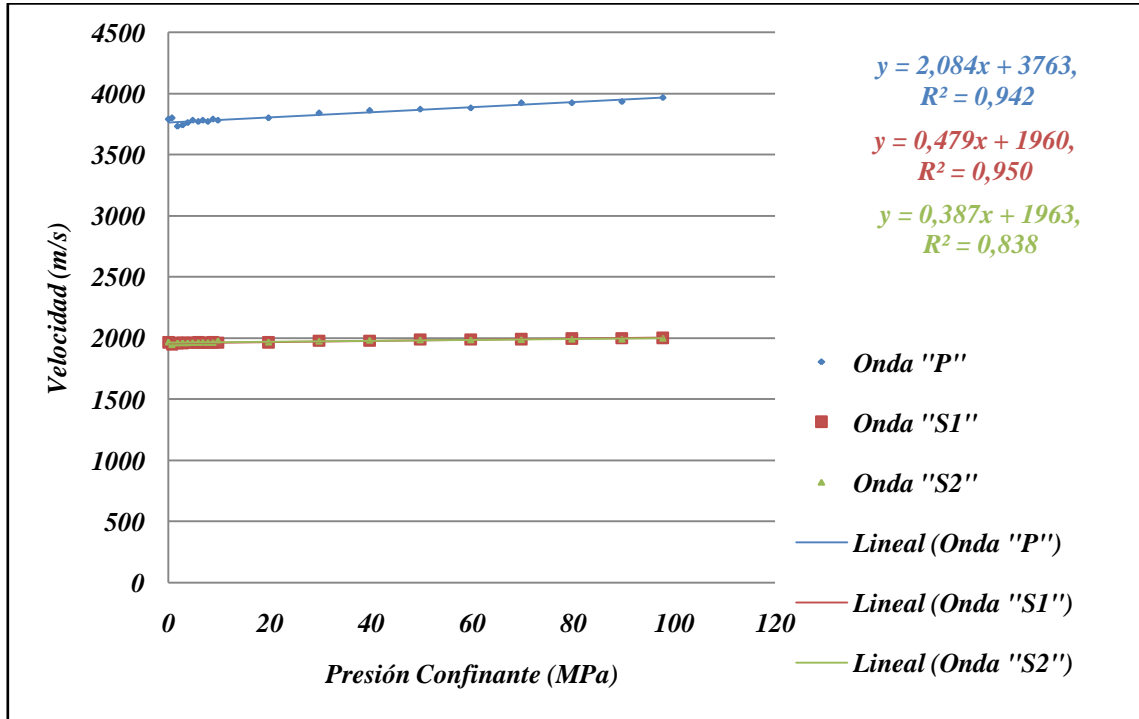


Gráfico 39. Variación de velocidades de onda en función de la presión de confinamiento en la muestra 15124'9''V del pozo TOM25.

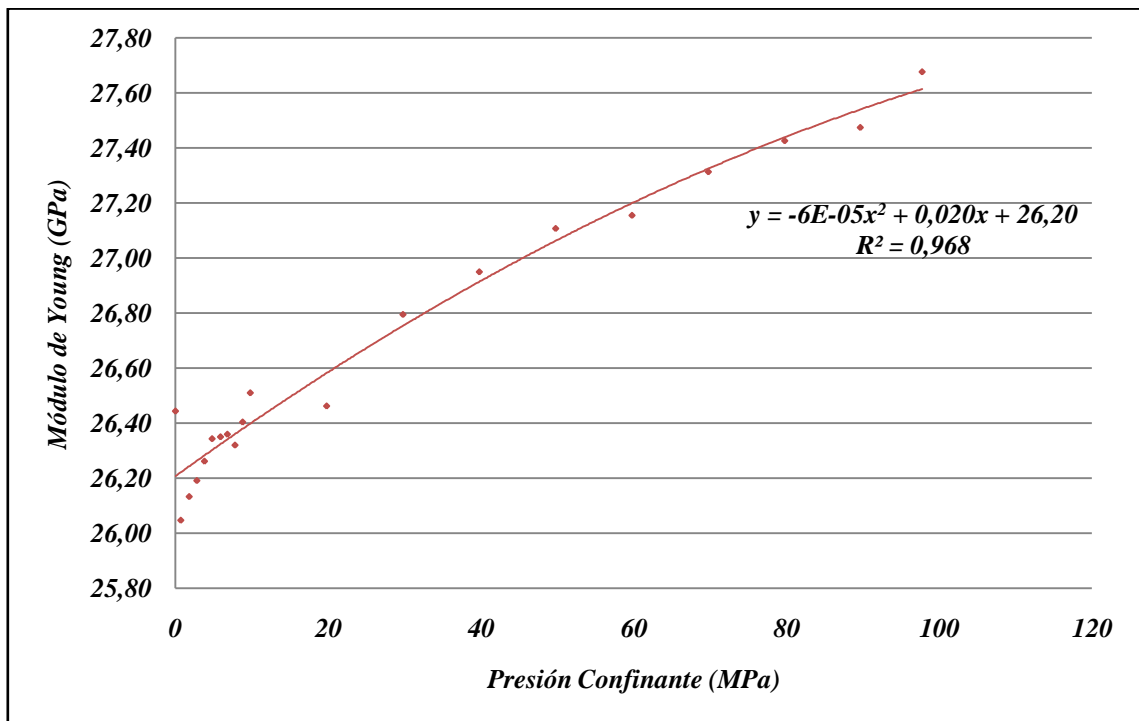


Gráfico 40. Variación del módulo de Young en función de la presión de confinamiento en la muestra 15124'9''V del pozo TOM25.

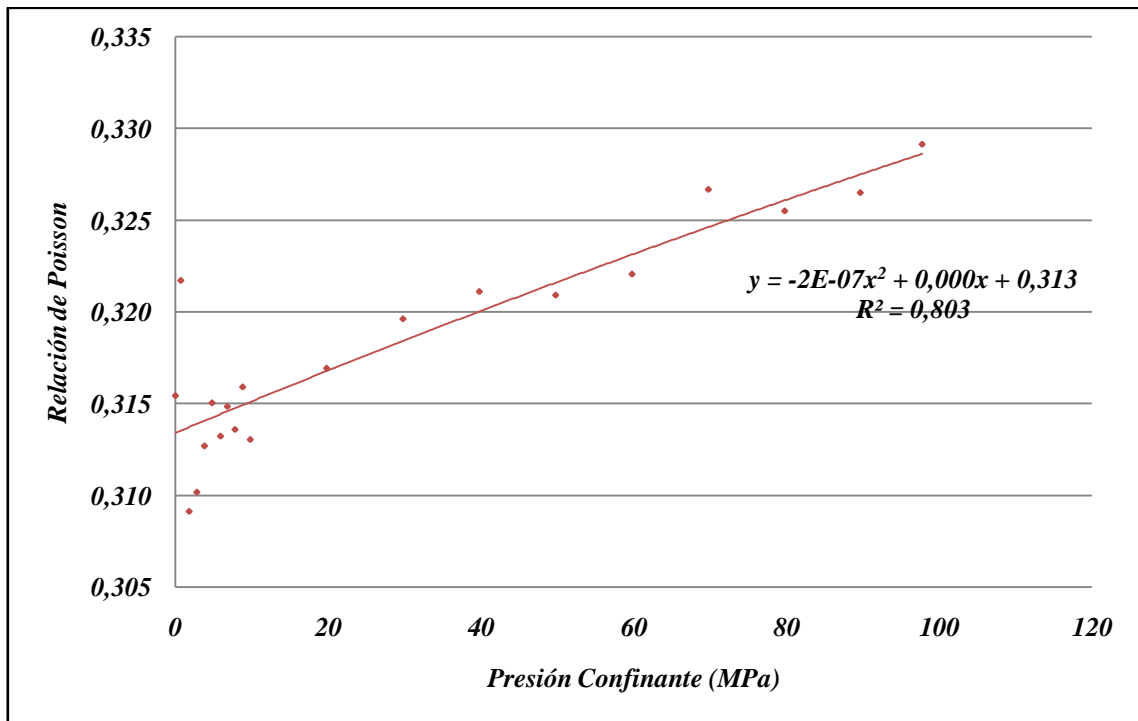


Gráfico 41. Variación de la relación de Poisson en función de la presión de confinamiento en la muestra 15124'9'V del pozo TOM25.

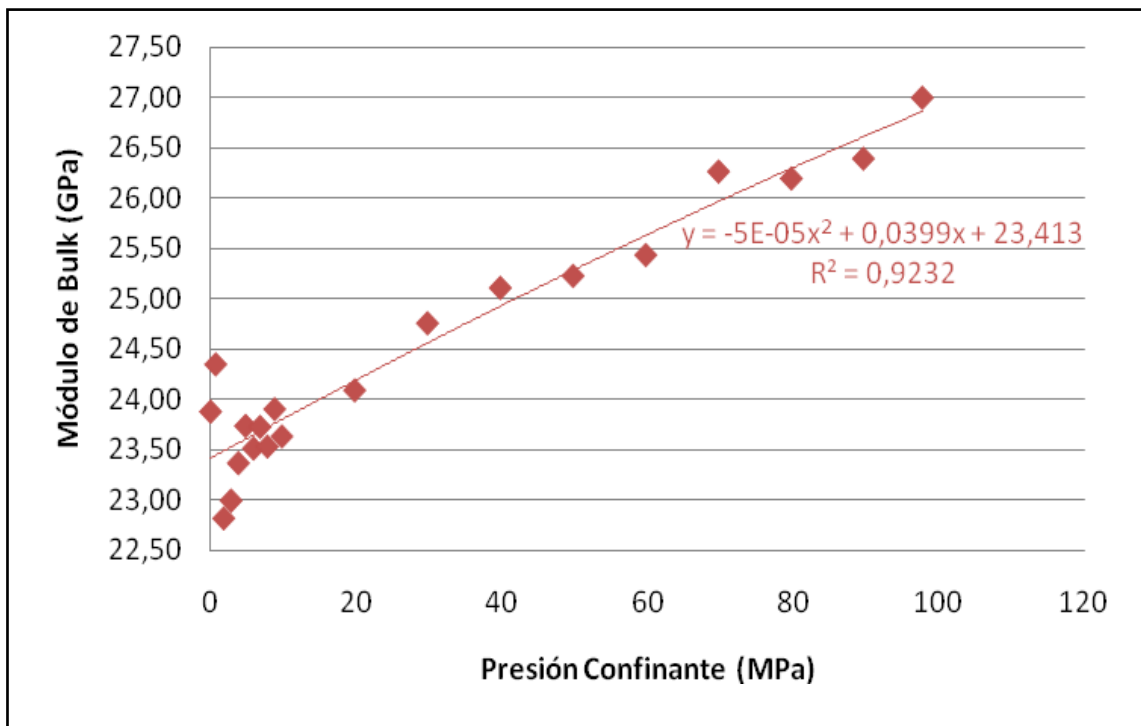


Gráfico 42. Variación del Módulo de Bulk en función de la presión de confinamiento en la muestra 15124'9'V del pozo TOM25.

- **Discusión de resultados acústicos para muestras verticales:**

Siguiendo las recomendaciones del Trabajo Especial de Grado de la Lic. Silvia Bejarano ⁽⁸⁾, se realizaron medidas de velocidades en función de la presión confinante en el rango de 0 a 10 MPa con incrementos de presión de uno en uno, sucesivamente se incrementó de 10 en 10MPa hasta llegar a los 100 MPa de presión de confinamiento.

En los **Gráficos 23, 27, 31, 35 y 39**, se observa contrariamente que en las arenas, la invariabilidad en las velocidades (véase las pendientes), esto corrobora la posible poca porosidad y alta compactación de las muestras. También se observa poca diferencia entre las velocidades de las ondas S_1 y S_2 , lo que demuestra la alta homogeneidad de las muestras.

A diferencia con las muestras horizontales, se puede observar que a pesar de haber poca variación en las velocidades con el cambio del confinamiento, las velocidades de ondas para las muestras verticales fueron menores 1.7 menores a las velocidades de ondas de las muestras horizontales. Este hecho se atribuye a la disposición de los planos de laminación y depositación de las muestras, donde las muestras verticales presentan mayor resistencia al paso de las ondas por presentar planos de depositación horizontal. En promedio para muestras verticales, las velocidades fueron de 3823.44 m/seg para ondas “P”, y de 1955.75 m/seg para ondas “S”.

En los **Gráficos 24, 28, 32, 36y 40** se observa poca variabilidad en el modulo de Young en función de el gran rango de variación de presión confinante, lo que corrobora la baja porosidad de la muestra, esta vez con un valor promedio del módulo de Young de 26.35 GPa.

De igual forma, en los **Gráficos 25, 29, 33, 37y 41** la variación de la relación de Poisson es pequeña para la alta variación de presión confinante, lo que podría indicar poca deformabilidad de la muestra. Esto se atribuye a la baja porosidad o al cierre de los poros por efecto de la presión hidrostática.

En los **Gráficos 26, 30, 34, 38y42**se observa que el modulo de Bulk presenta pequeña variación según la presión confinante, es decir la muestra es poco deformable volumétricamente.

- Discusiones generales de los ensayos acústicos:

Es importante destacar que los valores del cociente de velocidades de ondas “P” y “S”, medidos tanto para muestras horizontales como muestras verticales, permiten verificar la litología de las muestras en estudio. Independientemente de las diferencias entre velocidades en las muestras verticales y horizontales, los cocientes de las velocidades de ondas respectivas se ajustan a la curva teórica de caracterización litológica (*Ec. 68*) y la curva de datos en muestras de diferentes litologías compilados por Pickett estimando, para este caso, que los valores corresponden para el rango de las arcillas, cuyos valores de cocientes de velocidades de onda “P” y “S” están comprendidos entre 1.76 y 1.89 para muestras horizontales y de 1.76 y 2.04 para verticales.

A continuación se muestran los gráficos obtenidos bajo la propuesta del cociente de velocidades al cuadrado (*Ec. 68*):

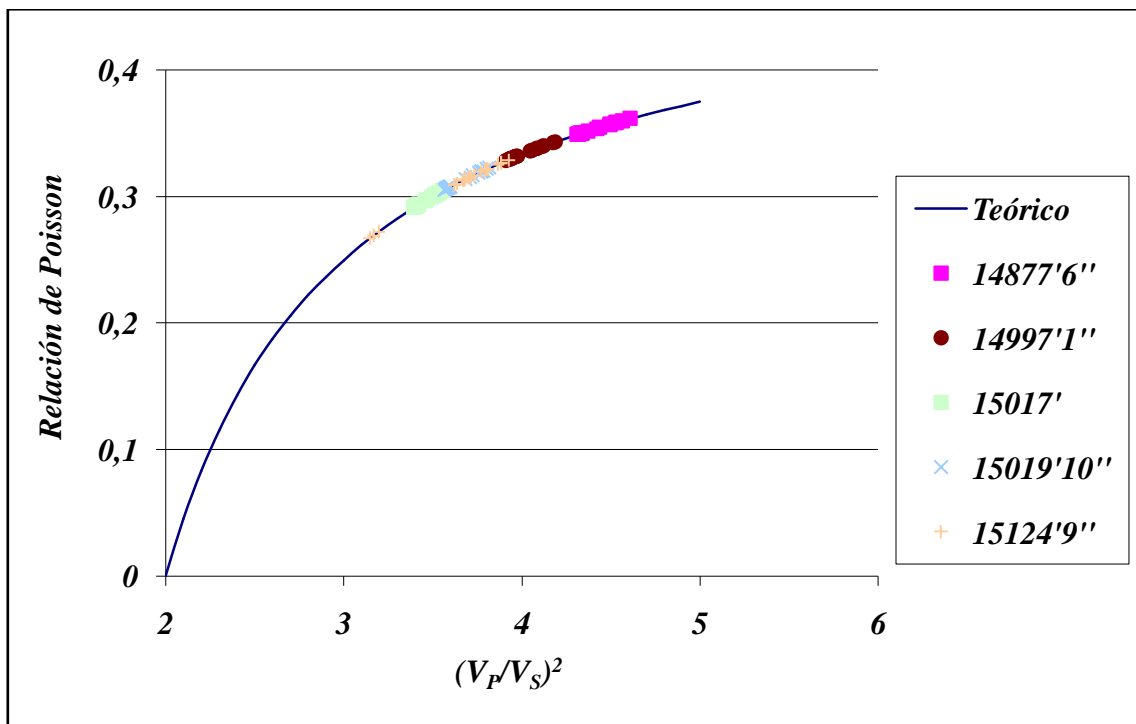


Gráfico 43. Relación de Poisson en función de cociente de velocidades al cuadrado para muestras verticales.

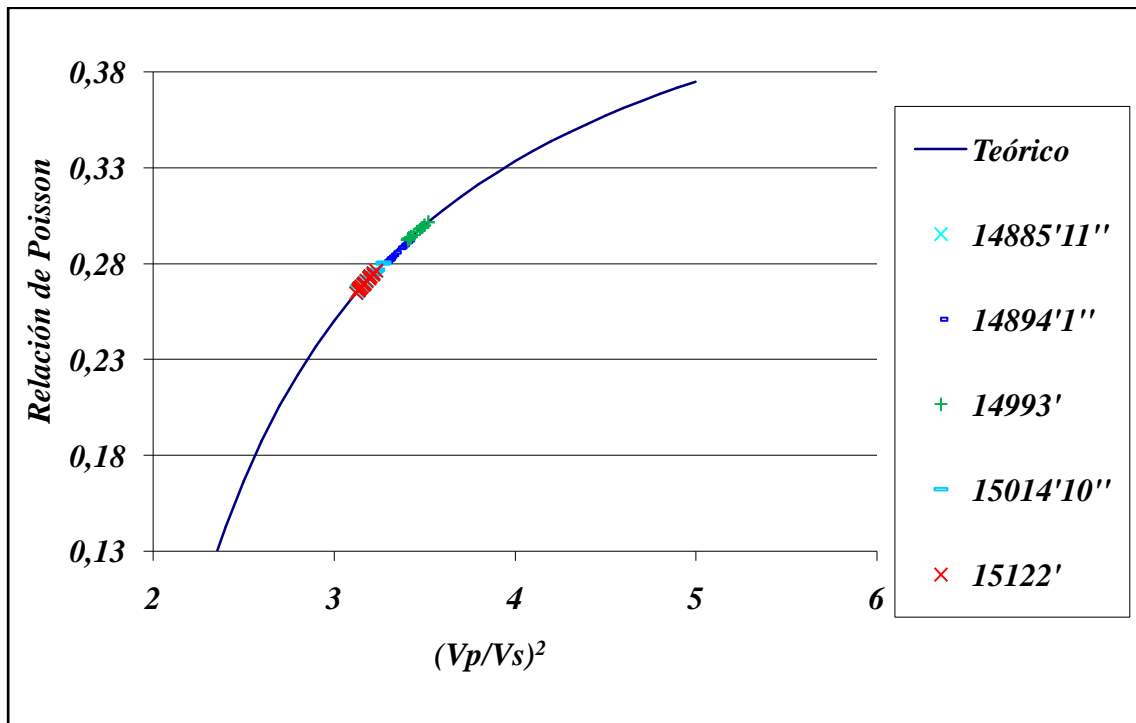


Gráfico 44. Relación de Poisson en función del cociente de velocidades al cuadrado para muestras horizontales.

Seguido de haber hecho los cálculos respectivos de los módulos elásticos y los análisis de anisotropía en muestras horizontales y verticales, se realizó una comparación de las medidas en las muestras en los que se pudo notar la gran diferencia entre los módulos de Young medidos en las muestras horizontales y los medidos en las muestras verticales. Los módulos de Young, en promedio, para muestras horizontales son superiores 1.7 veces a los de la muestras verticales. Estas diferencias entre módulos de Young son debido a la disposición de la laminación de las muestras, donde se aprecia que:

- Para muestras horizontales la disposición de la laminación es vertical, trayendo como consecuencia mayor velocidad en las ondas debido al paralelismo entre la dirección de propagación y los planos de laminación.
- Para muestras verticales la disposición de la laminación es horizontal, trayendo como consecuencia menor velocidad en las ondas debido a que los planos de laminación son perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas.

IV.3 Resultados de Ensayos Triaxiales:

Para estos ensayos tanto la adquisición y procesamiento de los datos fue totalmente distinto a los aplicados en los ensayos acústicos. Estos dependieron en parte de la modalidad utilizada en la fase de saturación y el tipo de enchaquetado empleado para garantizar el fluido de presión de poros.

Para la fase de saturación, algunas muestras se sometieron a presión de confinamiento por espacio de 64800 segundos (18 horas) para luego ser sometidas al respectivo cizallamiento de las mismas por espacios de tiempo comprendidos entre 1.5 a 2.5 horas. Otras muestras, por inconvenientes presentado durante los momentos de ensayo como pérdidas del sistema eléctrico, fueron sometidas a ensayos hidrostáticos por espacios comprendidos entre 2 a 2.5 horas.

A continuación se presenta el reporte de la información introducida al equipo y el resumen de operaciones ejecutadas para la obtención de los módulos elásticos. Para mayor información referirse a los datos procesados en la base de datos suministrada como anexo a este tomo.

Tabla 10. Valores de dimensiones, orientación y densidades de las muestras sometidas a ensayo triaxial.

Profundidad (pies)	H/V	Masa±0.01 (gr.)	Diámetro±0.01 (mm.)	Longitud±0.01 (mm.)	Densidad (gr./cm ³)		L/D
					ρ	$\pm \Delta\rho$	
14885'11''	H	68.49	25.33	52.33	2.600	± 0.003	2.07
14993'	H	66.95	25.35	51.49	2.580	± 0.003	2.03
14996'11''	H	69.77	25.35	53.14	2.600	± 0.003	2.10
15014'1''	H	68.58	25.35	52.39	2.590	± 0.003	2.07
15127'9''	H	68.68	25.35	51.88	2.620	± 0.003	2.05
14879'11''	V	76.87	25.36	58.61	2.600	± 0.003	2.31
14883'2''	V	67.59	25.33	52.04	2.580	± 0.003	2.05
14898'9''	V	78.94	25.35	60.16	2.600	± 0.003	2.37
14996'	V	82.58	25.35	62.55	2.620	± 0.003	2.47
15121'7''	V	76.43	25.35	58.37	2.590	± 0.003	2.30

IV.3.1 TOM25 - 14885'11''H:

- **Acondicionamiento de la muestra:**

Enchafetado con tela absorbente de guata y reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ *Saturación* por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso de presión confinante (*método de los Estados Transitorios*) por 18 horas, con tasa de 0.000463 MPa/seg., y amplitud de 6 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 5.84$ MPa, $P_{p_0} = 0.40$ MPa, $P_{pint_hg_0} = 0.10$ MPa.
- ✓ *Fracturamiento* por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 2.5 horas con tasa de 0.0016667 MPa/seg y amplitud de 15 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 3.22$ MPa, $P_{p_0} = 0.37$ MPa, $P_{pint_hg_0} = 0.05$ MPa, $P_{a_0} = 0.79$ MPa.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ *En la fase de saturación:*

Tabla 11. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación de la muestra 14885'11''H del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	B (med.)	B_{int.} (med.)
1	0.980	0.961
2	0.865	0.859
3	0.884	0.878
4	0.960	0.954

- ✓ *En la fase de fracturamiento:*

Tabla 12. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14885'11''H del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
A_{entrada}	A_{salida}	E_{medio} (GPa)	E_{tangente} (GPa)	E_{secante} (GPa)	v_{medio}	v_{tangente}	PA_{máx.} (MPa)
-0.035	-0.017	8.075	7.285	3.390	0.101	0.079	21.758

- **Gráficos:**
- ✓ *En la fase de saturación:*

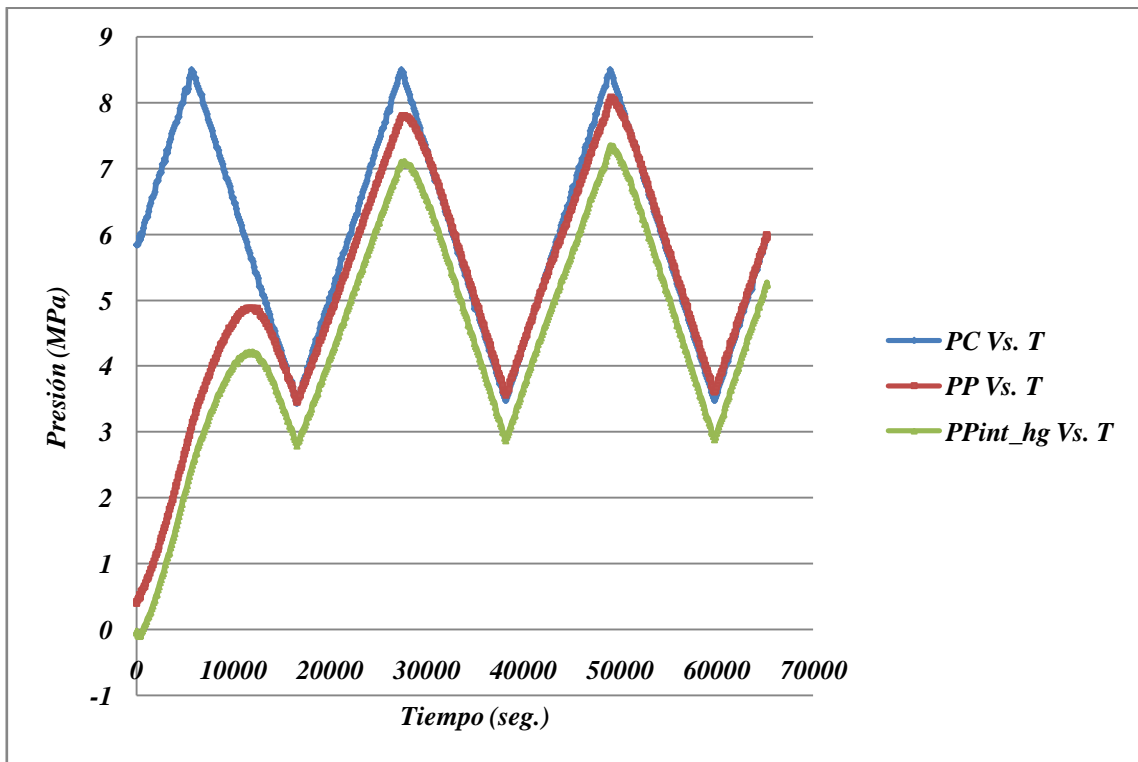


Gráfico 45. Variación de Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática.

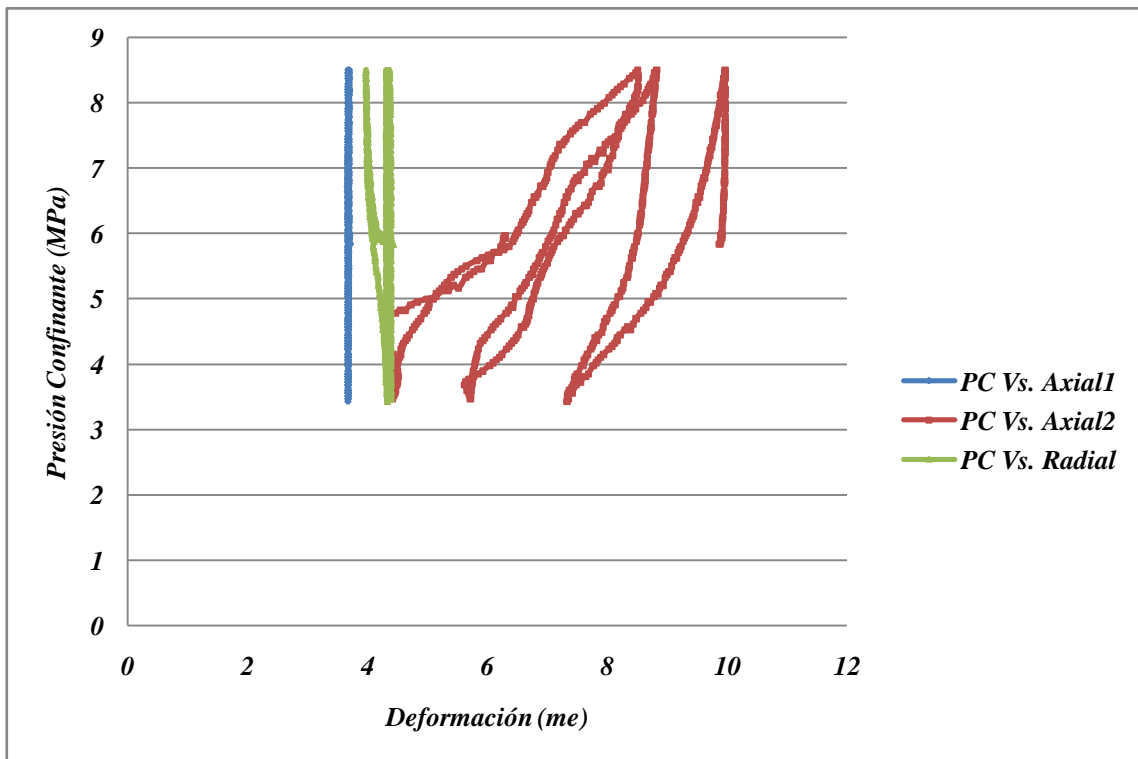


Gráfico 46. Variación de la Presión Confinante en función de la Deformación en la fase hidrostática.

✓ En la fase de fracturamiento:

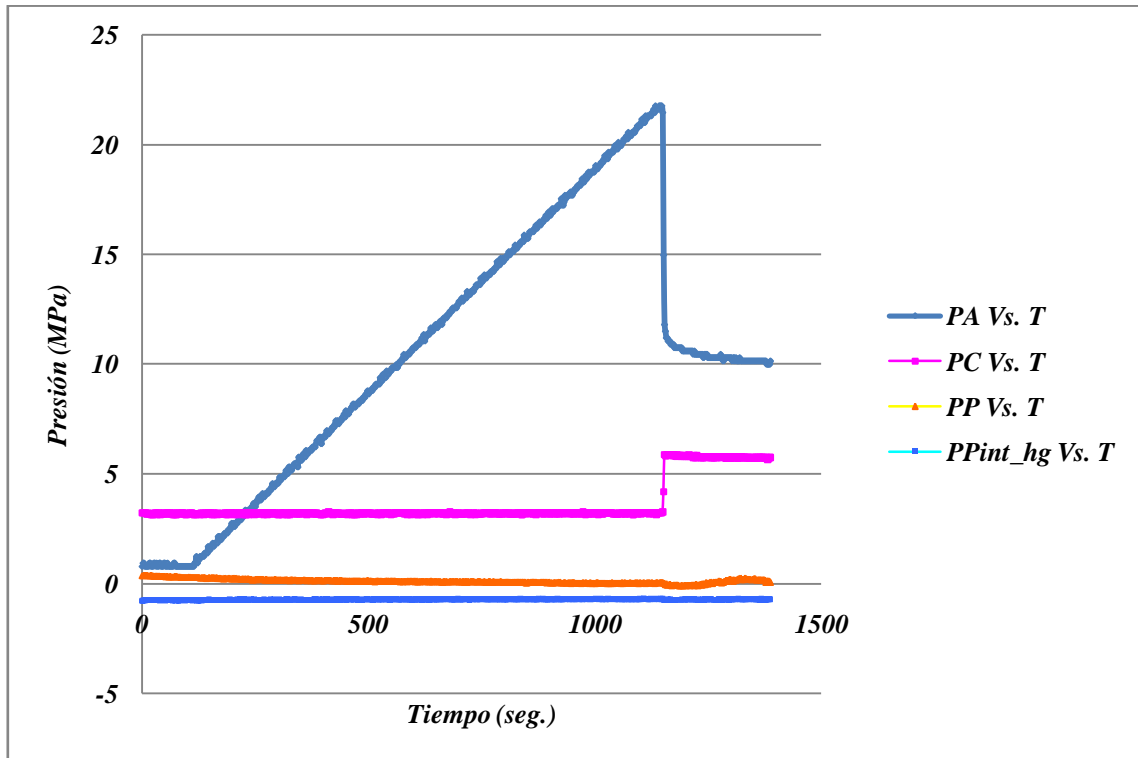


Gráfico 47. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

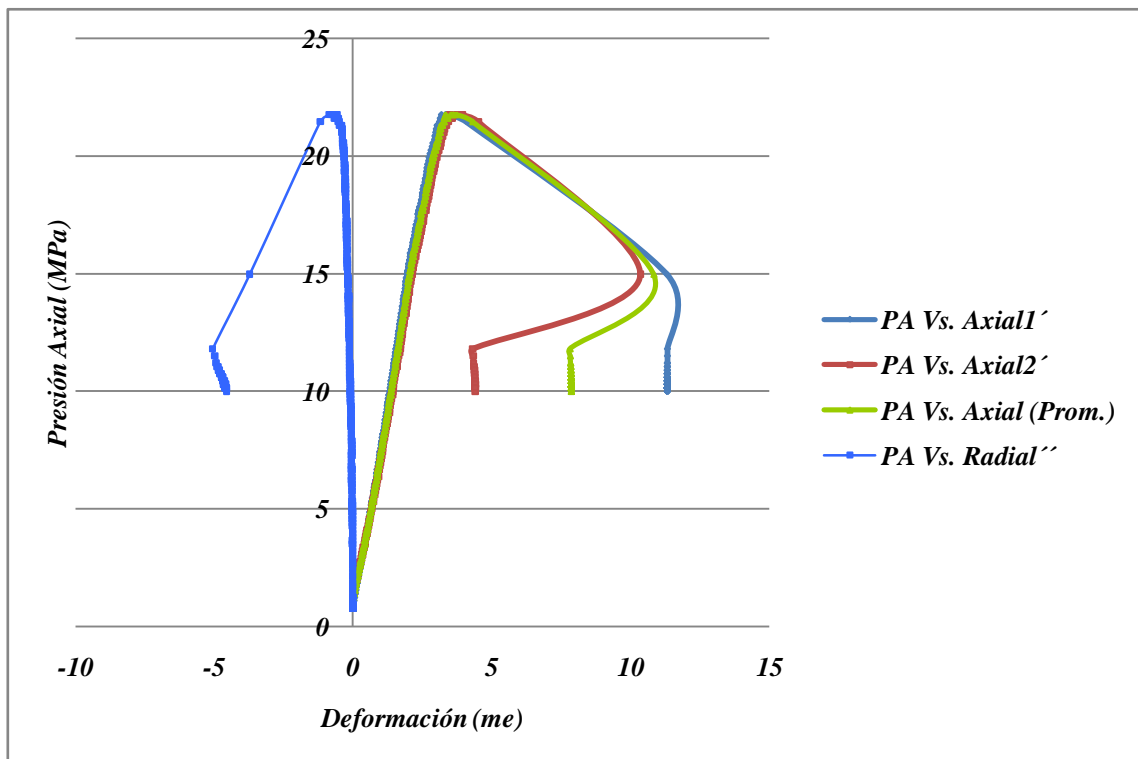


Gráfico 48. Curva de Esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.2 TOM25 - 14993 'H:

- **Acondicionamiento de la muestra:**

Enchaquetado con tela absorbente de guata para ensayo hidrostático por rampas escalonadas (*método Tradicional*) y enchaquetado con papel de filtro tipo Whatman para ensayo hidrostático por ciclos (*método de los Estados Transitorios*) y fracturamiento. Enchaquetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ *Saturación₁* por medio de ensayo hidrostático no drenado por rampas de incrementos con descanso (*método Tradicional*) de presión confinante por 18 horas. Los descansos fueron establecidos después de los 3, 6 y 9 MPa de presión confinante respectivamente. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 1.02 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 0.25 \text{ MPa}$, $P_{\text{pint_hg}_0} = 0.00 \text{ MPa}$.
- ✓ *Saturación₂* por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso de presión confinante (*método de los Estados Transitorios*) por 18 horas, con rata de $0.0005556 \text{ MPa/seg.}$, y amplitud de 6 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 4.87 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 1.8 \text{ MPa}$, $P_{\text{pint_hg}_0} = 0.0 \text{ MPa}$.
- ✓ *Fracturamiento* por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 3.5 horas con rata de $0.0011905 \text{ MPa/seg.}$, y amplitud de 15 MPa en 0 ciclos. Para otras 3.5 horas se siguió aplicando presión axial con rata de $0.0007937 \text{ MPa/seg.}$, y amplitud de 10 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 4.74 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 1.29 \text{ MPa}$, $P_{\text{pint_hg}_0} = 0.00 \text{ MPa}$, $P_{a_0} = 1.09 \text{ MPa}$.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ *En la fase de saturación₁:*

Tabla 13. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación₁ de la muestra 14993 'H del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	B (med.)	B_{int.} (med.)
1	0.405	0.398
2	0.726	0.737
3	0.457	0.463

- ✓ *En la fase de cizallamiento:*

Tabla 14. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14993 'H del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
A_{entrada}	A_{salida}	E_{medio} (GPa)	E_{tangente} (GPa)	E_{secante} (GPa)	v_{medio}	v_{tangente}	PA_{máx.} (MPa)
-0.155	0.001	9.976	14.796	5.202	0.117	0.087	25.227

- **Gráficos:**
- ✓ *En la fase de saturación₁:*

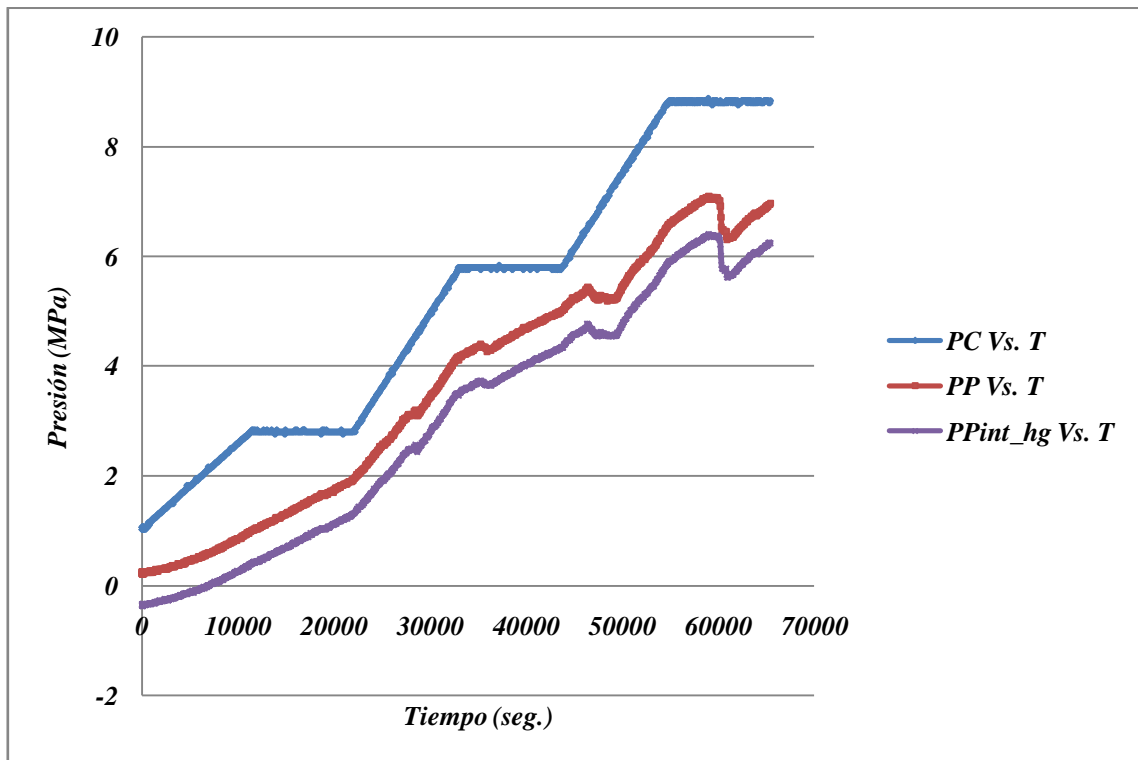


Gráfico 49. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₁.

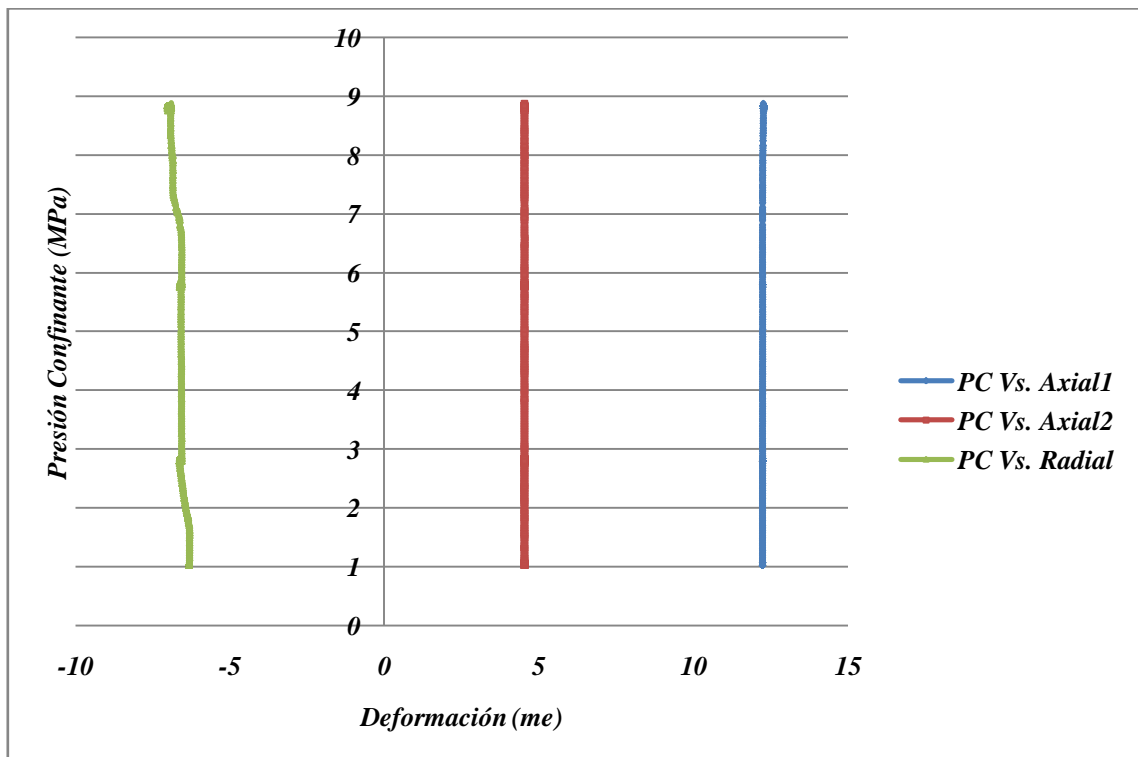


Gráfico 50. Variación de la Presión Confinante en función de la Deformación en la fase hidrostática₁.

✓ En la fase de saturación₂:

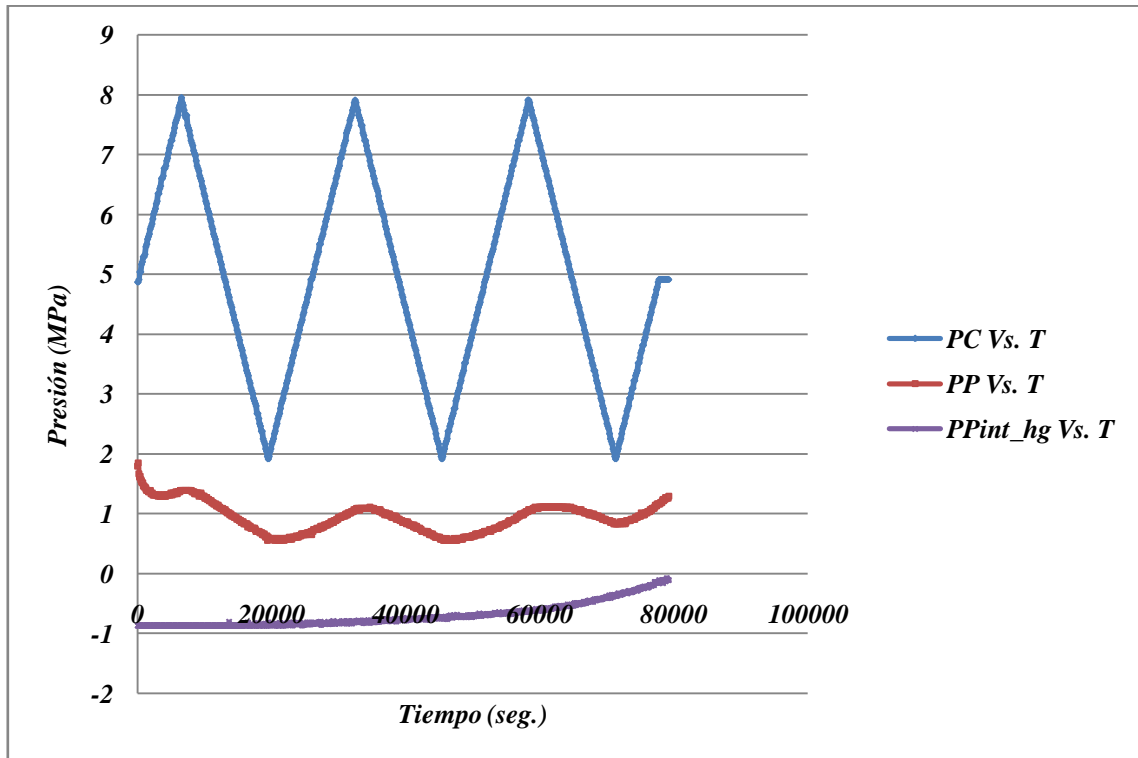


Gráfico 51. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂.

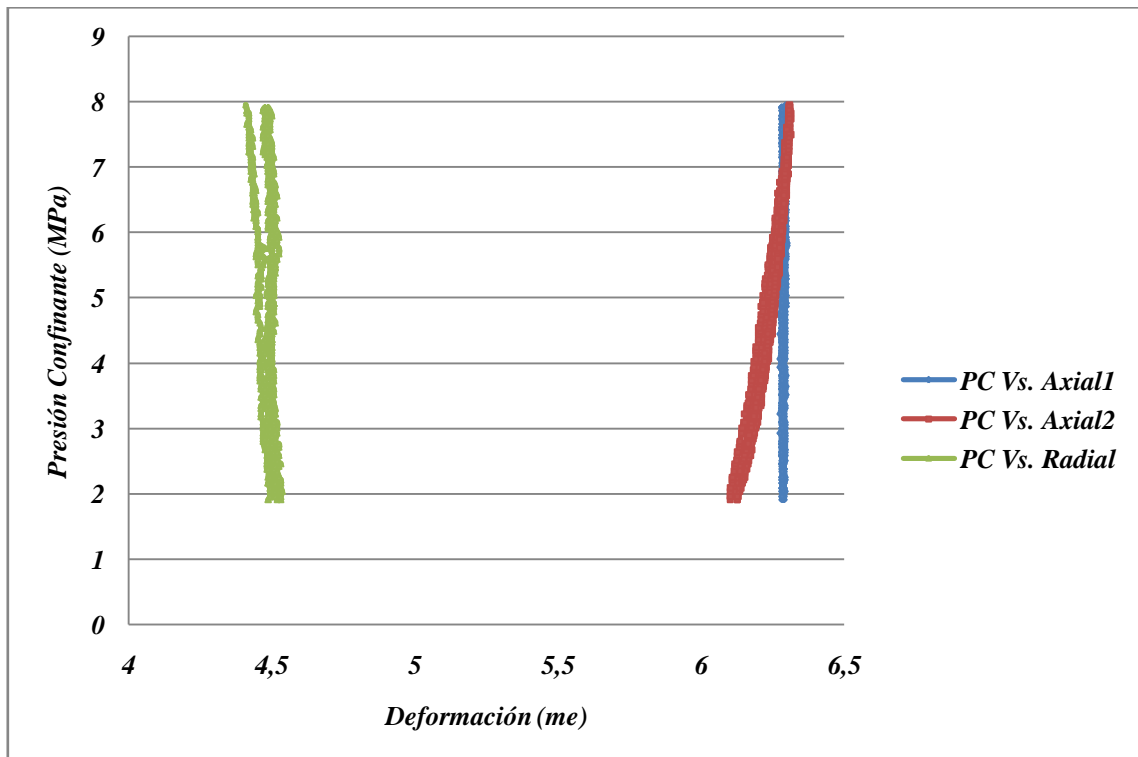


Gráfico 52. Variación de la Presión Confinante en función de la Deformación en la fase hidrostática₂.

✓ En la fase de fracturamiento:

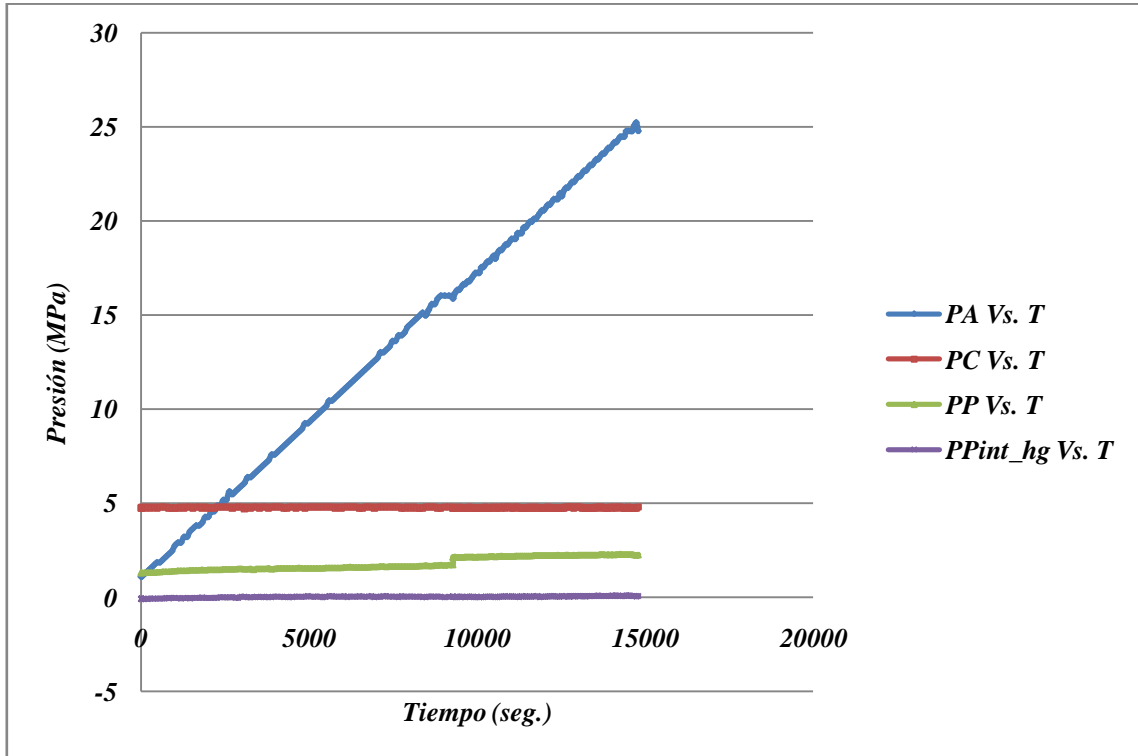


Gráfico 53. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

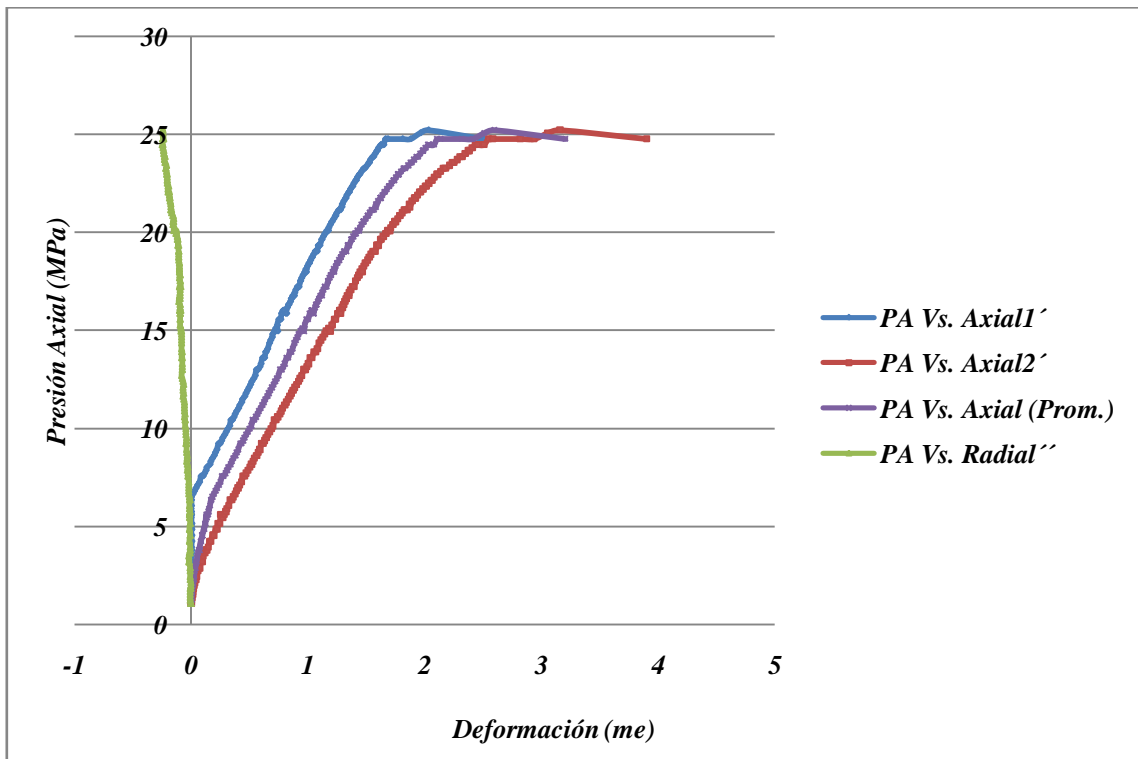


Gráfico 54. Curva de esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.3 TOM25 - 14996'11''H:

- **Instrumentación de la muestra:**

Enchafetado con tela absorbente de fieltro para los ensayos hidrostáticos por rampas escalonadas (*método Tradicional*), ensayo hidrostático por ciclos (*método de los Estados Transitorios*) y fracturamiento. Enchafetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ *Saturación₁* por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso de presión confinante (*método de Estados Transitorios*) por 1 hora, con rata de 0.01 MPa/seg., y amplitud de 6 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 6.56 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 1.29 \text{ MPa}$, $P_{pint_hg_0} = 0.51 \text{ MPa}$.
- ✓ *Saturación₂* por medio de ensayo hidrostático no drenado por rampas de incrementos con descanso de presión confinante (*método Tradicional*) por 2.5 horas. Los descansos fueron establecidos después de los 10, 13, 17 y 10 MPa de presión confinante respectivamente. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 6.60 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 1.49 \text{ MPa}$, $P_{pint_hg_0} = 0.81 \text{ MPa}$.
- ✓ *Fracturamiento* por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 2 horas con rata de 0.00625 MPa/seg., y amplitud de 45 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 10.06 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 1.90 \text{ MPa}$, $P_{pint_hg_0} = 1.20 \text{ MPa}$, $P_{a_0} = 0.64 \text{ MPa}$.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ *En la fase de saturación₂:*

Tabla 15. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación₂ de la muestra 14996'11''H del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	B (med.)	B_{int.} (med.)
1	0.044	0.046
2	0.115	0.114
3	0.109	0.109

- ✓ *En la fase de fracturamiento:*

Tabla 16. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14996'11''H del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
A_{entrada}	A_{salida}	E_{medio} (GPa)	E_{tangente} (GPa)	E_{secante} (GPa)	v_{medio}	v_{tangente}	PA_{máx.} (MPa)
-0.077	-0.083	4.157	5.018	1.633	0.050	0.059	21.705

- **Gráficos:**
- ✓ *En la fase de saturación₁:*

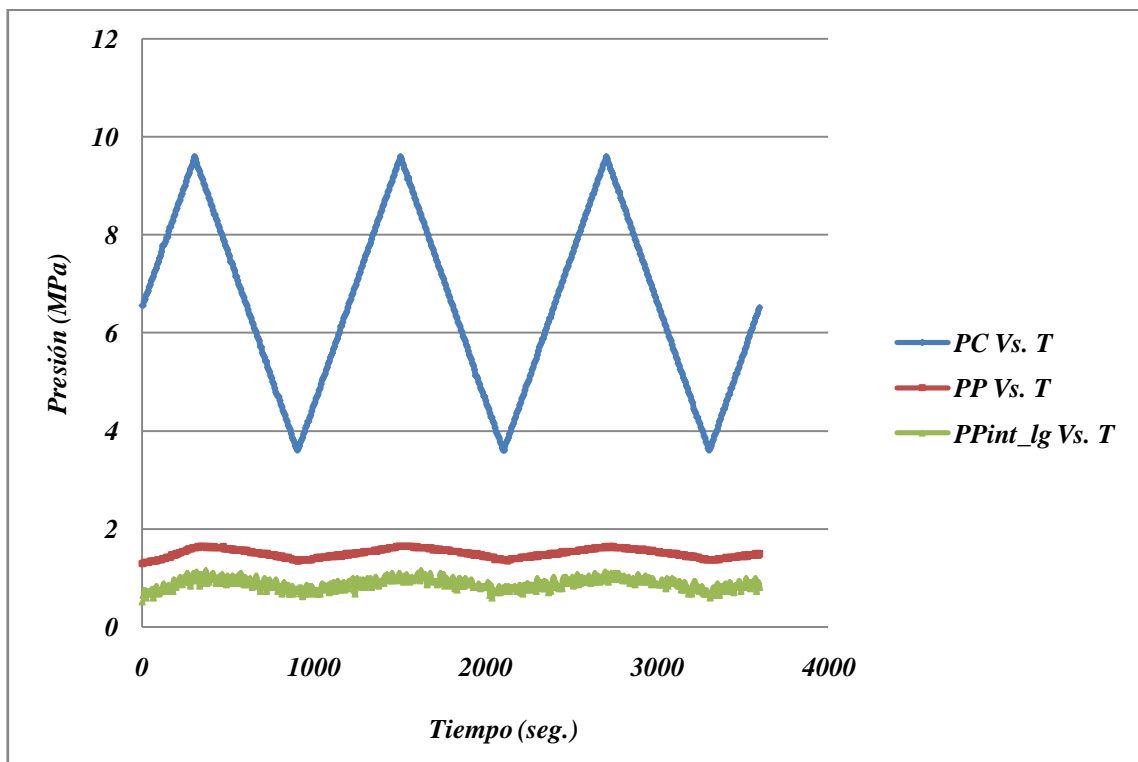


Gráfico 55. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₁.

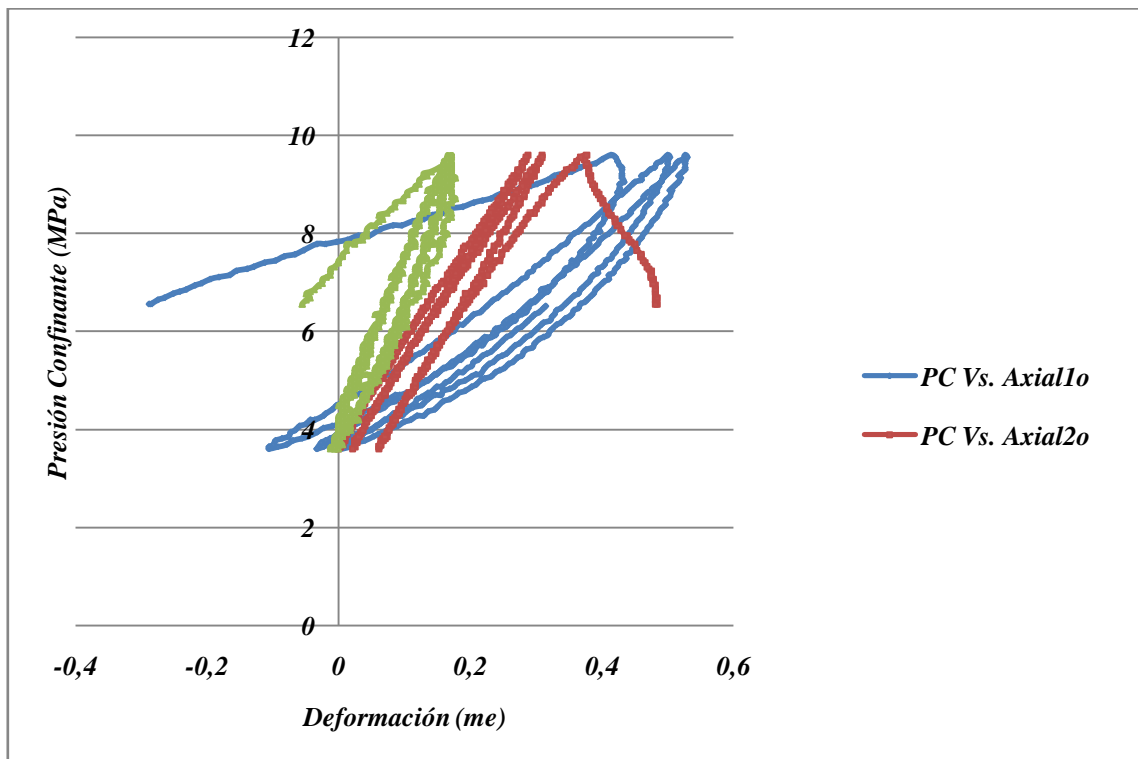


Gráfico 56. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₁.

✓ En la fase de saturación₂:

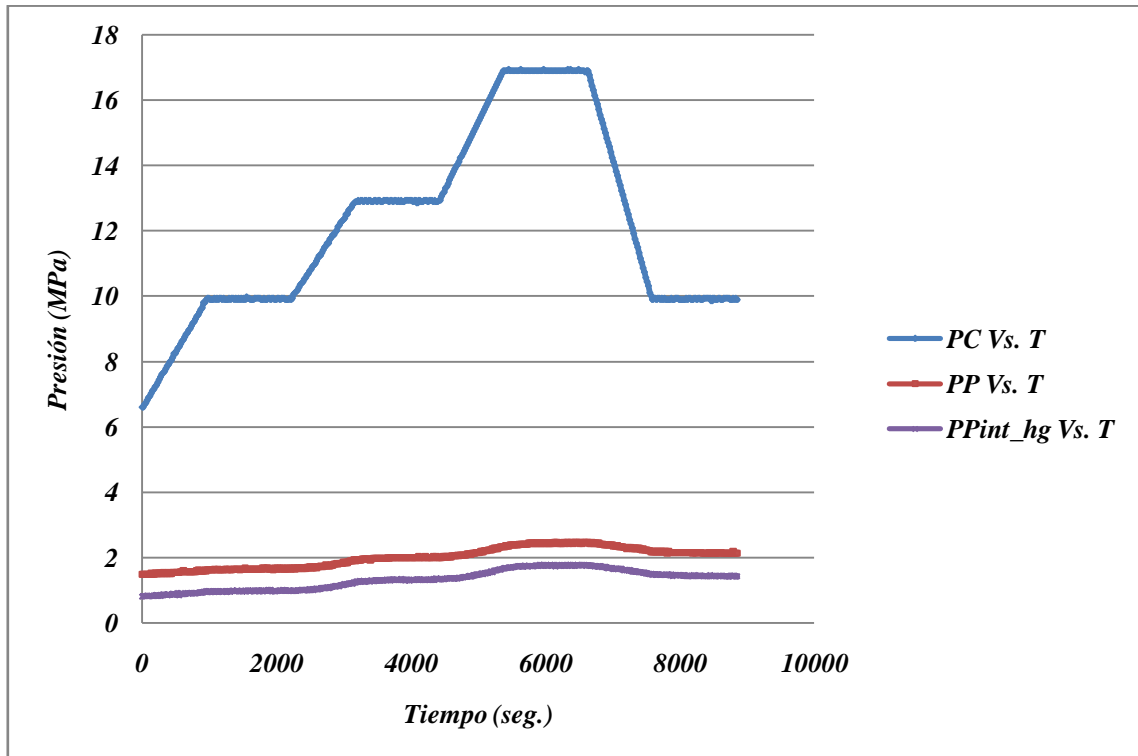


Gráfico 57. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂.

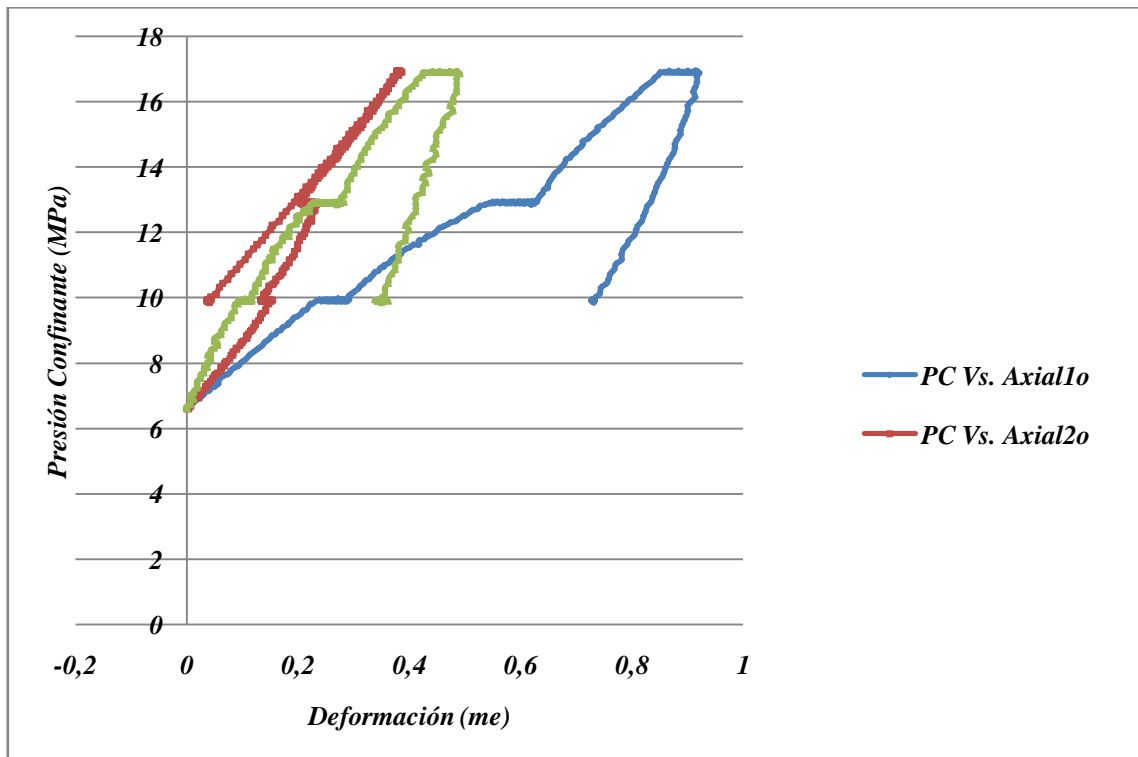


Gráfico 58. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₂.

✓ En la fase de fracturamiento:

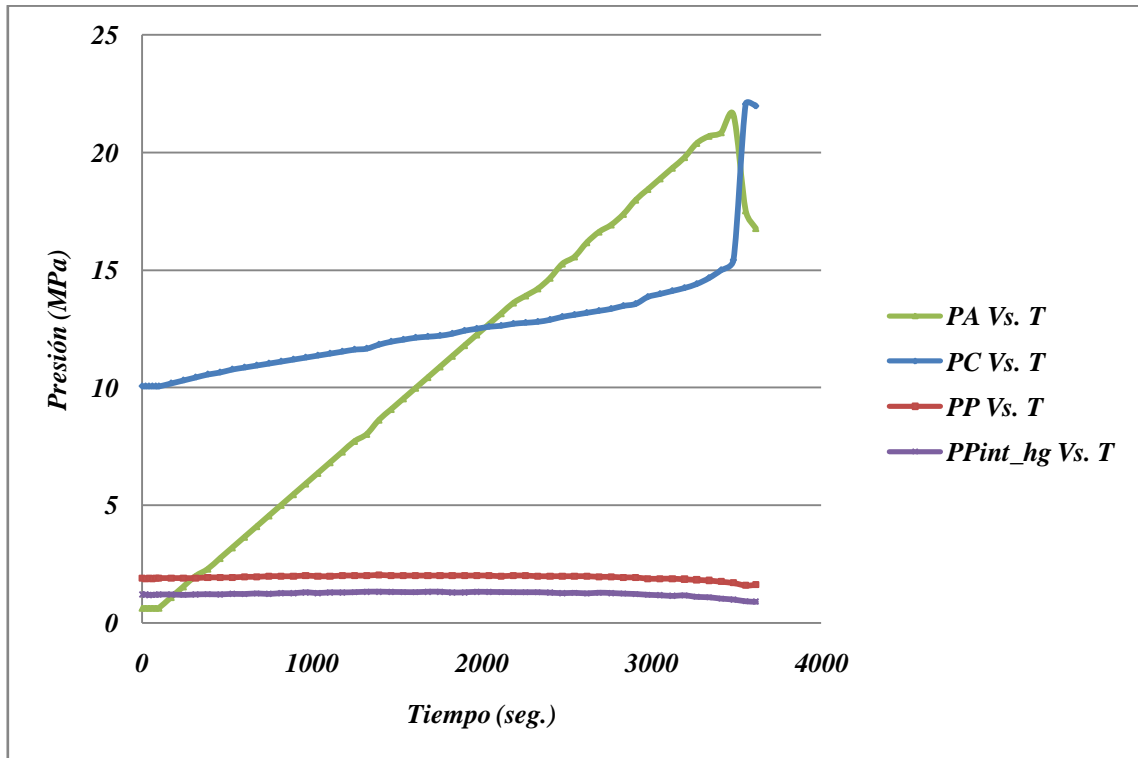


Gráfico 59. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

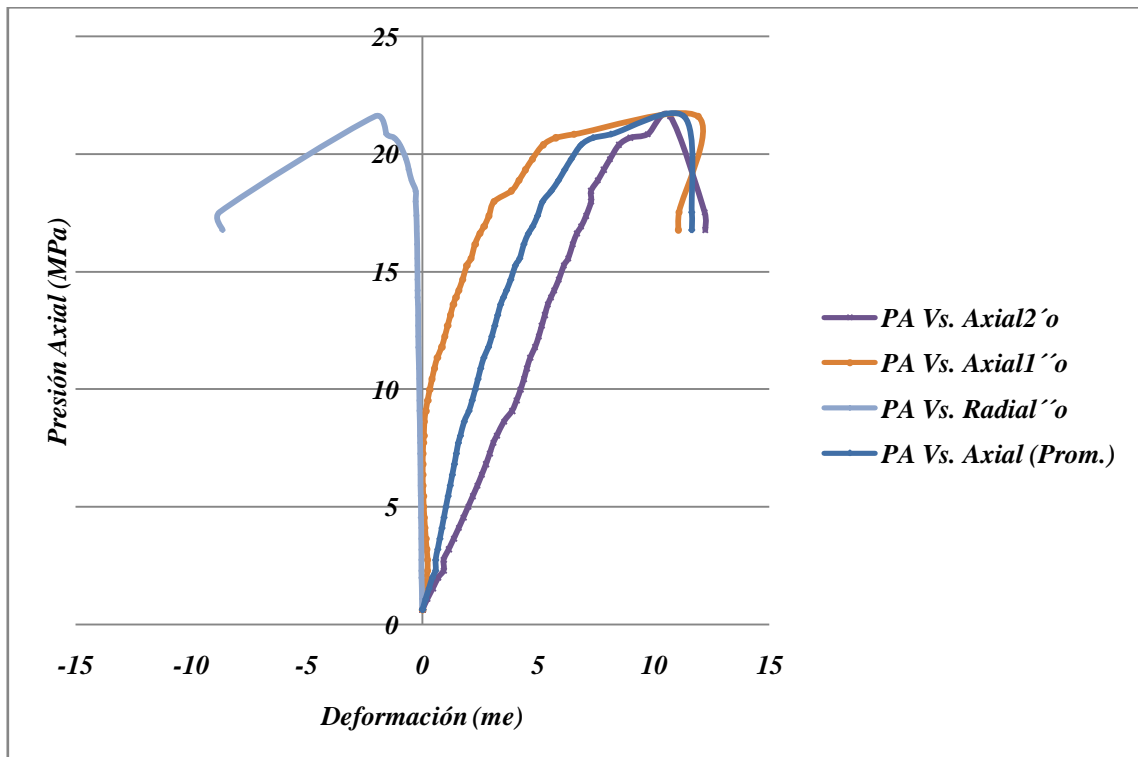


Gráfico 60. Curva de esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.4 TOM25 - 15014'10''H:

- **Instrumentación de la muestra:**

Enchquetado con tela absorbente de fieltro para los ensayos hidrostático por rampas escalonadas (*método Tradicional*), ensayo hidrostático por ciclos (*método de los Estados Transitorios*) y fracturamiento. Enchquetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ *Saturación₁* por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso de presión confinante (*método de los Estados Transitorios*) por 2 horas, con rata de 0.005 MPa/seg., y amplitud de 6 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 5.80\text{MPa}$, $P_{p_0} = 1.39\text{MPa}$, $P_{pint_hg_0} = 0.63\text{MPa}$.
- ✓ *Saturación₂* por medio de ensayo hidrostático no drenado por rampas de incrementos con descanso de presión confinante (*método Tradicional*) por 2 horas. Los descansos fueron establecidos después de los 9, 12, 15 y 9 MPa de presión confinante respectivamente. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 5.97\text{MPa}$, $P_{p_0} = 1.82\text{MPa}$, $P_{pint_hg_0} = 1.07\text{MPa}$.
- ✓ *Fracturamiento* por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 1.9 horas con rata de 0.005 MPa/seg., y amplitud de 35 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 8.88\text{MPa}$, $P_{p_0} = 3.33\text{MPa}$, $P_{pint_hg_0} = 2.53\text{MPa}$, $P_{a_0} = 0.19\text{MPa}$.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ *En la fase de saturación:*

Tabla 17. Parámetro *B* de Skempton en la fase de saturación₁ de la muestra 15014'10''H del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	<i>B</i> (med.)	<i>B_{int.}</i> (med.)
1	0,265	0,278
2	0,122	0,120
3	0,117	0,118
4	0,118	0,116

- ✓ *En la fase de fracturamiento:*

Tabla 18. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 15014'10''H del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
<i>A_{entrada}</i>	<i>A_{salida}</i>	<i>E_{medio}</i> (GPa)	<i>E_{tangente}</i> (GPa)	<i>E_{secante}</i> (GPa)	<i>v_{medio}</i>	<i>v_{tangente}</i>	<i>PA_{máx.}</i> (MPa)
-0,077	-0,083	7,586	8,838	2,590	0,073	0,064	29,902

- **Gráficas:**
- ✓ *En la fase de saturación₁:*

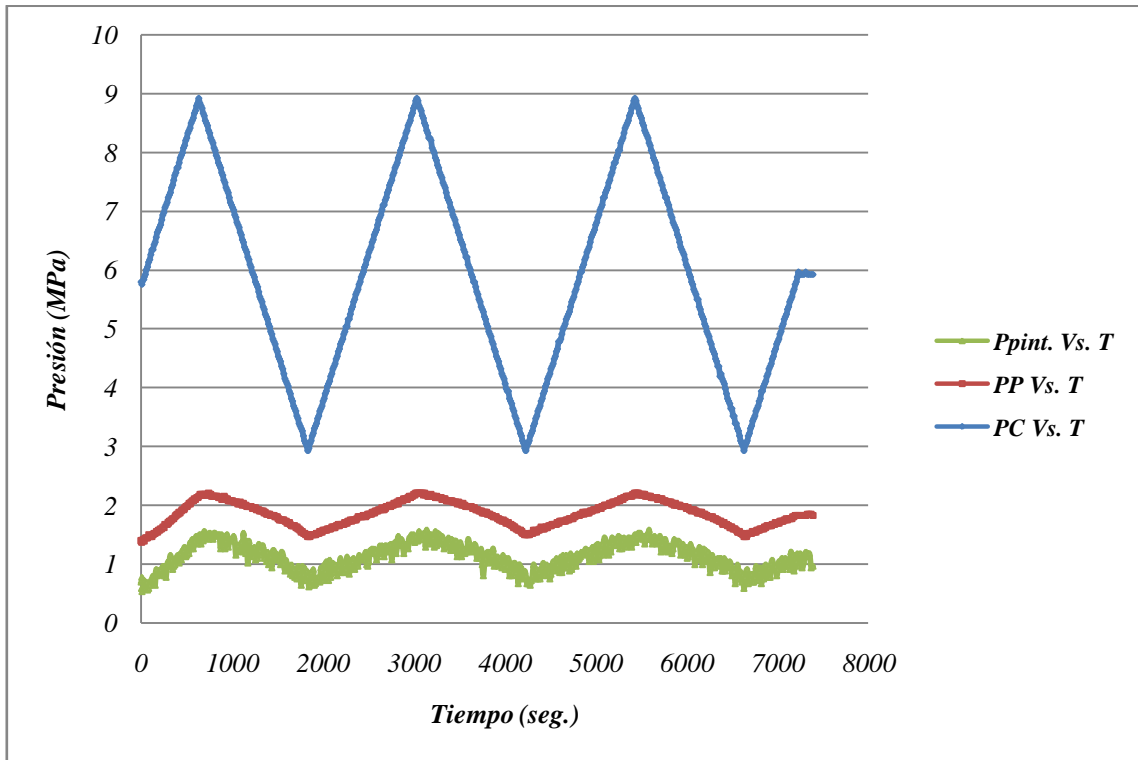


Gráfico 61. Variación de la Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₁.

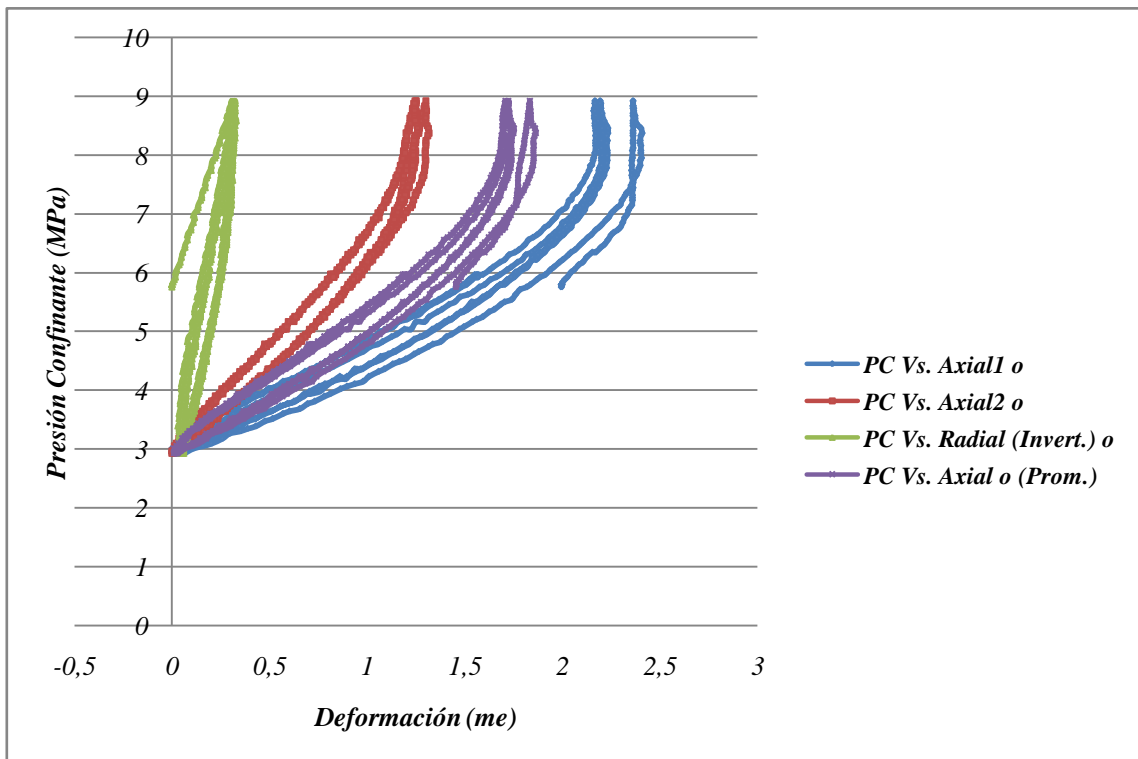


Gráfico 62. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₁.

✓ En la fase de saturación₂:

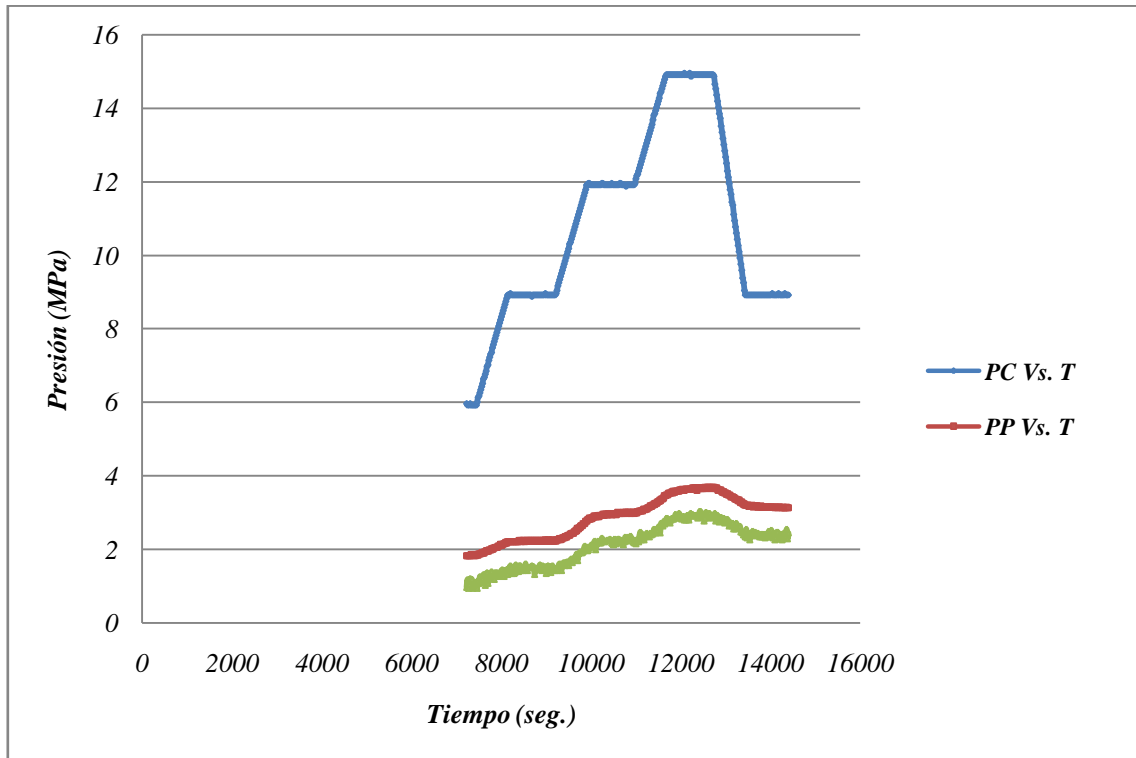


Gráfico 63. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂.

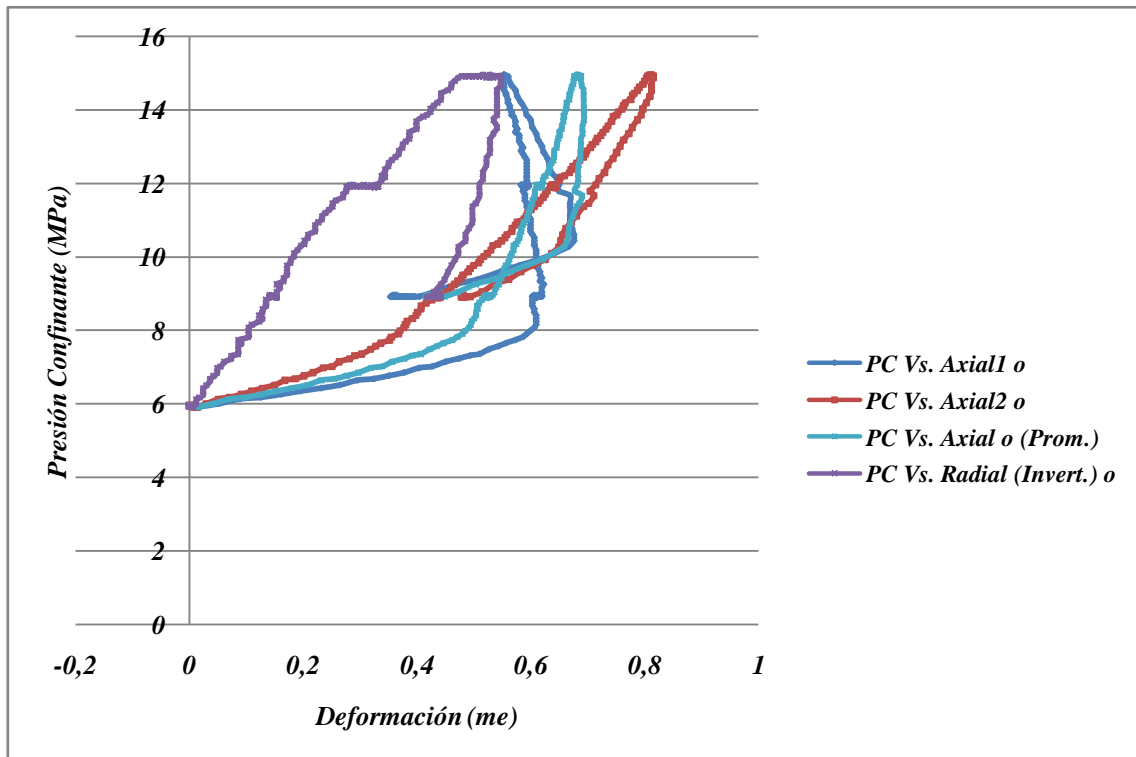


Gráfico 64. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₂.

✓ En la fase de fracturamiento:

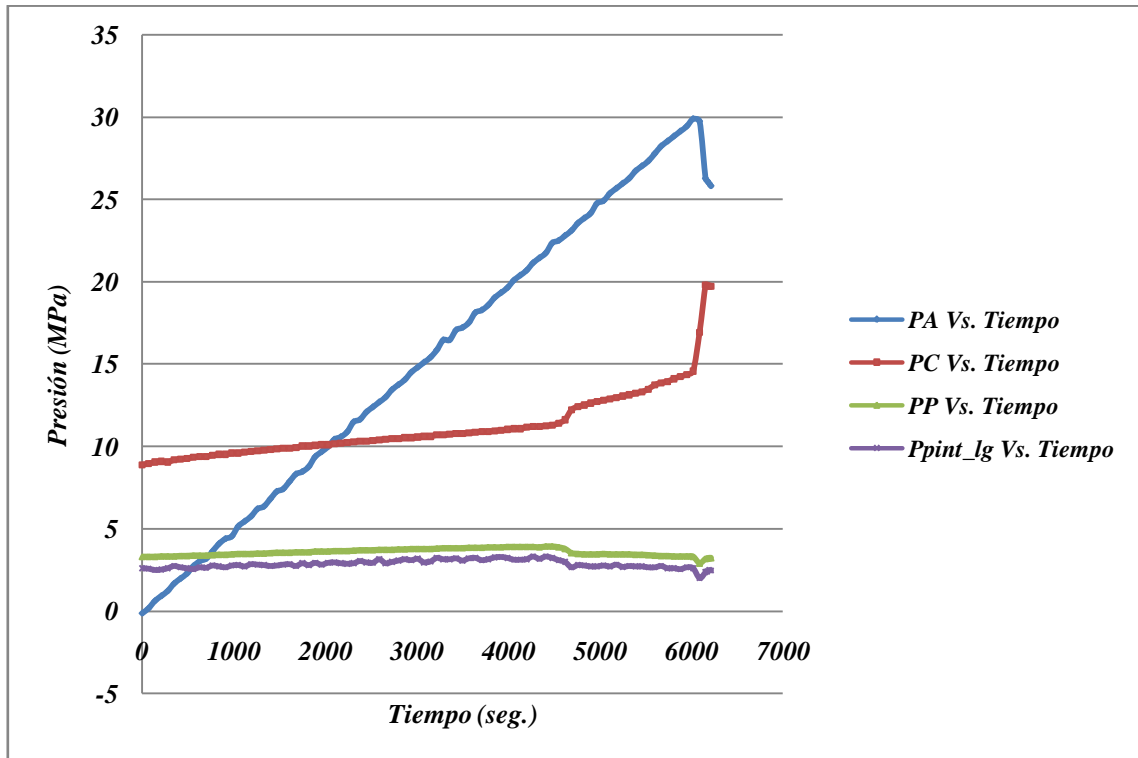


Gráfico 65. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

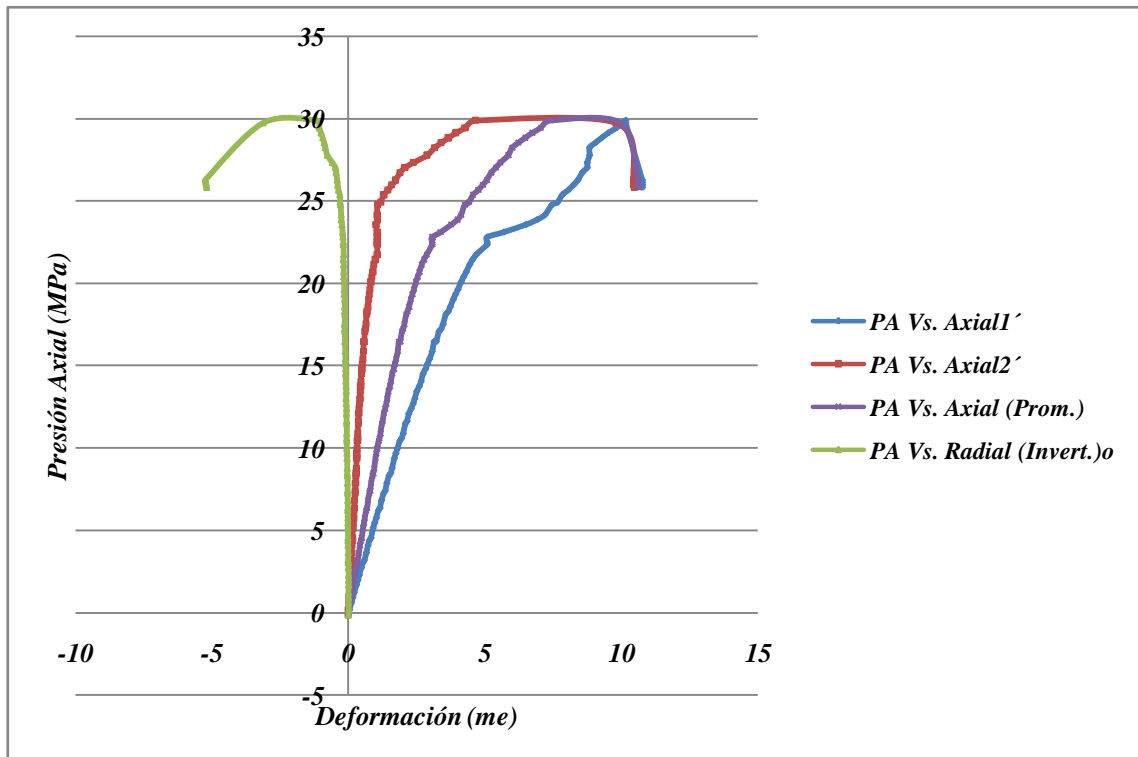


Gráfico 66. Curva de Esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.5 TOM25 - 15127'9''H:

- **Instrumentación de la muestra:**

Enchquetado con tela absorbente de fieltro para los ensayos hidrostático por rampas escalonadas (*método Tradicional*), ensayo hidrostático por ciclos (*método de los Estados Transitorios*) y fracturamiento. Enchquetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ *Saturación₁* por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso de presión confinante (*método de los Estados Transitorios*) por 2 horas, con rata de 0.0041667 MPa/seg., y amplitud de 5 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0}= 4.91$ MPa, $P_{p_0}= 1.24$ MPa, $P_{pint_hg_0}= 0.56$ MPa.
- ✓ *Saturación₂* por medio de ensayo hidrostático no drenado por rampas de incrementos con descanso de presión confinante (*método Tradicional*) por 2 horas. Los descansos fueron establecidos después de los 8, 11, 14 y 17 MPa de presión confinante respectivamente. Condiciones iniciales: $P_{c_0}= 4.95$ MPa, $P_{p_0}= 0.78$ MPa, $P_{pint_hg_0}= 0.00$ MPa.
- ✓ *Fracturamiento* por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 1.5 horas con rata de 0.0092593 MPa/seg., y amplitud de 50 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0}= 16.95$ MPa, $P_{p_0}= 3.10$ MPa, $P_{pint_hg_0}= 0.00$ MPa, $P_{a_0}= 0.64$ MPa.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ *En la fase de saturación:*

Tabla 19. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación₁ de la muestra 15127'9''H del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	B (med.)	B_{int.} (med.)
1	0.079	0.103
2	0.041	0.046
3	0.037	0.043
4	0.037	0.051

- ✓ *En la fase de fracturamiento:*

Tabla 20. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 15127'9''H del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
A_{entrada} (No Valido)	A_{salida} (No Valido)	E_{medio} (GPa)	E_{tangente} (GPa)	E_{secante} (GPa)	v_{medio}	v_{tangente}	PA_{máx.} (MPa)
-1,251	0,528	9,606	9,946	3,898	0,144	0,117	25,528

- **Gráficas:**
- ✓ *En la fase de saturación1:*

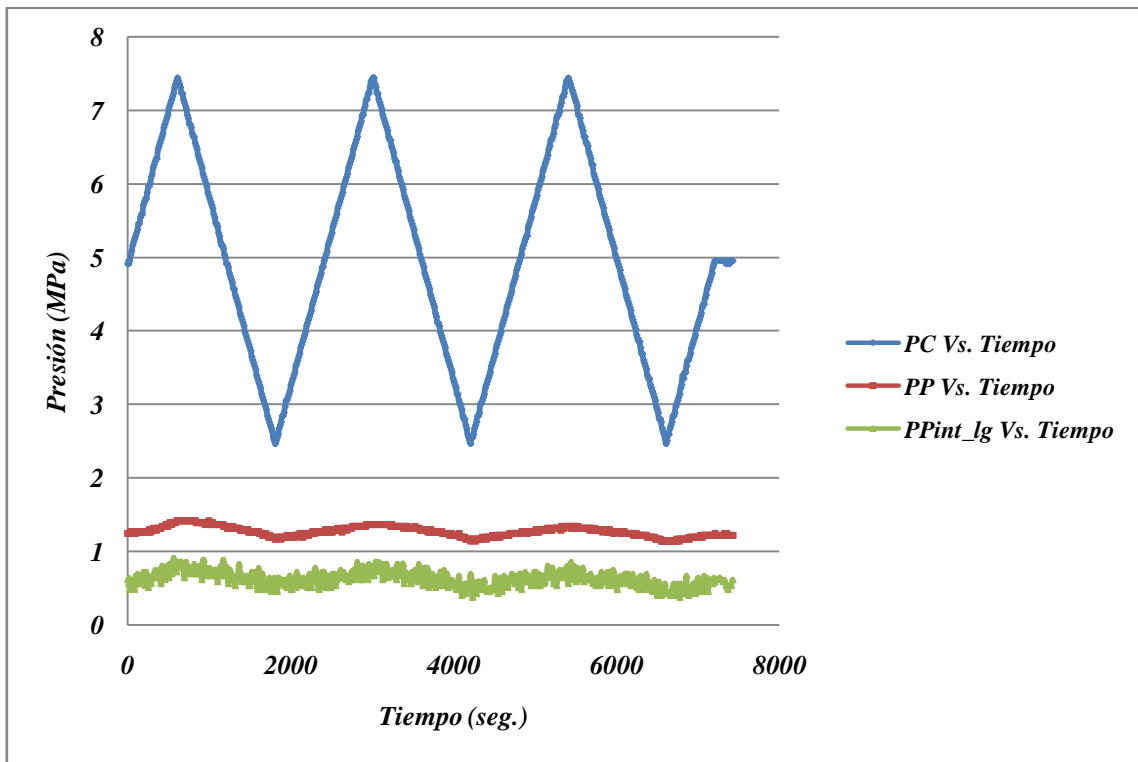


Gráfico 67. Variación de las Presiones en función de. Tiempo en la fase hidrostática₁.

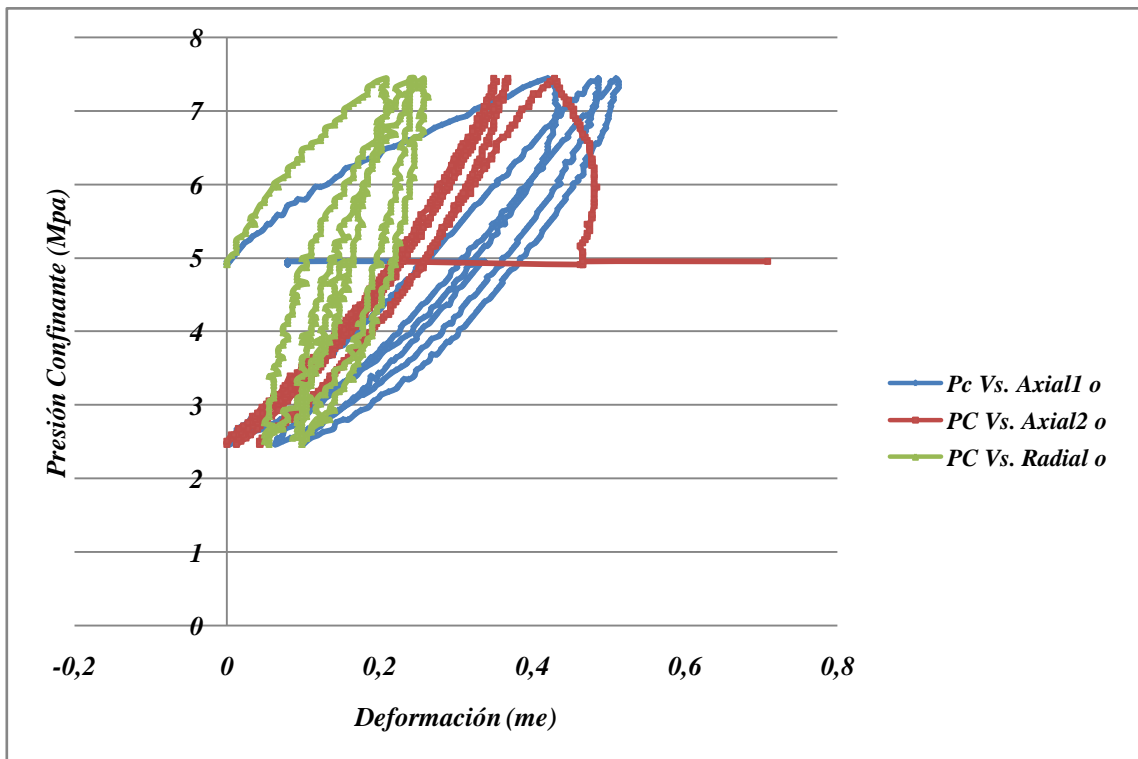


Gráfico 68. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₁.

✓ En la fase de saturación2:

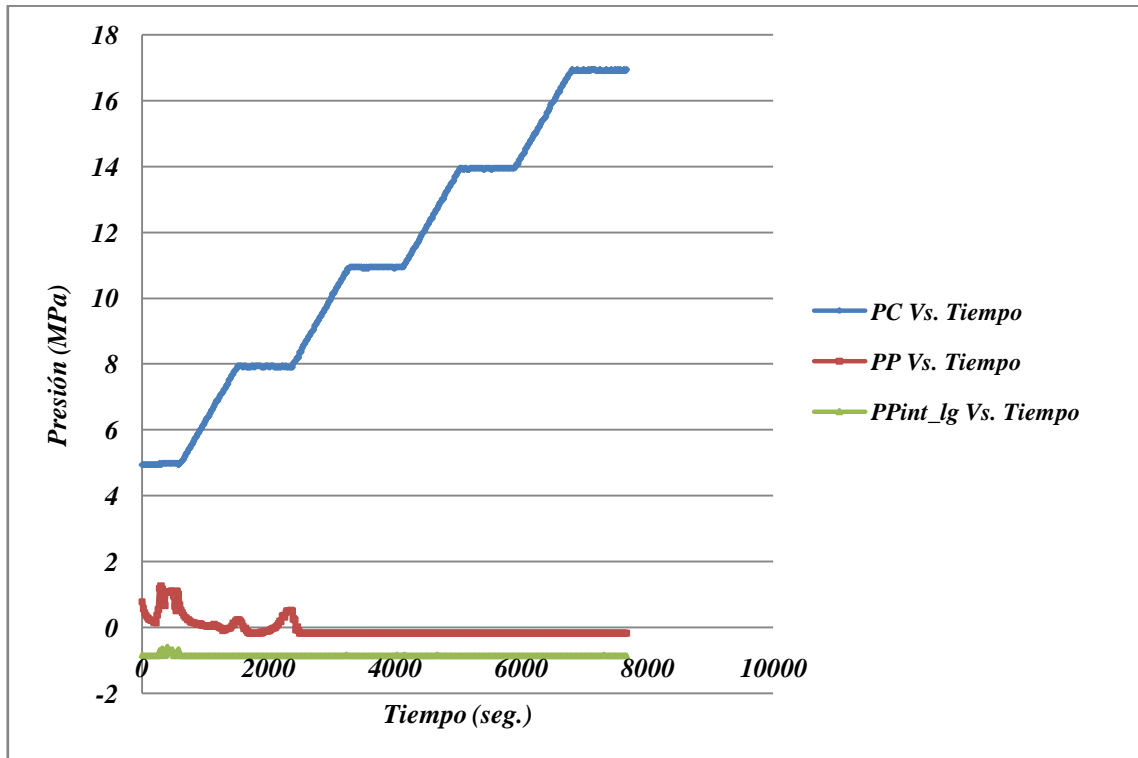


Gráfico 69. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática2.

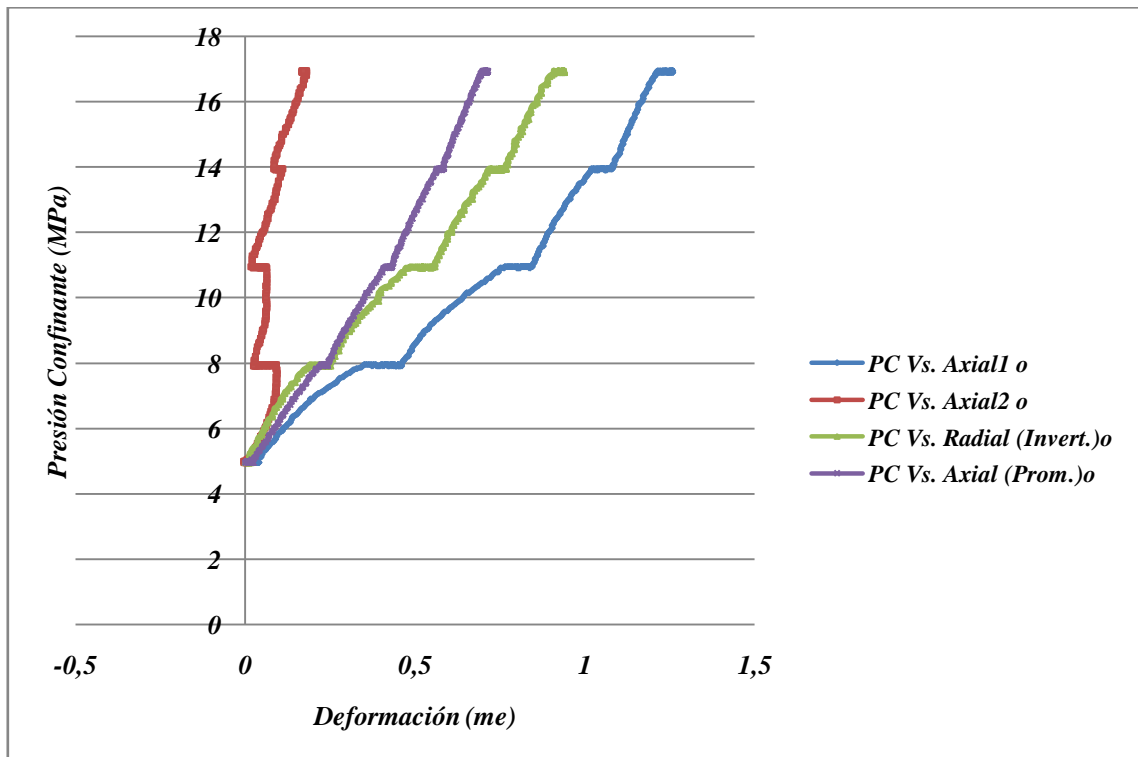


Gráfico 70. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática2.

✓ En la fase de fracturamiento:

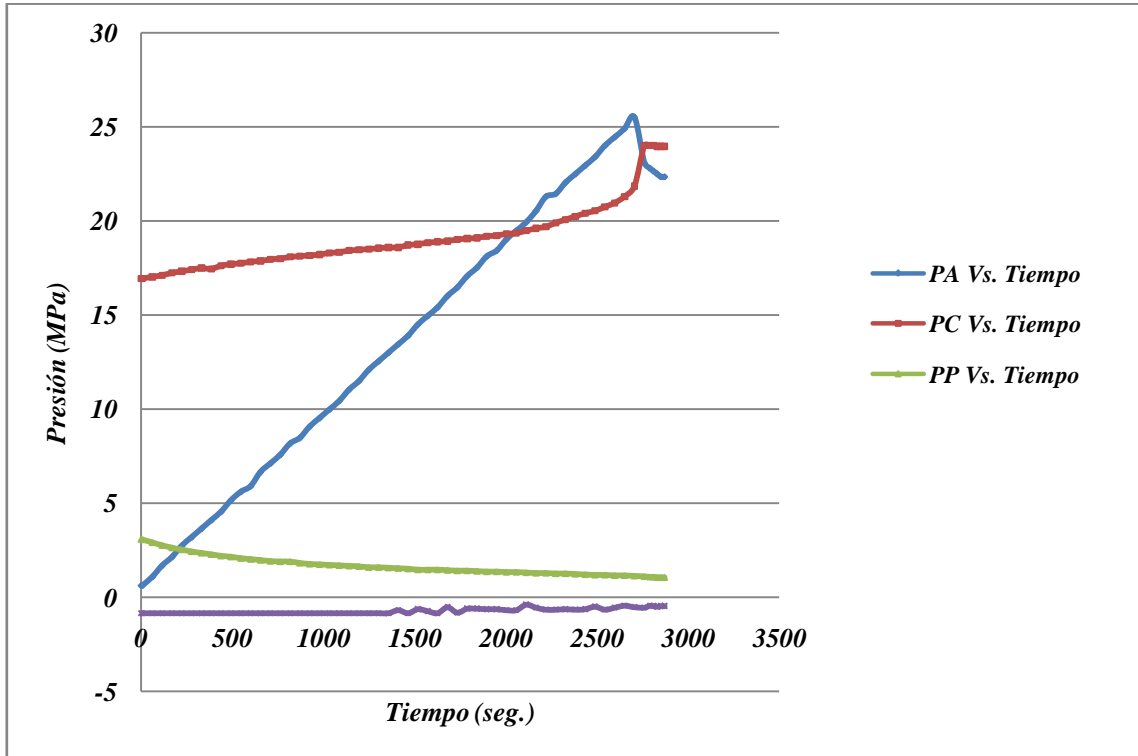


Gráfico 71. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

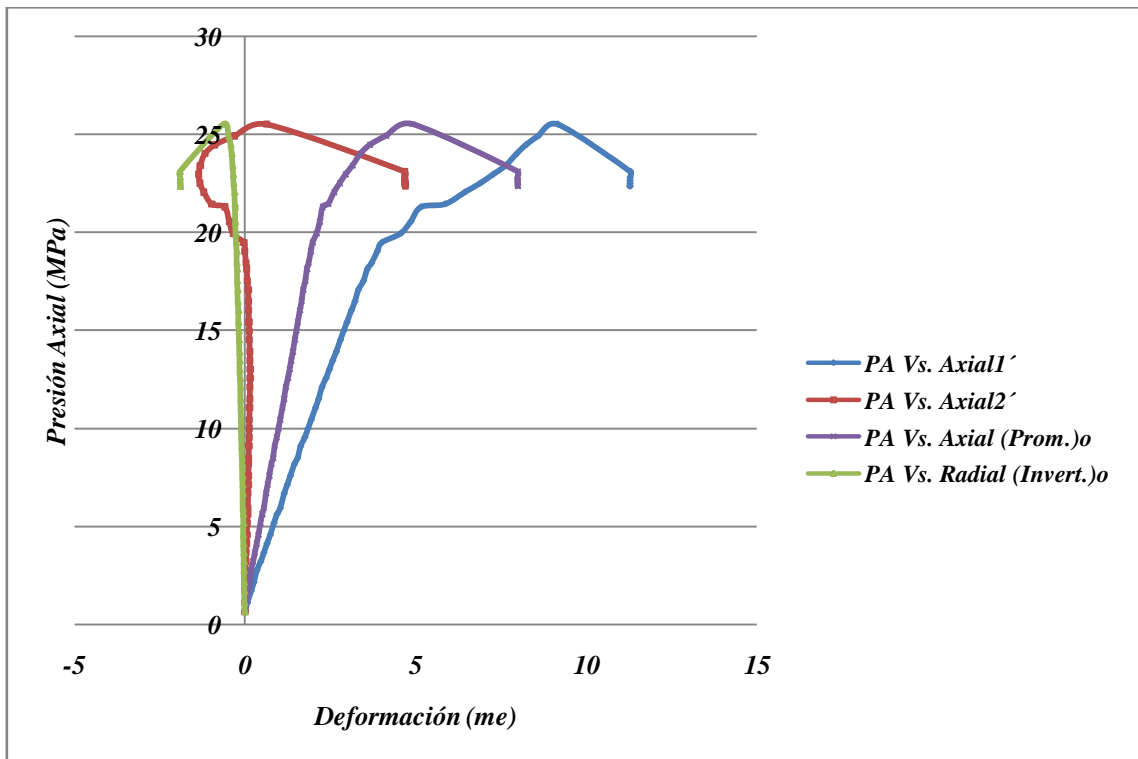


Gráfico 72. Curva de Esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.6 TOM25 - 14879'11'V:

- **Instrumentación de la muestra:**

Enchquetado con tela absorbente de guata para los ensayos hidrostáticos por rampas escalonadas (*método Tradicional*) y fracturamiento. Enchquetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

✓ *Saturación* por medio de ensayo hidrostático no drenado por rampas de incrementos con descanso de presión confinante (*método Tradicional*) por 18 horas. Los descansos fueron establecidos después de los 3, 6 y 9 MPa de presión confinante respectivamente. Condiciones iniciales: $P_{c_0}=0.98\text{MPa}$, $P_{p_0}= 0.19\text{ MPa}$, $P_{pint_hg_0}= 0.00\text{ MPa}$.

✓ *Fracturamiento* por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 1.5 horas con rata de $0.0037037\text{ MPa/seg.}$, y amplitud de 20 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0}= 2.97\text{MPa}$, $P_{p_0}= 0.00\text{ MPa}$, $P_{pint_hg_0}= 0.00\text{ MPa}$, $P_{a_0}= 1.09\text{ MPa}$.

- **Parámetros obtenidos:**

✓ *En la fase de saturación:*

Tabla 21. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 14879'11'V del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	B (med.)	B_{int.} (med.)
1	0,710	0,697
2	0,606	0,596
3	0,474	0,469

✓ *En la fase de fracturamiento:*

Tabla 22. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14879'11'V del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
A_{entrada}	A_{salida}	E_{medio} (GPa)	E_{tangente} (GPa)	E_{secante} (GPa)	v_{medio}	v_{tangente}	PA_{máx.} (MPa)
0,000	0,000	2,26	2,935	2,309	0,015	0,013	17,083

- **Gráficas:**
- ✓ *En la fase de saturación:*

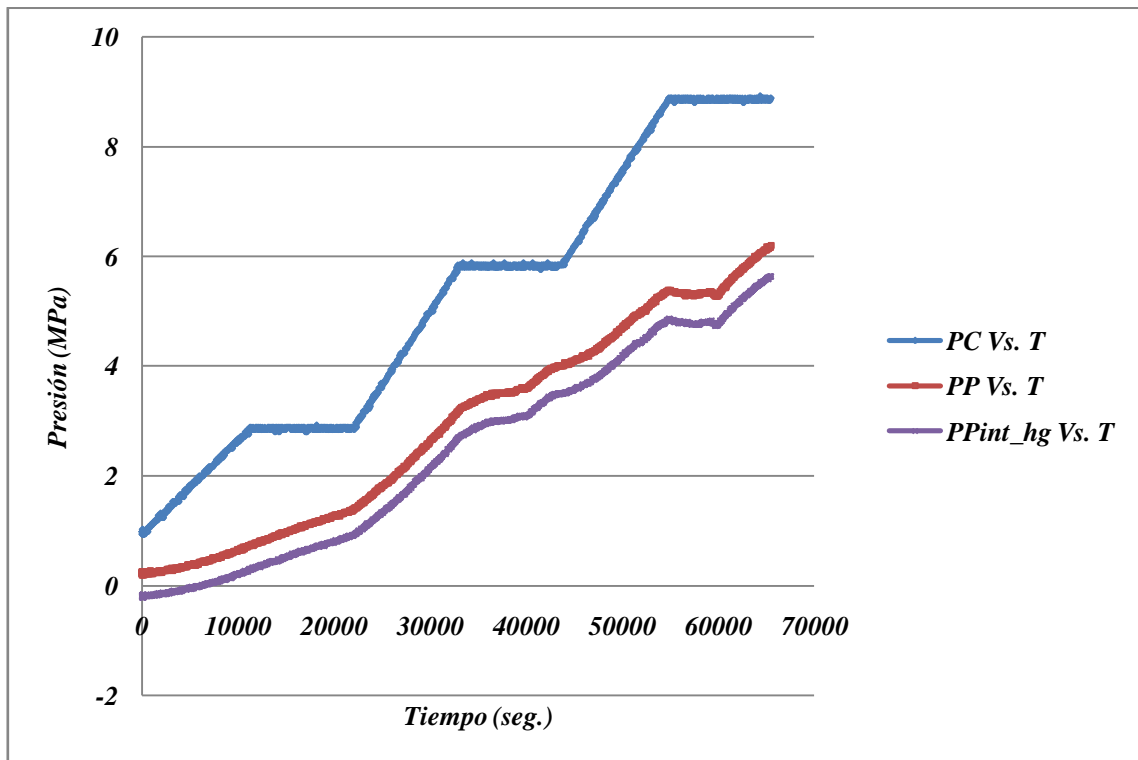


Gráfico 73. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática.

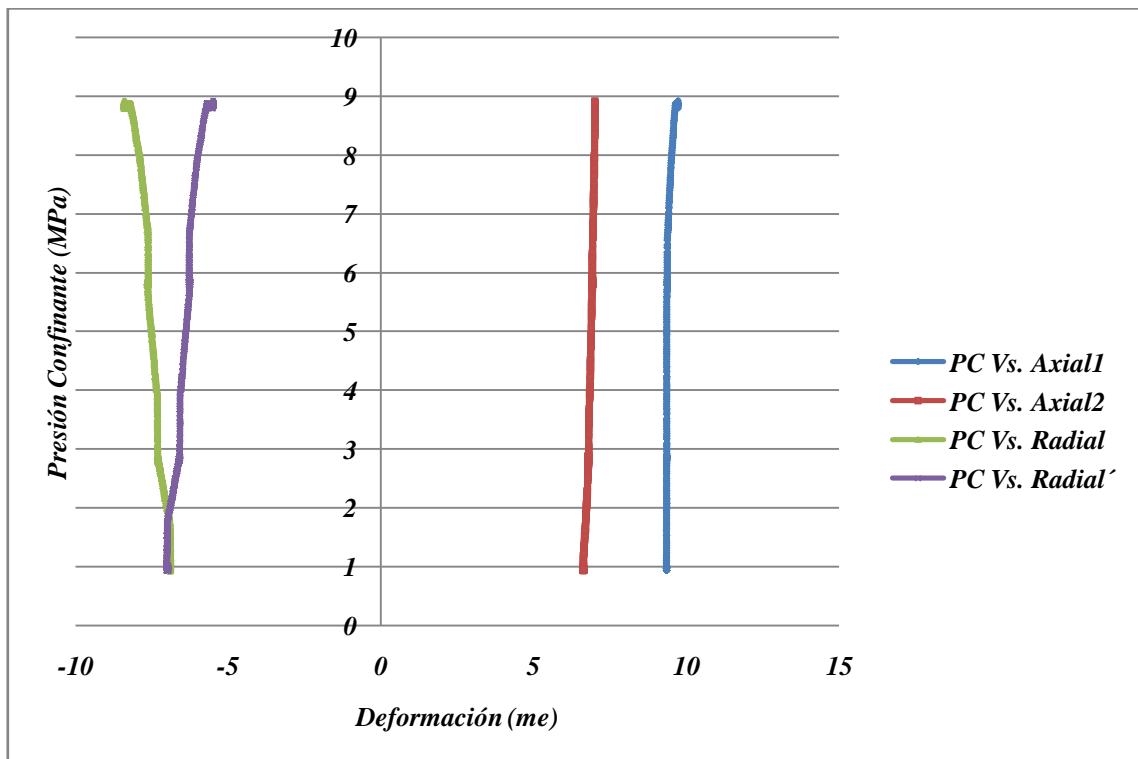


Gráfico 74. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática.

✓ En la fase de fracturamiento:

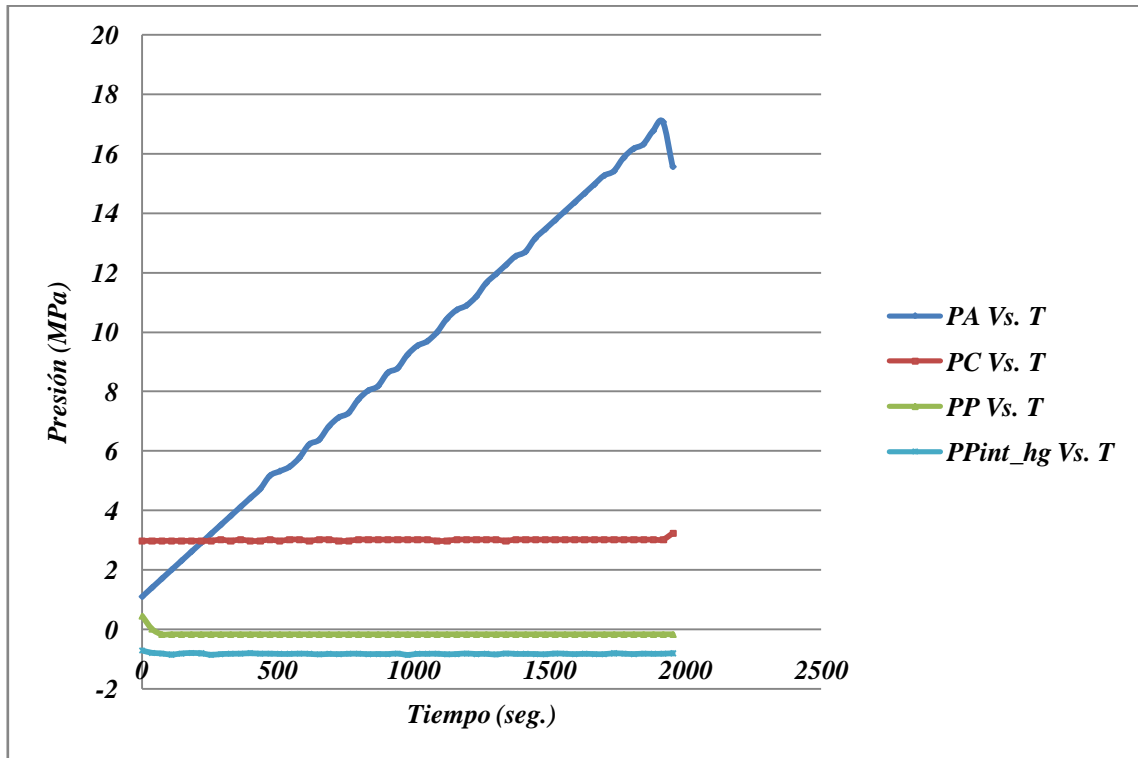


Gráfico 75. Variación de la Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

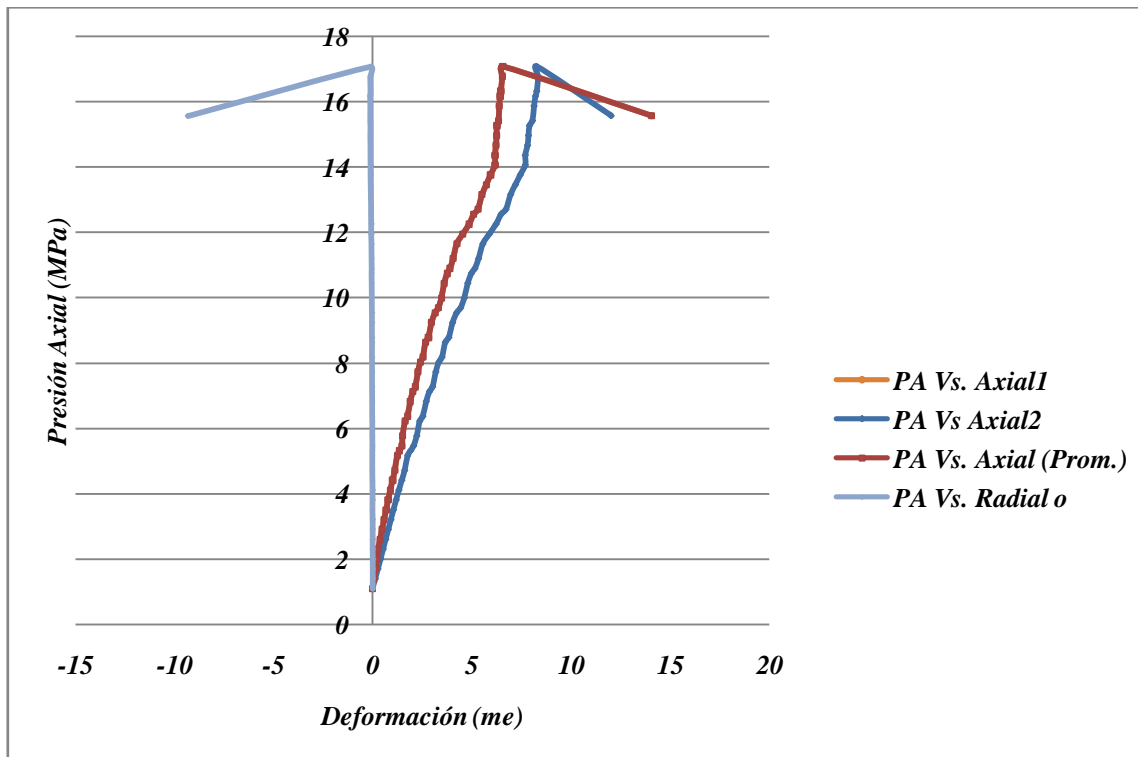


Gráfico 76. Curva de Esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.7 TOM25 - 14883 2'V:

- **Instrumentación de la muestra:**

Enchafetado con tela absorbente de fieltro para el ensayo hidrostático por ciclos (*método de los Estados Transitorios*) y ensayo de fracturamiento. Enchafetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ *Saturación* por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso con descansos de presión confinante (*método de los Estados Transitorios*) por 18 horas, con tasa de 0.0005556 MPa/seg., y amplitud de 6 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 3.82 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 1.49 \text{ MPa}$, $P_{pint_hg_0} = 0.51 \text{ MPa}$.
- ✓ *Fracturamiento* por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 2.5 horas con tasa de 0.0027778 MPa/seg., y amplitud de 25 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 3.52 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 1.83 \text{ MPa}$, $P_{pint_hg_0} = 0.85 \text{ MPa}$, $P_{a_0} = 0.04 \text{ MPa}$.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ *En la fase de saturación:*

Tabla 23. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 14883 2'V del pozo TOM25.

<i>Rampa de Incremento de presión confinante</i>	<i>Skempton (Hidrostático)</i>	
	<i>B (med.)</i>	<i>B_{int.} (med.)</i>
1	0.339	0.355
2	0.289	0.287
3	0.324	0.322
4	0.404	0.404

- ✓ *En la fase de fracturamiento:*

Tabla 24. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14883 2'V del pozo TOM25.

<i>Parámetro de Skempton en el fracturamiento</i>		<i>Módulo de Young</i>			<i>Relación de Poisson</i>		<i>Resistencia Máxima al Esfuerzo</i>
<i>A_{entrada}</i>	<i>A_{salida}</i>	<i>E_{medio}</i> (GPa)	<i>E_{tangente}</i> (GPa)	<i>E_{secante}</i> (GPa)	<i>v_{medio}</i>	<i>v_{tangente}</i>	<i>PA_{máx.}</i> (MPa)
0.149	0.153	4.616	7.014	2.504	0.064	0.042	19.043

- **Gráficas:**
- ✓ *En la fase de saturación:*

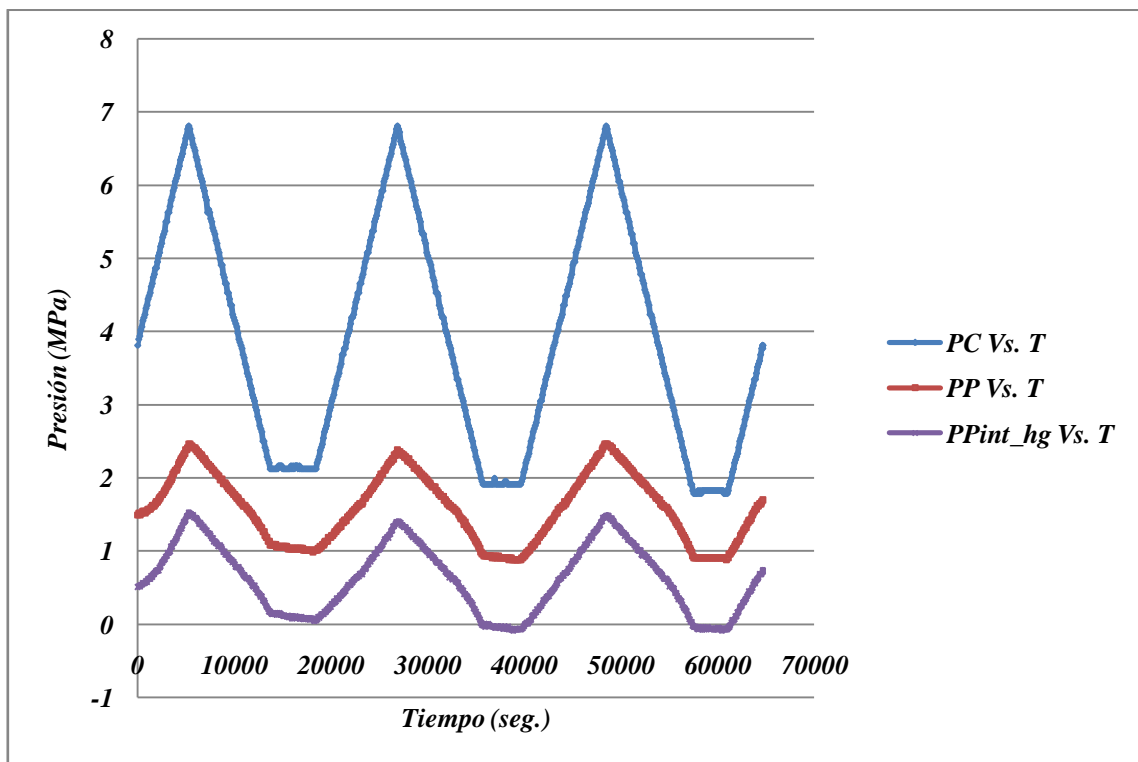


Gráfico 77. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática.

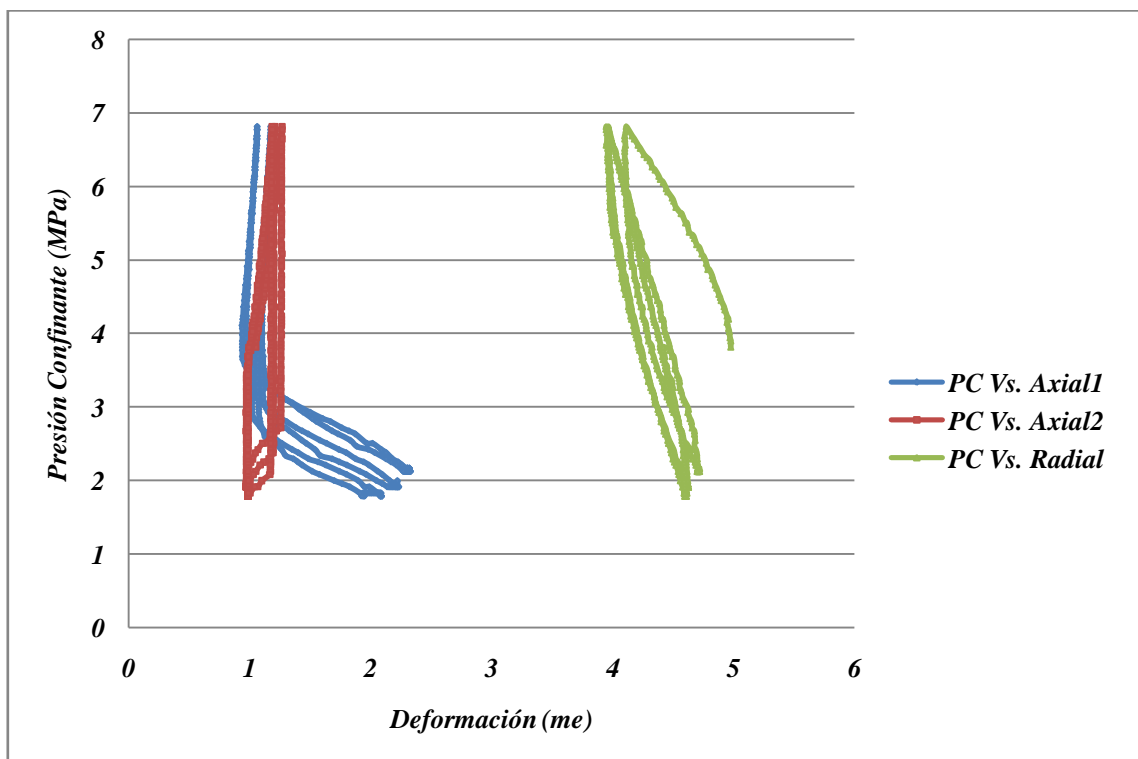


Gráfico 78. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática.

✓ En la fase de fracturamiento:

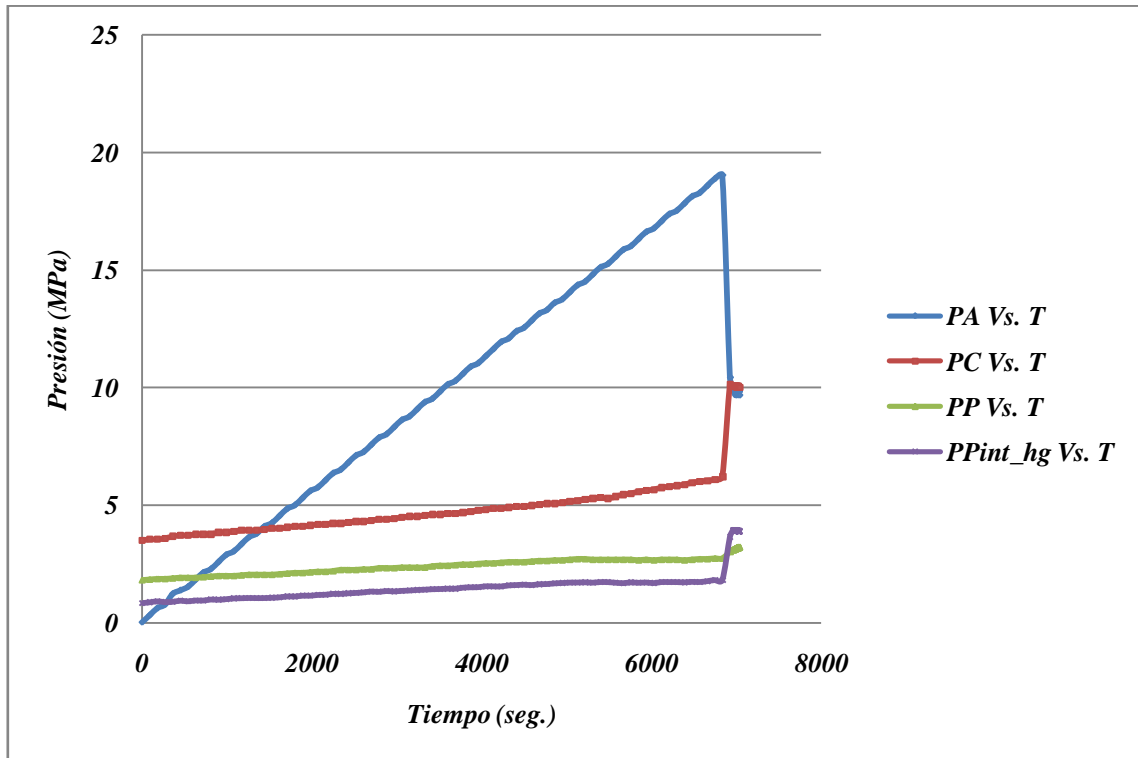


Gráfico 79. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

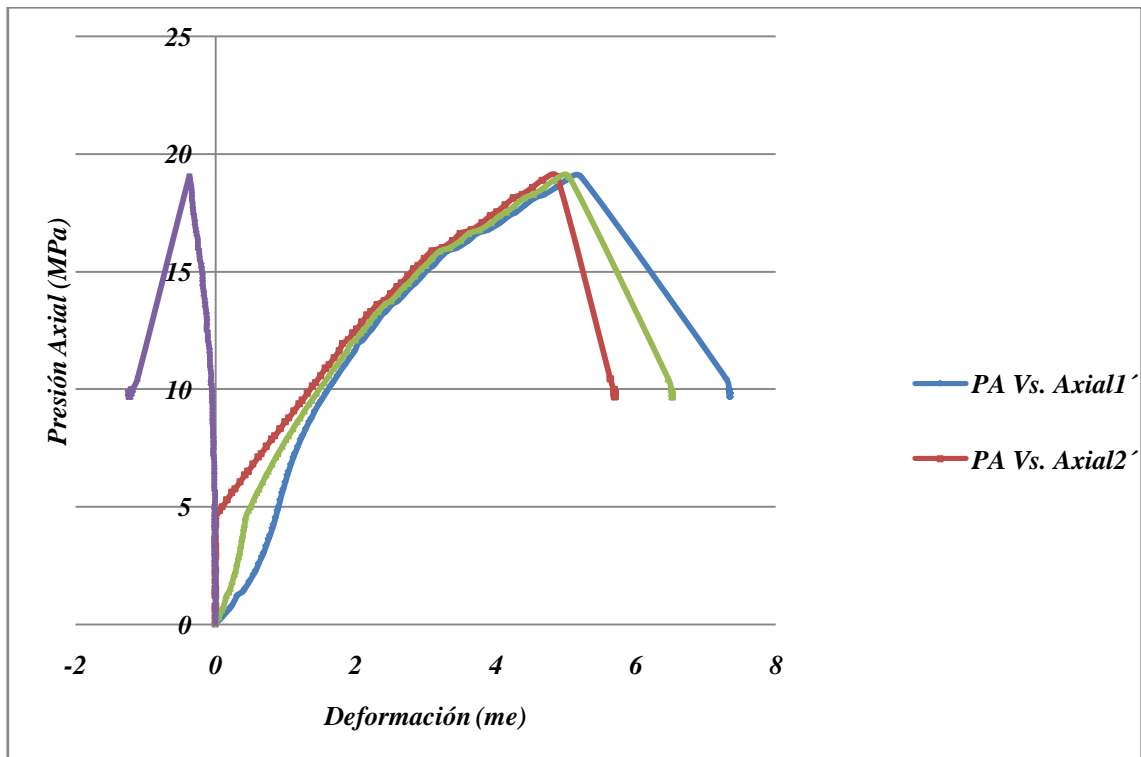


Gráfico 80. Curva de Esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.8 TOM25 - 14898'9''V:

- **Instrumentación de la muestra:**

Enchquetado con tela absorbente de fieltro para ensayo hidrostático por ciclos (*método de los Estados Transitorios*), ensayo hidrostático por rampas escalonadas (*método Tradicional*) y fracturamiento. Enchquetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ *Saturación₁* por medio de ensayo hidrostático no drenado por rampas de incrementos con descanso de presión confinante (*método Tradicional*) por 2 horas. Los descansos fueron establecidos después de los 5, 6, y 7 MPa de presión confinante respectivamente. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 3.98$ MPa, $P_{p_0} = 1.87$ MPa, $P_{pint_lg_0} = 1.13$ MPa.
- ✓ *Saturación₂* por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso de presión confinante (*método de los Estados Transitorios*) por 2.5 horas, con rata de 0.004 MPa/seg., y amplitud de 6 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 5.92$ MPa, $P_{p_0} = 1.77$ MPa, $P_{pint_lg_0} = 1.02$ MPa.
- ✓ *Fracturamiento* por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 2 horas con rata de 0.005556 MPa/seg., y amplitud de 40 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 6.09$ MPa, $P_{p_0} = 2.13$ MPa, $P_{pint_lg_0} = 1.31$ MPa, $P_{a_0} = 0.64$ MPa.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ *En la fase de saturación:*

Tabla 25. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 14898'9''V del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	B (med.)	B _{int.} (med.)
1	0.095	0.090
2	0.066	0.062
3	0.061	0.064
4	0.103	0.113

- ✓ *En la fase de fracturamiento:*

Tabla 26. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14898'9''V del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
A _{entrada}	A _{salida}	E _{medio} (GPa)	E _{tangente} (GPa)	E _{secante} (GPa)	v _{medio}	v _{tangente}	PA _{máx.} (MPa)
0.133	0.188	4.331	5.073	3.730	0.062	0.063	18.440

- **Gráficas:**
- ✓ *En la fase de saturación₁:*

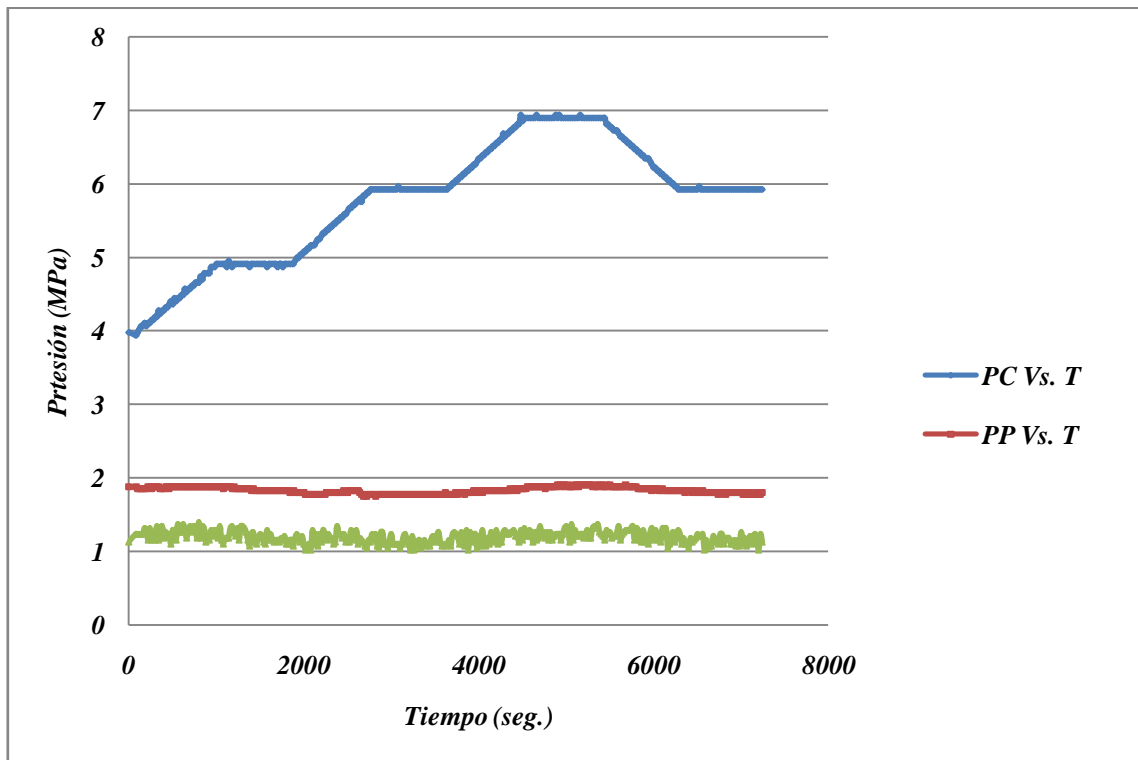


Gráfico 81. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de saturación₁.

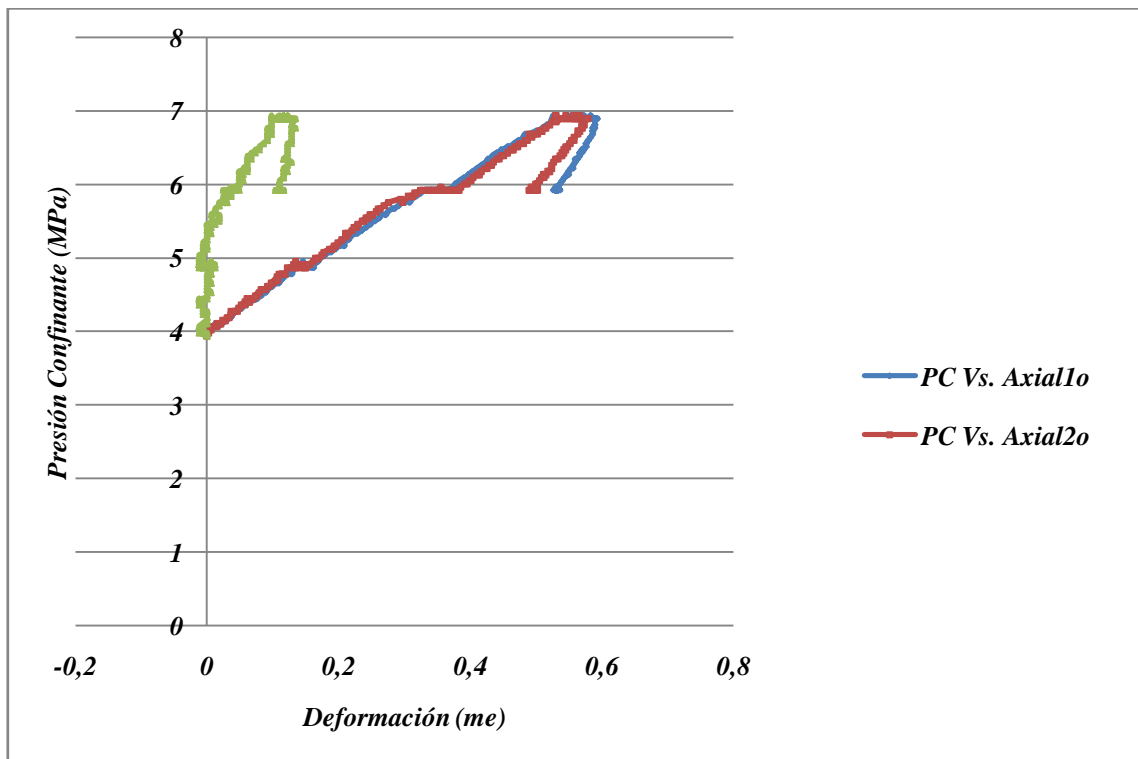


Gráfico 82. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase de saturación₁.

✓ En la fase de saturación₂:

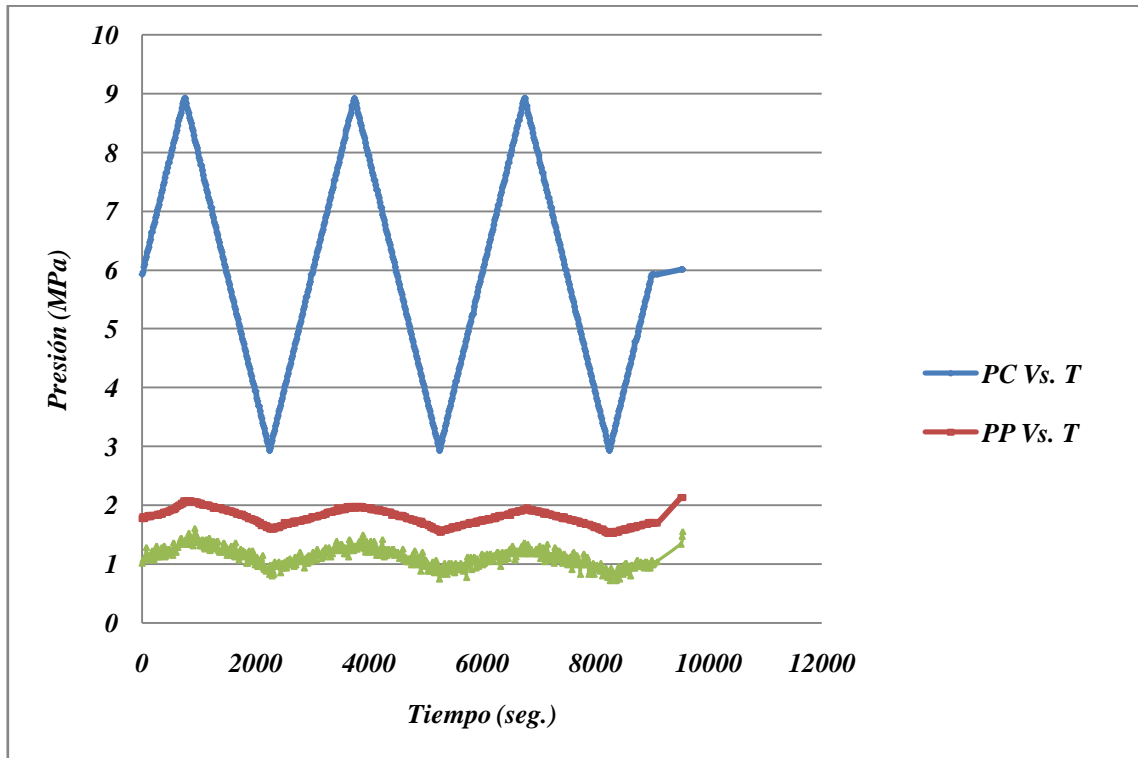


Gráfico 83. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de saturación₂.

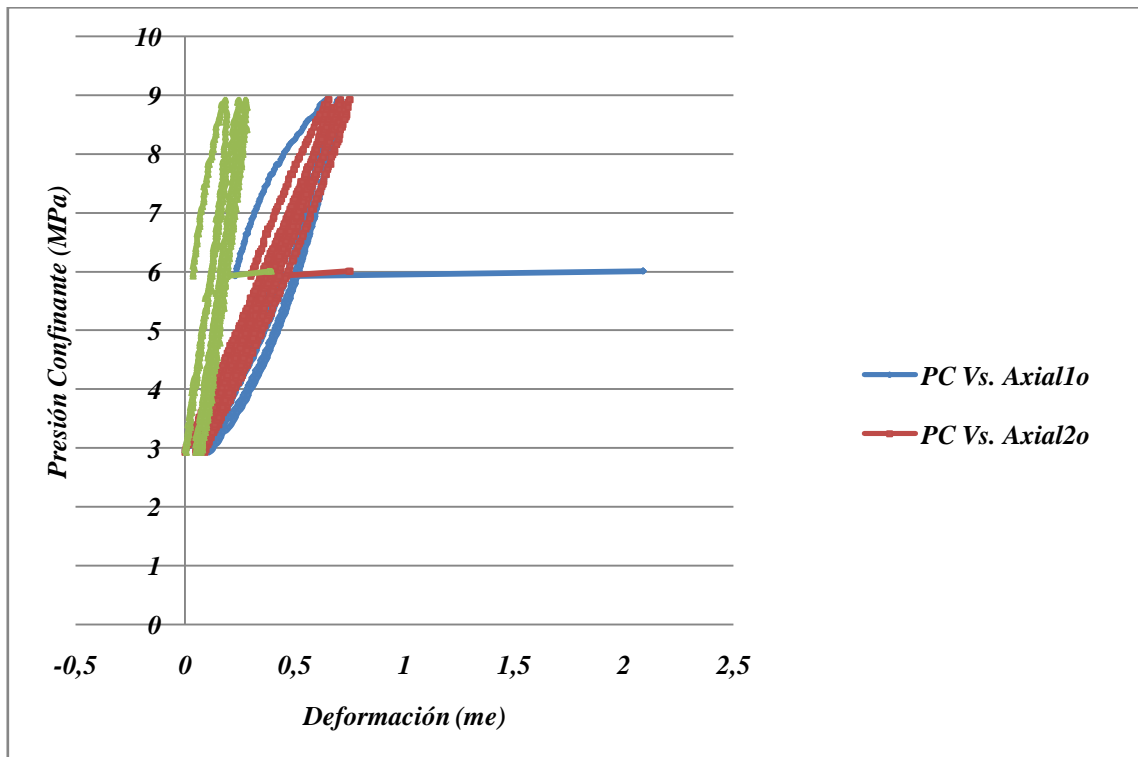


Gráfico 84. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase de saturación₂.

✓ En la fase de fracturamiento:

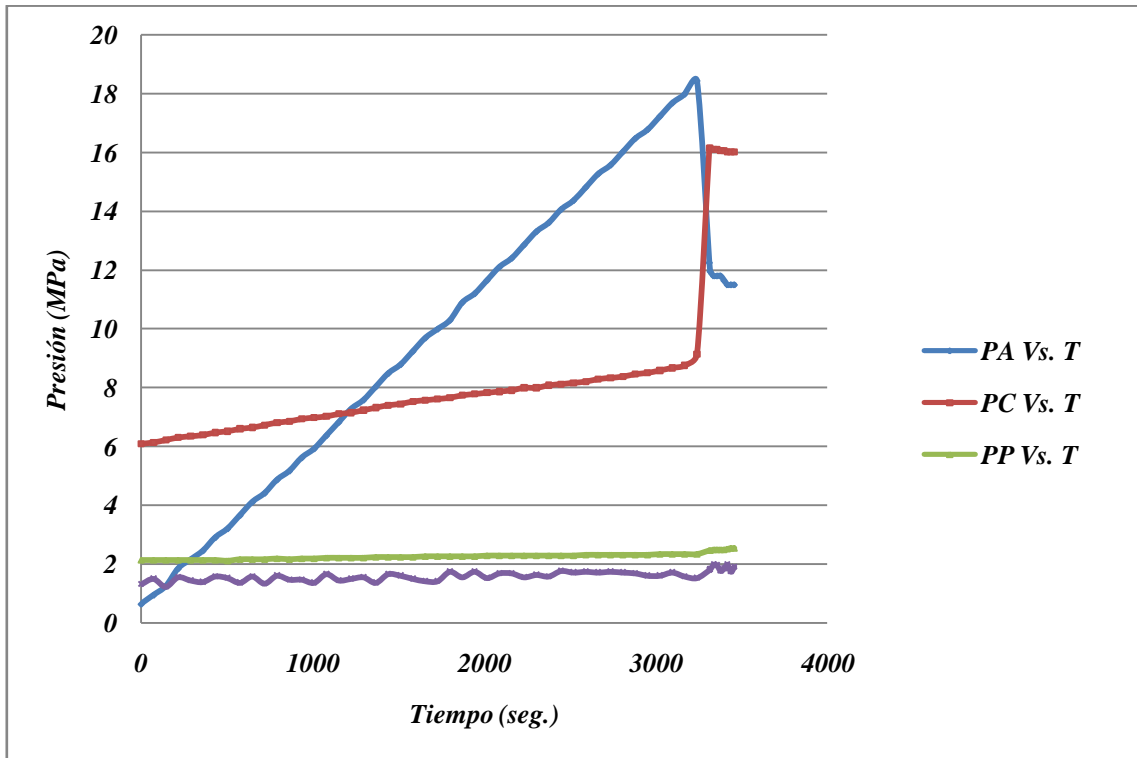


Gráfico 85. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

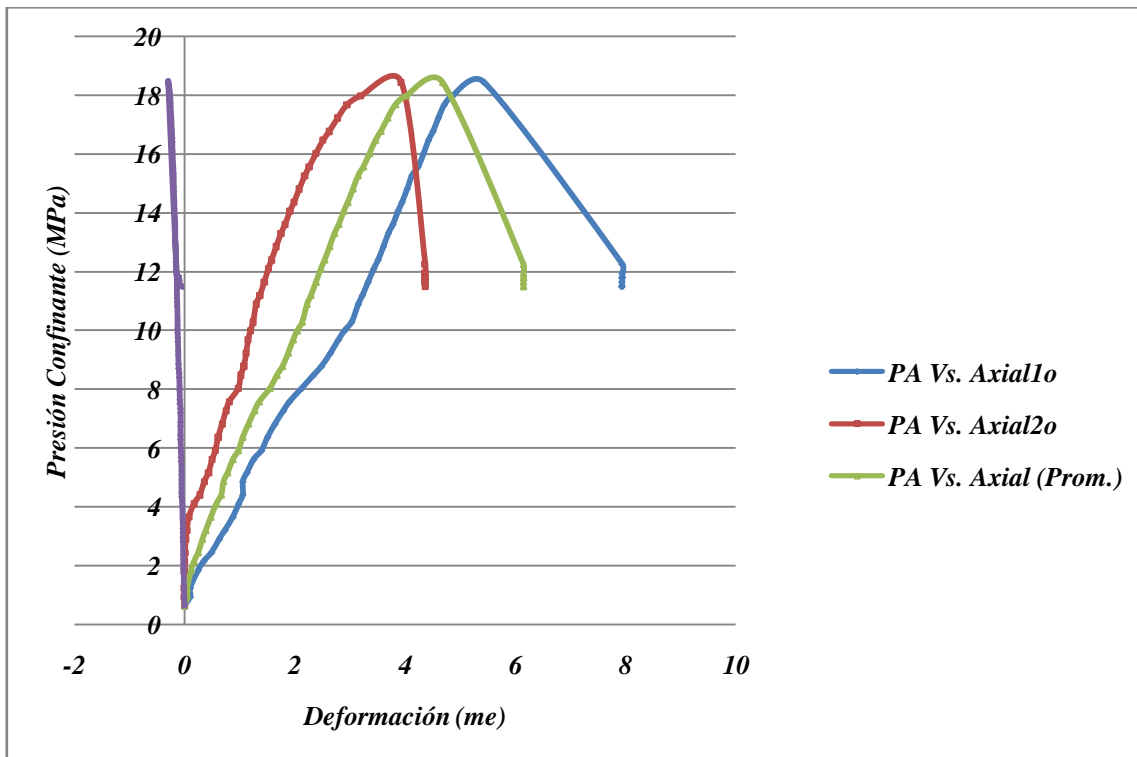


Gráfico 86. Curvas de Esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.9 TOM25 - 14996 V:

- **Instrumentación de la muestra:**

Enchafetado con tela absorbente de fieltro para ensayo hidrostático por ciclos (*método de los Estados Transitorios*) y fracturamiento. Enchafetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ **Saturación** por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso de presión confinante por 2 horas, con rata de 0.005 MPa/seg., y amplitud de 6 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0}=4.83\text{MPa}$, $P_{p_0}=0.73\text{MPa}$, $P_{pint_hg_0}=0.00\text{MPa}$.
- ✓ **Fracturamiento** por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 2 horas con rata de 0.0034722 MPa/seg., y amplitud de 25 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0}=4.87\text{MPa}$, $P_{p_0}=1.01\text{MPa}$, $P_{pint_lg_0}=0.18\text{MPa}$, $P_{a_0}=0.19\text{MPa}$.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ **En la fase de saturación:**

Tabla 27. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 14996 V del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	B (med.)	B _{int.} (med.)
1	0.041	0.051
2	0.046	0.048
3	0.046	0.045
4	0.054	0.052

- ✓ **En la fase de fracturamiento:**

Tabla 28. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 14996 V del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
A _{entrada}	A _{salida}	E _{medio} (GPa)	E _{tangente} (GPa)	E _{secante} (GPa)	v _{medio}	v _{tangente}	PA _{máx.} (MPa)
0.243	0.273	5.568	5.853	4.199	0.084	0.046	20.853

- **Gráficas:**
- ✓ *En la fase de saturación:*

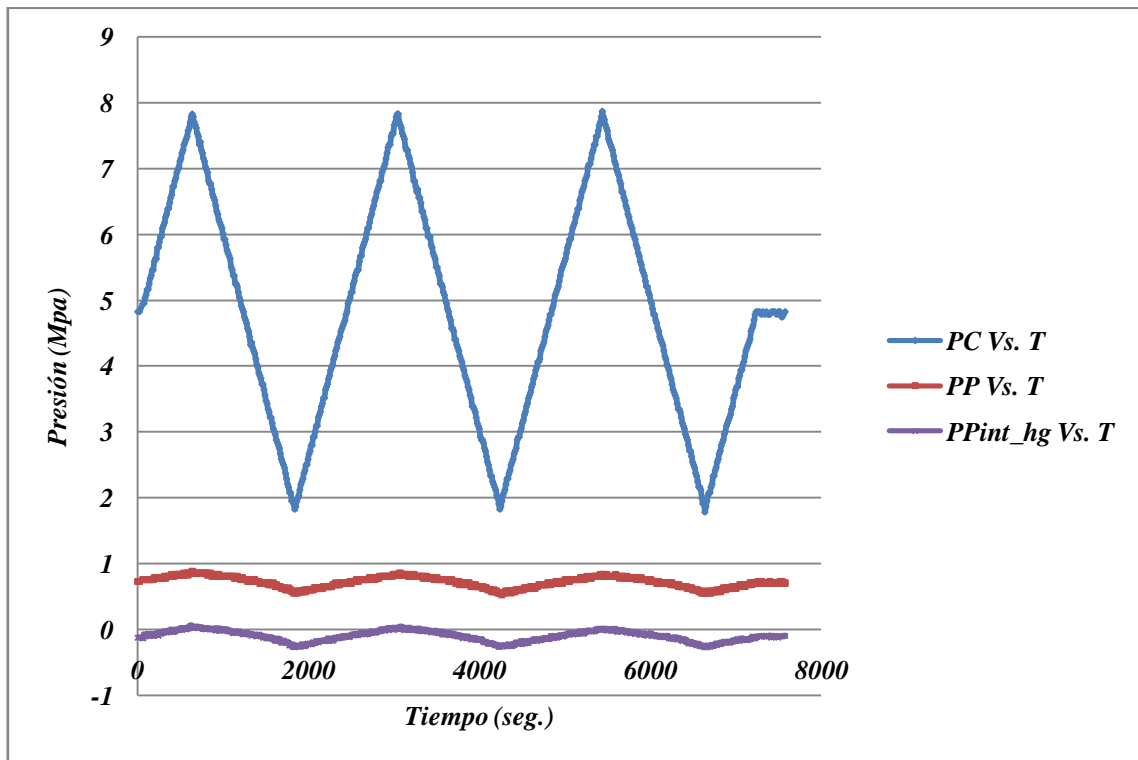


Gráfico 87. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática.

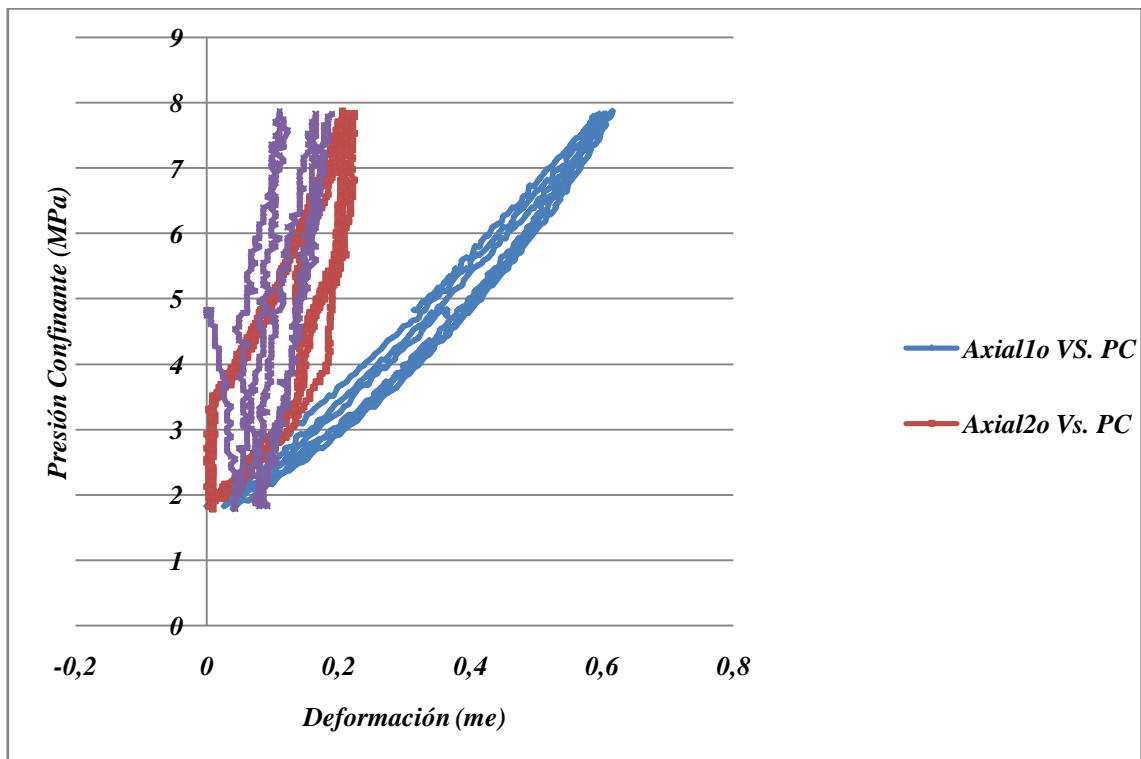


Gráfico 88. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase de saturación.

✓ En la fase de fracturamiento:

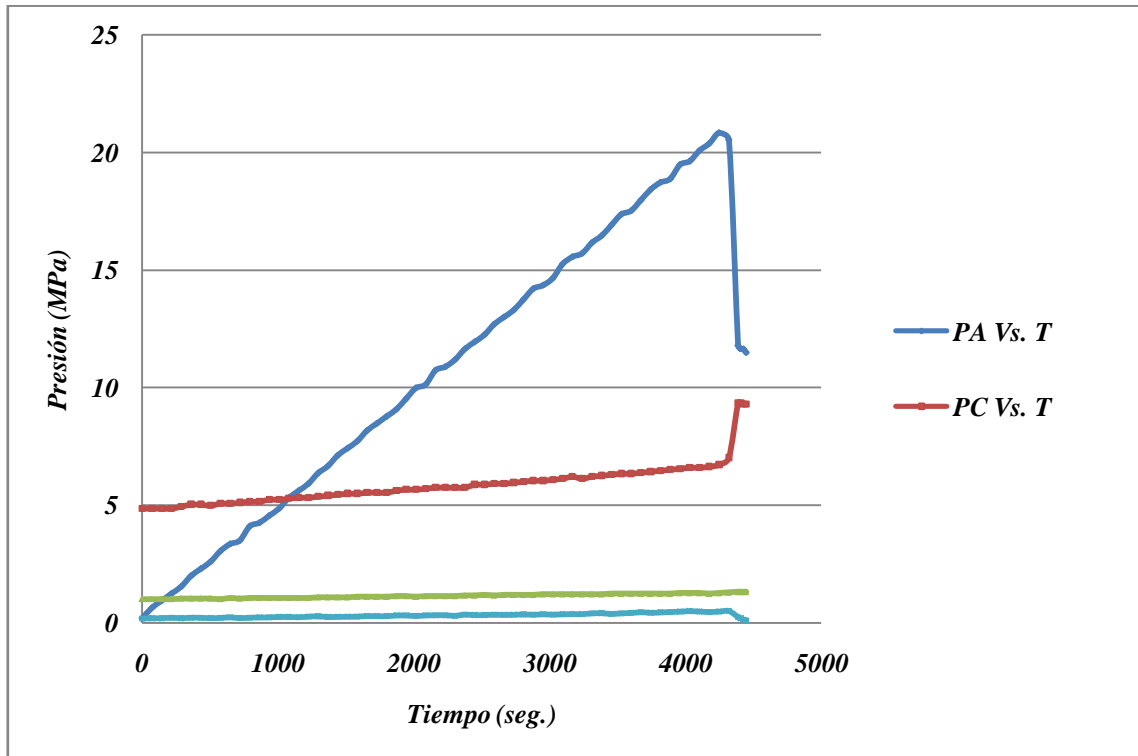


Gráfico 89. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

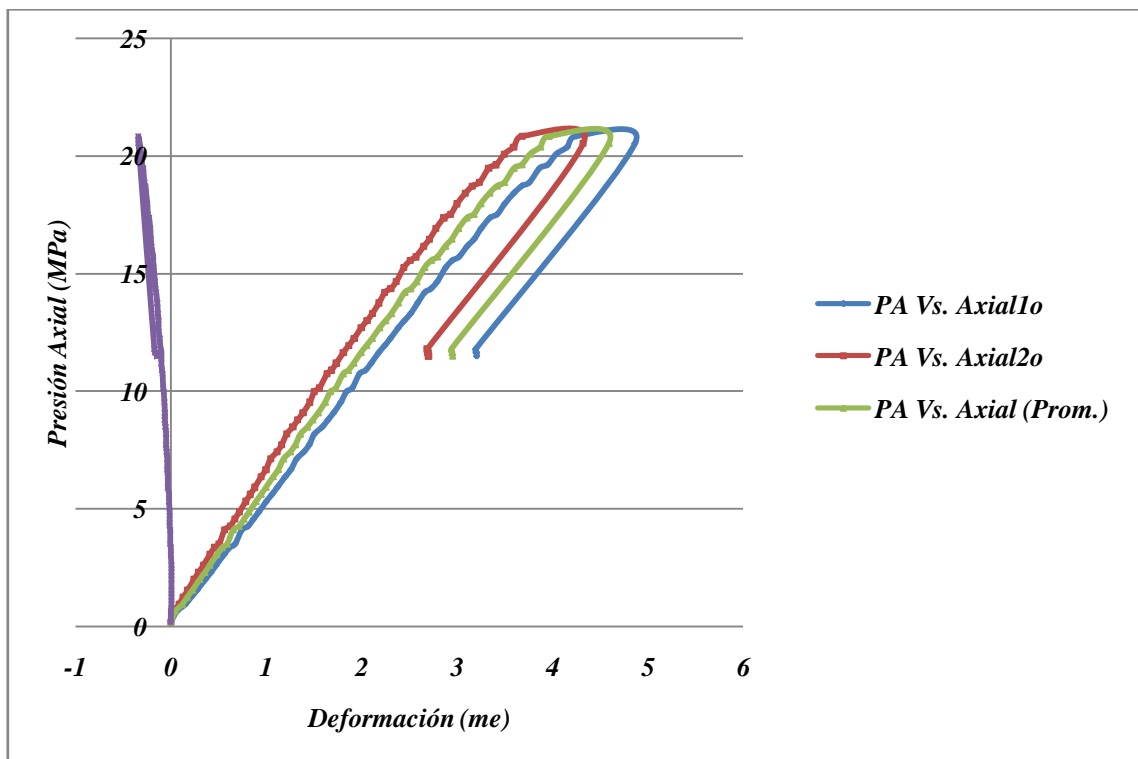


Gráfico 90. Curva de Esfuerzo Vs. Deformación.

IV.3.10 TOM25 - 15121'7''V:

- **Instrumentación de la muestra:**

Enchquetado con tela absorbente de fieltro para ensayo hidrostático por ciclos (*método de los Estados Transitorios*), ensayo hidrostático por rampas escalonadas (*método Tradicional*) y fracturamiento. Enchquetado reforzado con material termoencogible. Sensores de deformación lineal axial y radial (LVDT). Cabezales de deformación axial con capilares para el drenaje de presión de poros.

- **Tipo de ensayo:**

- ✓ **Saturación₁** por medio de ensayo hidrostático no drenado por rampas de incrementos con descanso de presión confinante (*método Tradicional*) por 2 horas. Los descansos fueron establecidos después de los 3, 4, 5 y 4 MPa de presión confinante respectivamente. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 1.06 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 0.23 \text{ MPa}$, $P_{\text{pint_lg}_0} = 0.00 \text{ MPa}$.
- ✓ **Saturación₂** por medio de ensayo hidrostático no drenado por ciclos de incremento y descenso de presión confinante (*método de los Estados Transitorios*) por 2.5 horas, con rata de 0.01 MPa/seg., y amplitud de 5 MPa en 3 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 5.42 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 1.12 \text{ MPa}$, $P_{\text{pint_lg}_0} = 0.40 \text{ MPa}$.
- ✓ **Fracturamiento** por medio de ensayo con presión axial no drenado durante 2 horas con rata de 0.005556 MPa/seg., y amplitud de 40 MPa en 0 ciclos. Condiciones iniciales: $P_{c_0} = 6.09 \text{ MPa}$, $P_{p_0} = 2.13 \text{ MPa}$, $P_{\text{pint_lg}_0} = 1.31 \text{ MPa}$, $P_{a_0} = 0.64 \text{ MPa}$.

- **Parámetros obtenidos:**

- ✓ **En la fase de saturación:**

Tabla 29. Parámetro B de Skempton en la fase de saturación I de la muestra 15121'7''V del pozo TOM25.

Rampa de Incremento de presión confinante	Skempton (Hidrostático)	
	B (med.)	B_{int.} (med.)
1	0.078	0.072
2	0.036	0.032
3	0.031	0.015
4	0.033	0.012

- ✓ **En la fase de fracturamiento:**

Tabla 30. Parámetros de interés en la fase de fracturamiento de la muestra 15121'7''V del pozo TOM25.

Parámetro de Skempton en el fracturamiento		Módulo de Young			Relación de Poisson		Resistencia Máxima al Esfuerzo
A_{entrada}	A_{salida}	E_{medio} (GPa)	E_{tangente} (GPa)	E_{secante} (GPa)	v_{medio}	v_{tangente}	PA_{máx.} (MPa)
0.366	6.513	3.830	2.225	2.287	0.067	0.027	22.512

- **Gráficas:**
- ✓ *En la fase de saturación₁:*

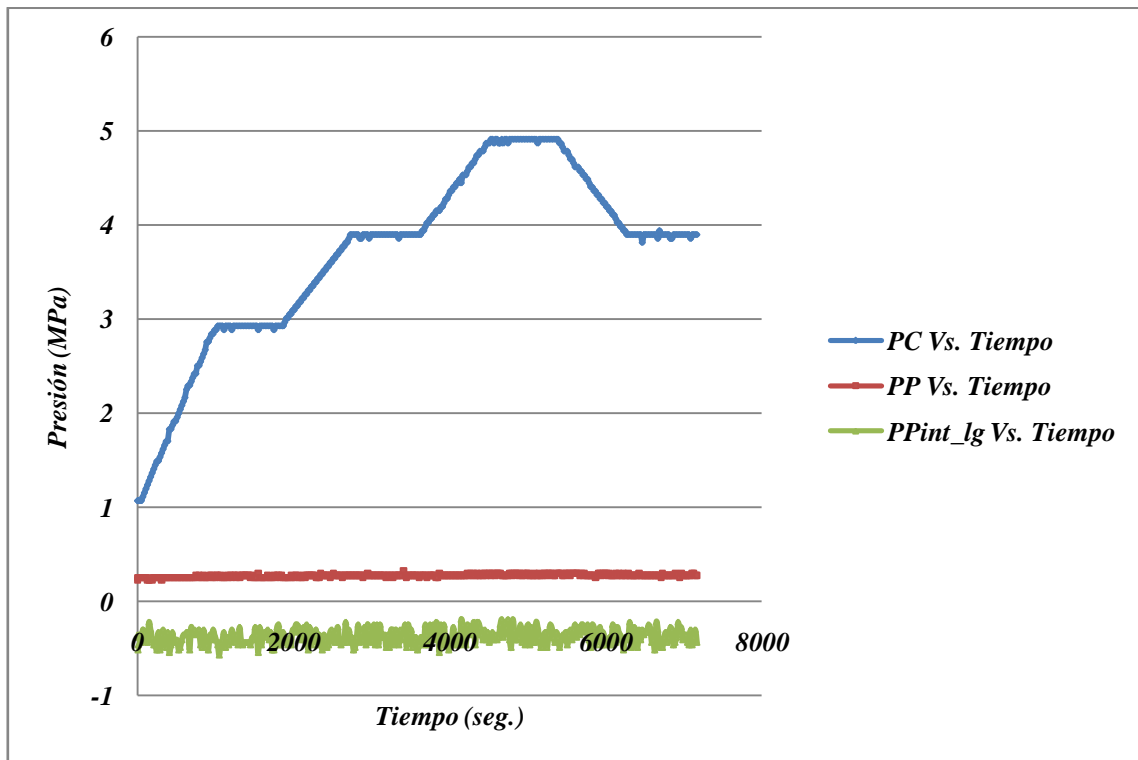


Gráfico 91. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₁.

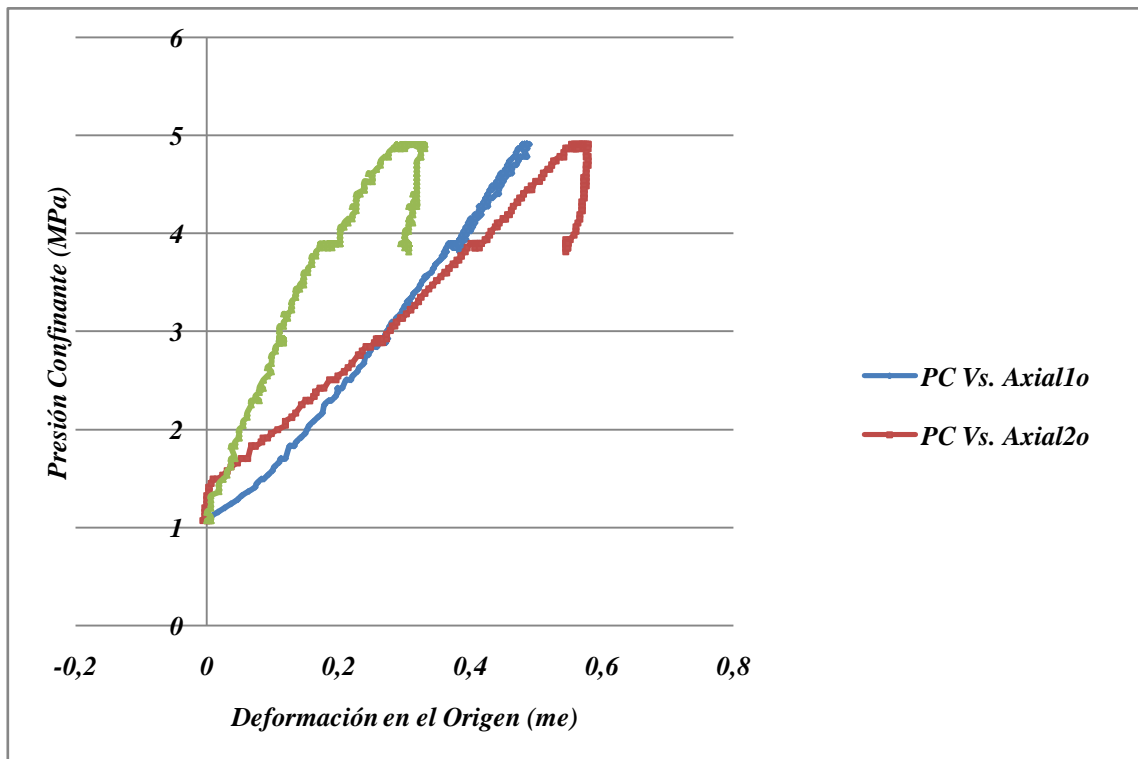


Gráfico 92. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₁.

✓ En la fase de saturación₂:

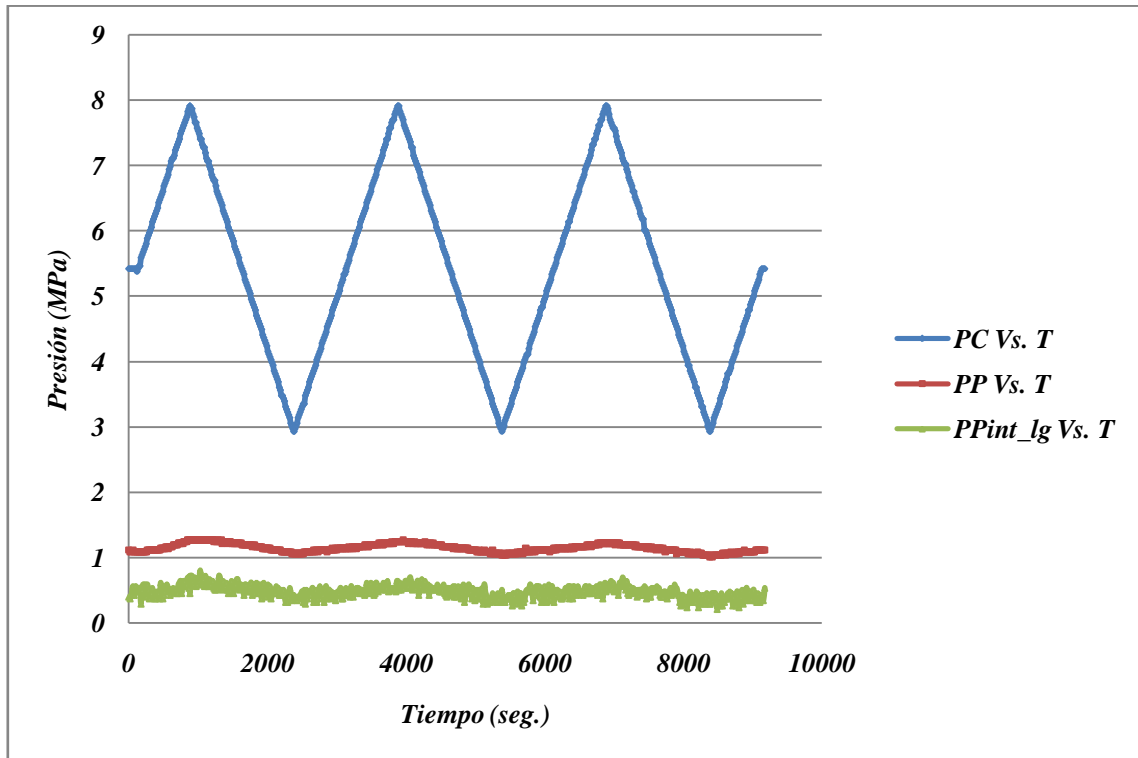


Gráfico 93. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase hidrostática₂.

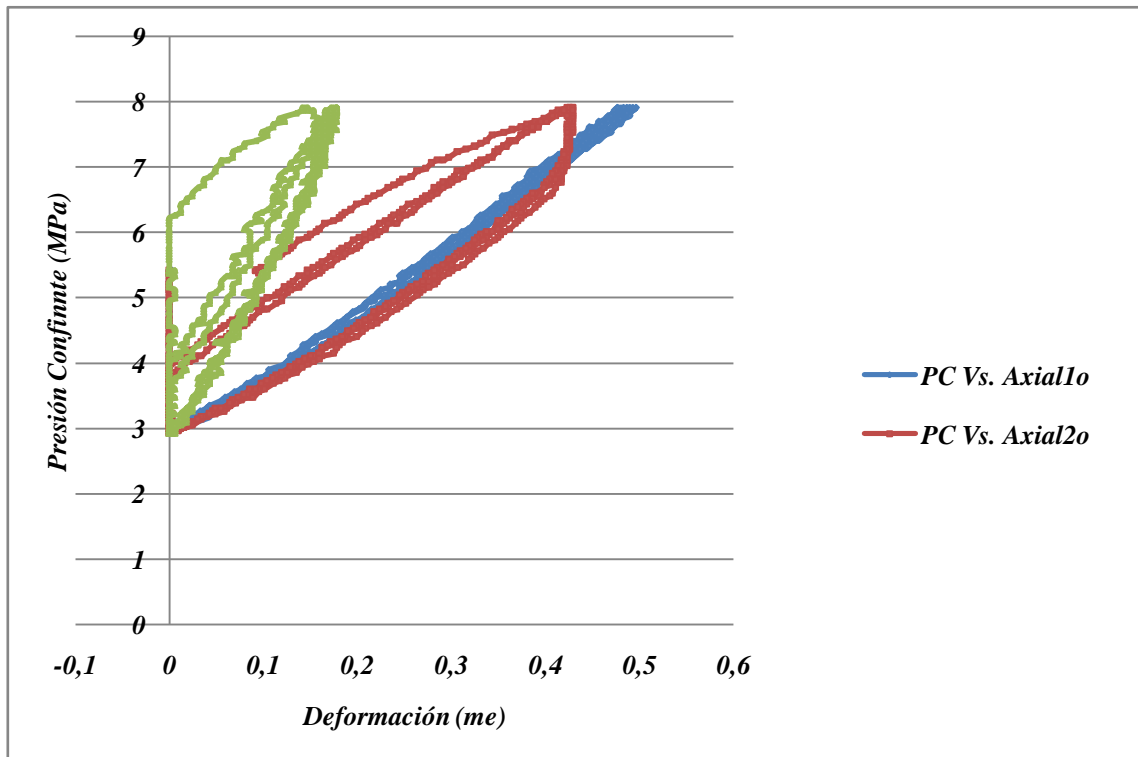


Gráfico 94. Variación de la Presión de Confinamiento en función de la Deformación en la fase hidrostática₂.

✓ En la fase de fracturamiento:

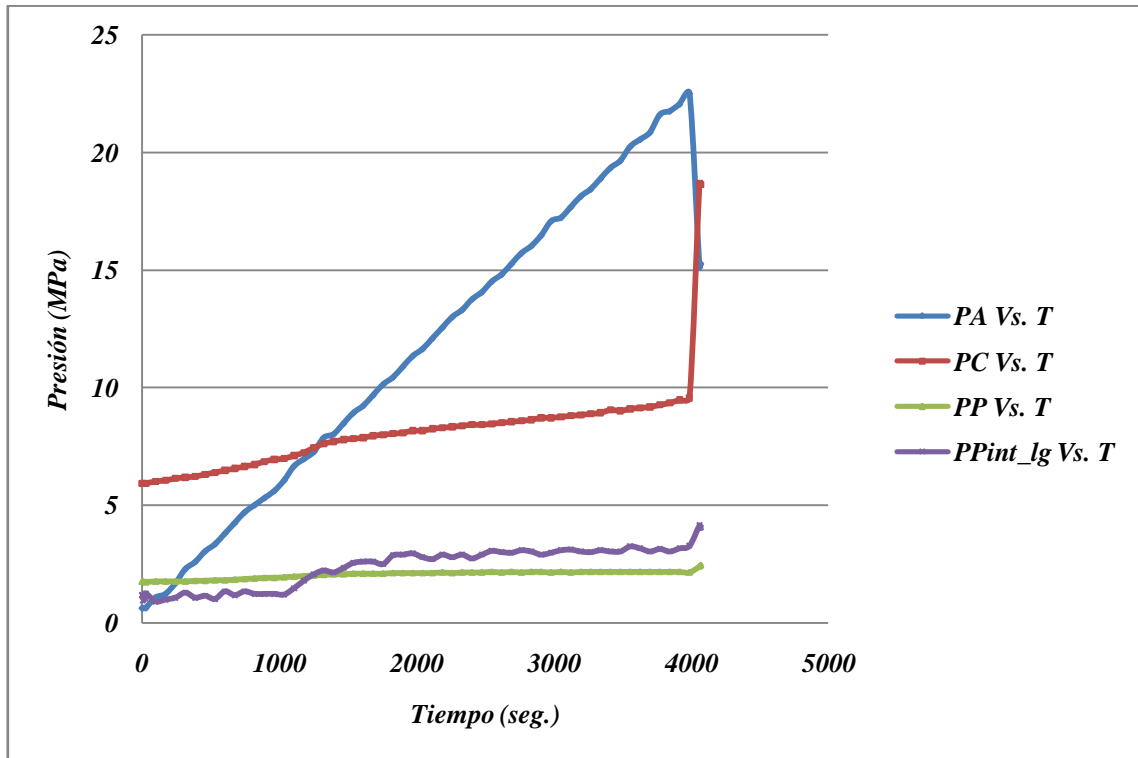


Gráfico 95. Variación de las Presiones en función del Tiempo en la fase de fracturamiento.

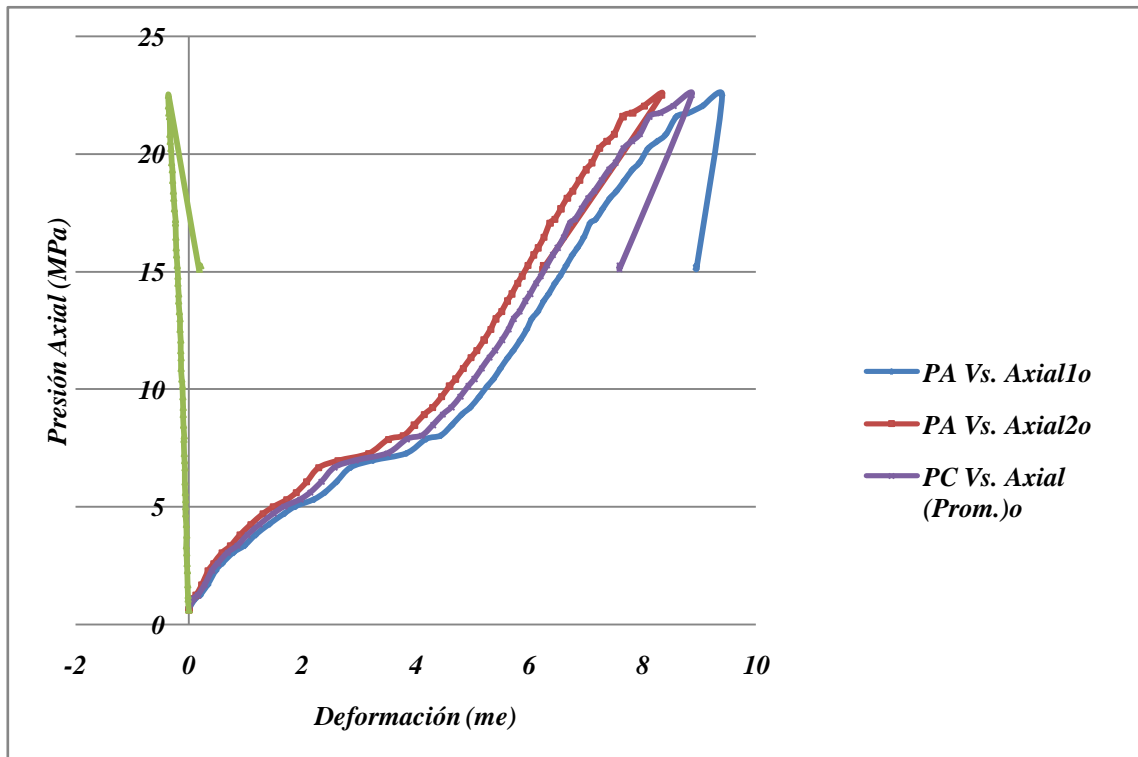


Gráfico 96. Curvas de Esfuerzo Vs. Deformación.

- **Discusiones generales de los Ensayos Triaxiales:**

- ✓ *Fase de saturación:*

Los cálculos del parámetro de Skempton “**B**” se realizaron para cada una de las rampas de incremento de presión confinante de: La fase de *saturación* única de la muestra 14885’11’’H; la fase de *Saturación*₁ de la muestra 14993 H; la fase de *Saturación*₂ de la muestra 14996’11’’H; de la fase de *Saturación*₁ de la muestra 15014’10’’H; la fase de *Saturación*₁ de la muestra 15127’9’’H; la fase de *saturación* única de la muestra 14879’11’’V; la fase de *saturación* única de la muestra 14883’2’’V; la fase de *Saturación*₂ de la muestra 14898’9’’V; la fase de *saturación* única de la muestra 14996 V; y la fase de *Saturación*₂ de la muestra 15121’7’’V. Las pendientes se escogieron en la parte más lineal de las curvas de presión de poros en función del tiempo.

En la **Tablas 11, 13, 15, 17 y 19, 21, 23, 25, 27 y 29** se muestran los valores obtenidos del parámetro “**B**” y “**B_{int}**” de Skempton. De estas tablas se puede notar que la muestra pareciera lograr una gran saturación. Sin embargo, se supone que esta pseudo-saturación es debida al drenaje a través del enchaquetado escogido, ya que la lutita se considera casi impermeable. El valor de “**B**” es calculado mediante la relación de la presión de poros de entrada en función de la presión de confinamiento y el “**B_{int}**” es calculado mediante la pendiente de la variación de presión de poro de salida en función del confinamiento. Ambos valores del parámetro de Skempton, para cada profundidad, pueden considerarse iguales (valores resaltados en amarillo), lo que indica que la permeabilidad se debe al enchaquetado utilizado, permitiendo el drenaje del fluido de presión de poros (**Gráficos 45, 49, 55, 57, 61, 63, 67, 69, 73, 77, 81, 83, 87, 91 y 93**).

Con respecto a las deformaciones:

- En el **Gráfico 46** de la muestra 14885’11’’H, se obvia la deformación *Axial*₁ ya que el sensor no midió variación alguna, sin embargo, se aprecia para todos los ciclos que la deformación *Axial*₂ presenta histéresis producto de la absorción de energía (concavidad hacia abajo) al incremento de carga y liberación de energía (concavidad hacia arriba) al momento de la descarga del confinamiento, mostrando cambios pequeños en el volumen, lo que indica que la muestra sufrió pequeñas perturbaciones, y posible microfracturas.

- En el **Gráfico 50** de la muestra 14993 H, no se detecto deformación ya que los sensores no midieron variación alguna por lo que se optó por desmontar la muestra y realizar el ajuste de

los LVDT's. Se ejecutó el segundo ensayo de saturación (*saturación₂*), esta vez con enchaquetado de papel de filtro, trayendo como consecuencia que no haya registro en las medidas de presión de poros de salida más si registro en la deformación (**Gráficos 51 y 52**). De estos últimos se aprecia que, para todos los ciclos, las deformaciones presentan histéresis producto de la absorción de energía (concavidad hacia abajo) durante el incremento de carga y liberación de energía (concavidad hacia arriba) al momento de la descarga del confinamiento, mostrando cambios pequeños en el volumen, lo que indica que la muestra sufrió perturbación, pocas microfracturas y compactibilidad.

- Para la muestra 14996'11'H, se aprecia buen registro de por parte de los LVDT's mostrando la histéresis con pequeñas perturbaciones en la fase de *saturación₁* (**Gráfico 56**), y deformaciones irreversibles adicionales en la fase de *saturación₂* (**Gráfico 58**). En ambas fases de saturación se aprecia registro de presión de poros de salida, se realizaron dos ensayos de saturación con el objeto de incrementar los valores de los parámetros “*B*” de Skempton.

- Para la muestra 15014'10'H, se aprecia buen registro por parte de los LVDT's mostrando histéresis producto de la absorción de energía (concavidad hacia abajo) al momento del incremento de confinamiento y liberación de energía (concavidad hacia arriba) al momento de la descarga del confinamiento, mostrando además pequeñas perturbaciones en la fase de *saturación₁* (**Gráfico 62**). En la fase de *saturación₂* se puede apreciar también que la muestra presenta perturbaciones (**Gráfico 64**). En ambas fases de saturación se aprecia registro de presión de poros de salida por lo que se realizaron dos ensayos de saturación con el objeto de incrementar los valores de los parámetros “*B*” de Skempton.

- Para la muestra 15127'9'H, se aprecia buen registro por parte de los LVDT's mostrando histéresis producto de la absorción de energía (concavidad hacia abajo) al momento del incremento de confinamiento y liberación de energía (concavidad hacia arriba) al momento de la descarga del confinamiento, mostrando además ligeras perturbaciones en la fase de *saturación₁* (**Gráfico 68**). En la fase de *saturación₂* las perturbación de la muestra también es apreciable (**Gráfico 70**). En ambas fases de saturación se aprecia registro de presión de poros de salida por lo que se realizaron dos ensayos de saturación con el objeto de incrementar los valores de los parámetros “*B*” de Skempton.

- Para la muestra 14879'11'V, se aprecia un registro bajo por parte de los LVDT's donde las perturbaciones en la muestra son pequeñas en la fase de *saturación* (**Gráfico 74**). En esta *fase*

de saturación se aprecia buen registro de presión de poros de salida por lo que se realizó solo un ensayo hidrostático para determinar los valores de los parámetros “**B**” de Skempton.

- Para la muestra 14883'2''V, se aprecia buen registro por parte de los LVDT's donde se aprecia la histéresis en las etapas de carga y descargas de presión de confinamiento trayendo como consecuencia pequeñas perturbaciones en la muestra (**Gráfico 78**). En esta fase de saturación se aprecia buen registro de presión de poros de salida por lo que se realizó solo un ensayo de saturación para determinar los valores de los parámetros “**B**” de Skempton.

- Para la muestra 14898'9''V, se aprecia buen registro por parte de los LVDT's en la fase de saturación₁, donde se ve que las deformaciones son ligeramente irreversibles (**Gráfico 82**), mientras que en la fase de saturación₂, se aprecia la histéresis producto de la absorción de energía (concavidad hacia abajo) al momento del incremento de confinamiento y liberación de energía (concavidad hacia arriba) al momento de la descarga del confinamiento, mostrando además perturbaciones menores a los de la fase de saturación₁ (**Gráfico 84**). Puesto que no hubo variación apreciable de presión de poros de salida en la fase de saturación₁, se realizó el ensayo de saturación por ciclos con el objeto de obtener valores apreciables de los parámetros “**B**” de Skempton.

- Para la muestra 14996'V, se aprecia buen registro por parte de los LVDT's donde se aprecia la histéresis en las etapas de carga y descargas de presión de confinamiento trayendo como consecuencia pequeñas perturbaciones (**Gráfico 88**). En esta fase de saturación se aprecia buen registro de presión de poros de salida por lo que se realizó solo un ensayo de saturación para determinar los valores de los parámetros “**B**” de Skempton.

- Para la muestra 15121'7''V, se aprecia buen registro por parte de los LVDT's en ambas fases de saturación, donde se ve pequeñas perturbaciones en la fase de saturación₁ (**Gráfico 92**), mientras que en la fase de saturación₂, se aprecia la histéresis producto de la absorción de energía (concavidad hacia abajo) al momento del incremento de confinamiento y liberación de energía (concavidad hacia arriba) al momento de la descarga del confinamiento, mostrando además perturbaciones menos notorias sobre la muestra (**Gráfico 94**). Puesto que no hubo variación apreciable de presión de poros de salida en la fase de saturación₁, se realizó el ensayo de saturación por ciclos con el objeto de obtener valores de los parámetros “**B**” de Skempton.

✓ *Fase de fracturamiento:*

Los valores del parámetro de Skempton, “ $A_{entrada}$ ” y “ A_{salida} ”, difieren poco en sus valores, sin embargo se mantienen entre el rango de valores característicos de la **Tabla 6**, correspondiendo a posibles muestras de arcillas gravosas compactadas (con valores de A comprendido entre los -0.25 y los 0.25) o arcillas muy sobre-consolidadas (con valores de A comprendidos entre los -0.5 y 0.0). Caso particular ocurrió con la muestra 15127´9´´Hy la muestra 15121´7´´V, ya que los valores de “ $A_{entrada}$ ” y “ A_{salida} ”, difieren mucho en sus valores, y puesto que no se mantienen entre los valores característicos de la **Tabla 6** (y fuera de cualquiera los posibles rangos de caracterización), estos valores del parámetro A fueron considerados no válidos. La razón de no considerarse validos está en el hecho de que los rangos de caracterización en muestras de arcillas en general están entre los -0.5 y los 0.75.

No se aprecia una significativa variación en la presiones de poros (**Gráficos 47, 53, 59, 65, 71, 75, 79, 85, 89 y 95**).

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 14885´11´´H (**Gráfico 48**), se observa la linealidad sistema, o sea, es completamente elástico, no hay cambio de pendiente sino hasta la zona de fractura, lo que corrobora la poca porosidad de la muestra.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 14993´H (**Gráfico 54**), se observa la linealidad sistema hasta los 20 MPa (zona elástica), lo que corrobora la poca porosidad de la muestra; luego se aprecia una zona de ductibilidad entre los 20 y 25 MPa, donde la muestra absorbe energía (concavidad hacia abajo) y luego una zona de ductibilidad después de los 25 MPa.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 14996´11´´H (**Gráfico 60**), se observa la linealidad sistema solo hasta los 8MPa, esta zona corresponde al régimen elástico de la muestra, lo que corrobora la poca porosidad de la muestra, ya para los 10 MPa hasta los 21 MPa se aprecia un comportamiento plástico donde hay absorción de energía por parte de la muestra (concavidad hacia abajo), finalmente se describe una zona dúctil después de los 21 MPa donde ya las deformaciones son mayores hasta el punto de fracturamiento de la muestra.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 15014´10´´H (**Gráfico 66**), se observa la linealidad sistema solo hasta los 23 MPa, esta zona corresponde al régimen elástico de la muestra, lo que corrobora la poca porosidad de la muestra, ya para los 23 MPa hasta los 29

MPa se aprecia un comportamiento plástico donde hay absorción de energía por parte de la muestra (concavidad hacia abajo), finalmente se describe una zona dúctil después de los 29 MPa donde ya las deformaciones son mayores hasta el punto de fracturamiento de la muestra.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 15127'9'H (**Gráfico 72**), se observa la linealidad del sistema solo hasta los 19 MPa, esta zona corresponde al régimen elástico de la muestra, lo que corrobora la poca porosidad de la muestra, ya para los 19 MPa en adelante se aprecia un comportamiento plástico donde hay absorción de energía por parte de la muestra (concavidad hacia abajo) hasta los 25 MPa donde finalmente ocurre el fracturamiento de la muestra.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 14879'11'V (**Gráfico 76**), se observa la linealidad sistema solo hasta los 12 MPa, esta zona corresponde al régimen elástico de la muestra, lo que corrobora la poca porosidad de la muestra, ya para los 12 MPa en adelante se aprecia un comportamiento plástico donde hay liberación de energía por parte de la muestra (concavidad hacia arriba) hasta los 17 MPa donde finalmente ocurre el fracturamiento de la muestra.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 14883'2'V (**Gráfico 80**), se observa la poca linealidad del sistema donde, ya para los 5 MPa en adelante se aprecia un comportamiento plástico donde hay absorción de energía por parte de la muestra (concavidad hacia abajo) hasta los 19 MPa donde finalmente ocurre el fracturamiento de la muestra.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 14898'9'V (**Gráfico 86**), se observa la linealidad sistema solo hasta los 16 MPa, esta zona corresponde al régimen elástico de la muestra, lo que corrobora la poca porosidad de la muestra, ya para los 16 MPa en adelante se aprecia un comportamiento plástico donde hay absorción de energía por parte de la muestra (concavidad hacia abajo) hasta los 18 MPa donde finalmente ocurre el fracturamiento de la muestra.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 14996'V (**Gráfico 90**), se observa la linealidad sistema solo hasta los 20 MPa, esta zona corresponde al régimen elástico de la muestra, lo que corrobora la poca porosidad de la muestra, ya para los 20 MPa en adelante se aprecia un comportamiento plástico donde hay liberación de energía por parte de la muestra (concavidad hacia arriba) hasta casi los 21 MPa donde finalmente ocurre el fracturamiento de la muestra.

- En el gráfico de Esfuerzo Vs. Deformación de la muestra 1512177V (**Gráfico 96**), se observa la poca linealidad del sistema, donde el comportamiento es plástico con absorción de energía por parte de la muestra (concavidad hacia abajo) hasta los 22 MPa donde finalmente ocurre el fracturamiento de la muestra. Este comportamiento es debido a las posibles microfisuras producto de previas perturbaciones en el interior de la muestra.

El módulo de Young se calculó en tres formas diferentes: *medio*, según la pendiente de la parte lineal de la curva Esfuerzo Vs. Deformación; *tangente*, según el cociente del esfuerzo entre la deformación punto a punto en la zona más lineal de la curva; y *secante*, calculado por medio de la pendiente desde el punto cero hasta el punto de máximo esfuerzo. De igual forma se procedió con la relación de Poisson (ver **Tabla 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 y 30**).

Particularmente para la muestra 14993H se puede ver que el enchaquetado de papel de filtro no contribuye para una buena saturación de la muestra.

Para estos ensayos triaxiales, tanto para muestras horizontales como verticales, ocurre un caso particular y es el hecho de que la resistencia a la fractura del material en estudio incrementa con el aumento de la presión de confinamiento, causando sobre la muestra un comportamiento dúctil. Esto se ve bien reflejado más que todo en los ensayos sobre muestras verticales donde, en condiciones de confinamiento hidrostático, se ve el aumento de carga axial que hay que aplicarle a una muestra cuando estas se encuentran a una presión de confinamiento particular. Cada profundidad estudiada mediante ensayo triaxial se encontraba a una presión de confinamiento diferente a las de otras muestras, con el fin de ver este efecto que es producto de la presión de confinamiento. Los siguientes gráficos ilustran lo anteriormente discutido:

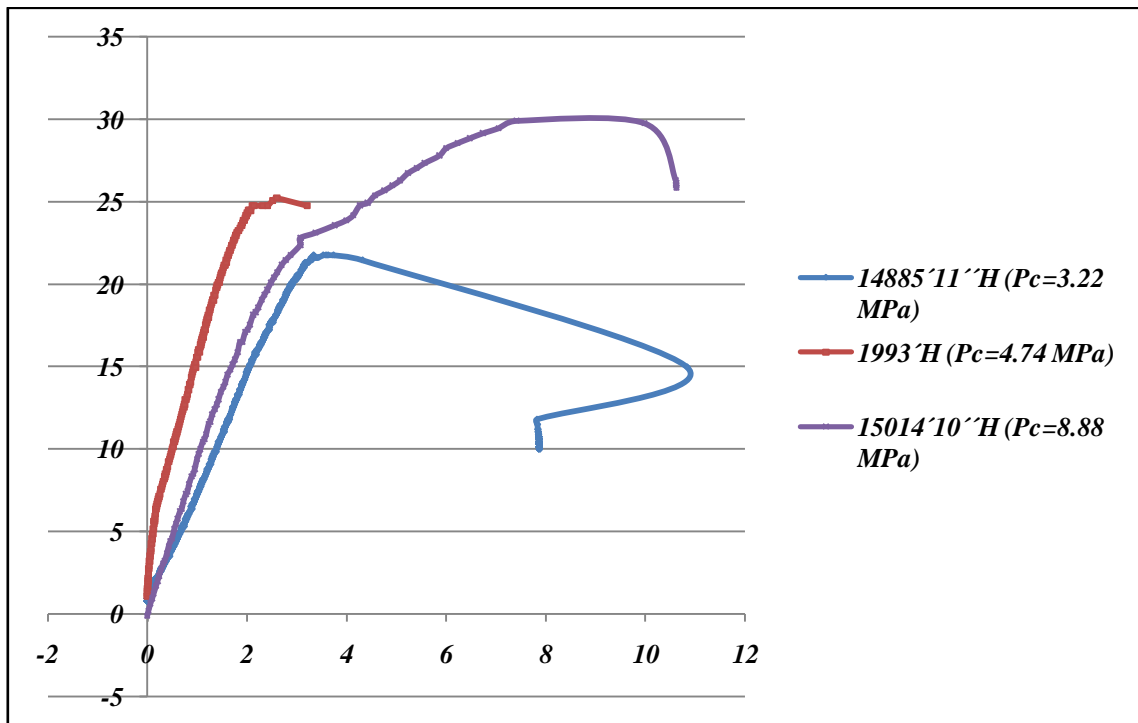


Gráfico 97. Curvas de Esfuerzo Vs. Deformación para las muestras horizontales.

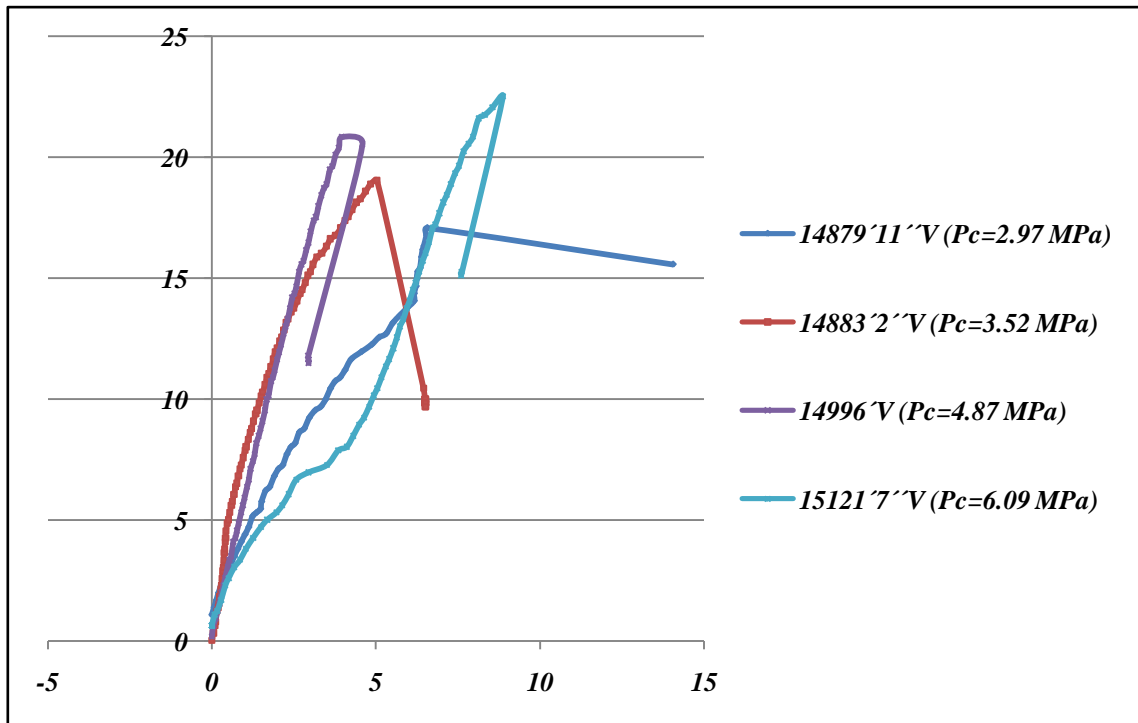


Gráfico 98. Curvas de Esfuerzo Axial Vs. Deformación para las muestras verticales.

La caracterización litológica mediante estos ensayos es corroborada por el sistema de clasificación de rocas sedimentarias propuesto en el año 1966 por Deere y Miller (**Gráfico99**) donde se aprecia que los resultados, tanto para muestras horizontales como verticales, entran en la región comprendida a la zona de lutitas como se muestra a continuación:

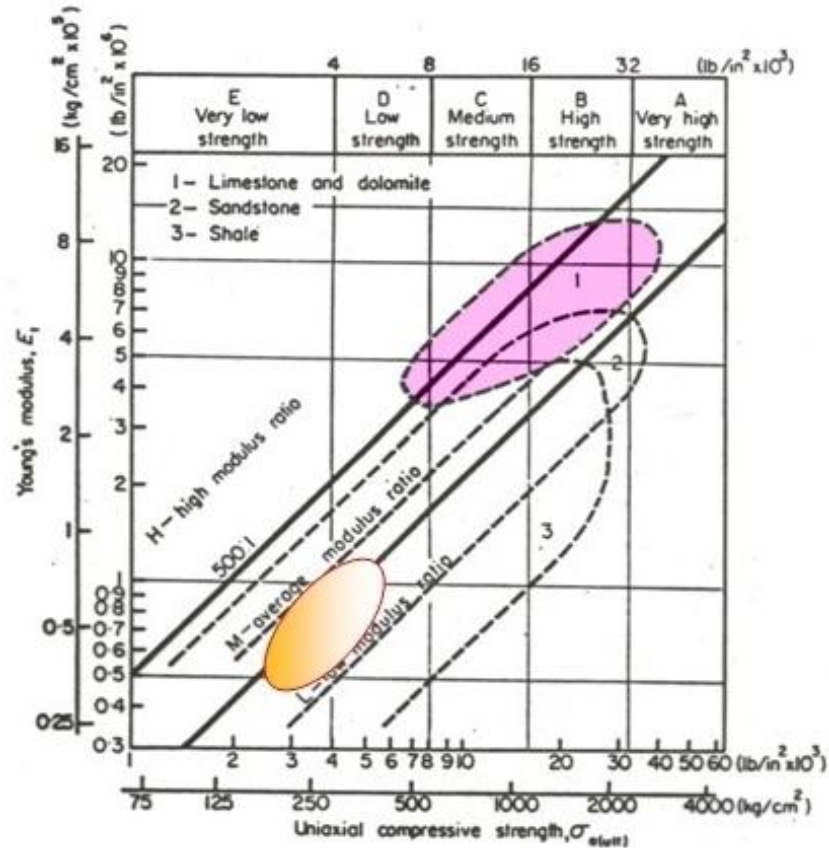


Gráfico99. Ubicación de las medidas de módulos de Young tanto para muestras horizontales como verticales en el sistema de clasificación de Deere y Miller.

Comparando muestras horizontales y verticales, se ve la gran diferencia entre los parámetros medidos como el módulo de Young donde, en promedio para muestras horizontales se tiene módulos de Young medio, tangente y secante de 7.88, 9.17 y 3.34 GPa respectivamente, mientras que para muestras verticales se tienen módulos de Young medio, tangente y secante de 4.12, 2.22 y 3.00 GPa respectivamente (casi 1.7 menor que las muestras horizontales). En cuanto a la relación de Poisson, vale acotar que estas (calculadas mediante ensayos triaxiales) no fueron muy significativas (0.1 aproximadamente) debido a que el enchaquetado utilizado, a pesar de haber permitido un buen drenaje del fluido de presión de poros, absorbía deformación radial provocando medidas no validas en la relación de la Deformación Radial Vs. Deformación Axial.

Como se mencionaba en el marco teórico, un módulo elástico puede ser expresado en términos de otro par de módulos elástico, sin embargo, de forma directa en ensayos triaxiales se puede obtener a través de relaciones de pendiente los módulos de Young y relación de Poisson donde este último no arrojó resultados representativos, es por ello que no se hizo el uso de la matriz de módulos elásticos (**Tabla 4**) para determinar los demás módulos. Para muestras tan poco permeables como la lutita, es necesario entonces un enchaquetamiento que permita el drenaje de presión de poros y que al mismo tiempo no absorba deformaciones radiales para una buena estimación de la relación de Poisson.

Las diferencias de los valores de los módulos elásticos entre muestras verticales y horizontales obtenidos mediante el ensayo acústico y mediante ensayos triaxiales, se debe en parte a la laminación de la muestra, la muestra no es isotrópica para las velocidades de ondas, además que la muestra contiene fluidos (aceite naturales), que interactúan con la onda propagada influyendo en valor de velocidades, también puede verse mediante las variaciones de los coeficientes de Lamé, los cuales son “constantes” para los ensayos acústicos y variables para los ensayos triaxiales. Por otra parte en los ensayos acústicos la energía de la onda no es suficiente para causar cambios (dilataciones y deformaciones) apreciables sobre la matriz rocosa sometida a propagación de ondas, por lo que los coeficientes de Lamé (λ y μ) se mantienen casi constantes.

Capítulo V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- Por primera vez se utiliza una metodología para ensayos triaxiales en la fase de saturación donde se modifica el estado estacionario del método tradicional de Skempton al de estados transitorios. El nuevo método resultó más adecuado ya que permitió la uniformidad y la redistribución de la presión de poros, redujo el tiempo en la fase de saturación y garantizó menos alteración de la matriz rocosa para así poder determinar los parámetros elásticos de las muestras de lutita.
- El análisis elemental semicuantitativo de las muestras indicó mayor proporción de los elementos Silicio (Si), Oxígeno (O) y Aluminio (Al), y menor proporción de Potasio (K), Hierro (Fe), Sodio (Na), Titanio (Ti) y Calcio (Ca). Los compuestos identificados fueron el cuarzo, la nacrita, la caolinita y la siderita.
- En los ensayos acústicos realizados en muestras horizontales y verticales con una relación Longitud-Diámetro menor a 1.5 ($L/D < 1.5$) se obtuvo que las velocidades de ondas “P”, “S₁” y “S₂” presentan poca variación con el aumento de la presión de confinamiento. Esto podría indicar la poca porosidad y alta compactación de las muestras. Adicionalmente la poca diferencia entre las velocidades de ondas S₁ y S₂, podría sugerir una alta homogeneidad de las muestras.
- El módulo de Young calculado a partir de los ensayos acústicos da un valor promedio de 44.81 GPa para las muestras horizontales, siendo 1.7 veces mayor que el valor promedio del módulo de Young, 26.35 GPa, para muestras verticales. Este resultado se podría atribuir a la disposición de la laminación al momento del corte de los tapones, donde en muestras horizontales con laminación vertical, las llegadas de las ondas son mucho más rápidas que en las muestras verticales cuya laminación es horizontal.
- La relación de Poisson obtenida a partir de los ensayos acústicos, presenta poca variación cuando las muestras son sometidas a una alta variación de presión confinante: Esto podría indicar poca deformabilidad y una alta fragilidad de las muestras, atribuible a la baja porosidad o al

cierre de los poros por efecto de la presión hidrostática. Las relaciones de Poisson obtenidas tienen valores comprendidos entre 0.24 y 0.26 para muestras horizontales, y valores entre 0.28 y 0.30 para muestras verticales.

- Los cocientes de las velocidades de ondas “**P**” y “**S**” obtenidos tanto para las muestras horizontales como para las muestras verticales se ajustan a la curva teórica de caracterización litológica (**Ec. 55**) estimada por Pickett. Los valores de estos cocientes están comprendidos entre 1.76 y 1.89 para muestras horizontales y entre 1.76 y 2.04 para muestras verticales, correspondientes al rango de las arcillas.

- En ensayos triaxiales en muestras con una relación Longitud-Diámetro mayor a dos ($L/D > 2$) se determinaron los parámetros “**B**” y “**A**” de presión de poros utilizando la Ley de Skempton. El valor del parámetro B dio valores entre 0 y 1 lo que indica el grado de saturación de la muestra. Los valores del parámetro “**A**” podrían corresponder a muestras de arcillas gravosas compactadas o muestras de arcillas muy sobreconsolidadas.

- En ensayos triaxiales, particularmente en la fase de fracturamiento, los módulos elásticos, módulo de Young y Relación de Poisson, se determinaron a partir de las curvas de Esfuerzo Vs. Deformación. Los valores promedios de los módulos de Young medio, tangente y secante dieron los valores 7.88, 9.17 y 3.34 GPa respectivamente, para las muestras horizontales, y 4.12, 2.22 y 3.00 GPa respectivamente, para las muestras verticales (aproximadamente 1.7 veces menor). Esta diferencia, al igual que en los ensayos acústicos, son atribuidas a la disposición de la laminación en las muestras. Los valores de módulo de Young mediante estos ensayos fueron corroborados por el sistema de clasificación de rocas sedimentarias propuesto por Deere y Miller (**Gráfico 3**) donde se puede observar que los resultados, tanto para muestras horizontales como verticales, entran en la región comprendida a la zona de lutitas. Los valores de la Relación de Poisson no corresponden con los valores característicos para este tipo de roca, dando valores comprendidos entre 0.05 y 0.1, tanto para muestras verticales como horizontales. Estos resultados podrían ser atribuidos al enchaquetado utilizado, ya que absorbe parte de la deformación radial que se induce sobre la muestra.

Recomendaciones:

- Realizar un estudio de correlación entre ensayos acústicos, triaxiales, scratch, registros sínicos de pozos, registros gamma ray y registros de densidad.
- Realizar ensayos mecánicos triaxiales mediante el uso de sistemas de drenaje de presión de poros con otro tipo de enchaquetamiento que garantice una rápida saturación del sistema y al mismo tiempo no absorba deformaciones radiales inducidas sobre la muestra. De este modo poder obtener parámetros de presión de poros más altos y poder hacer una buena correlación con los módulos elásticos obtenidos mediante ensayos geomecánicos.
- Realizar los ensayos con mayor tiempo y menores rampas de incremento de confinamiento durante la fase hidrostática debido al tipo de material utilizado en este estudio.
- Realizar estudios complementarios mediante análisis de círculos de Mohr, tomando muestras con separación de profundidad no mayores a seis pulgadas para así estimar un válido criterio de falla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MENDOZA, Jorge. *"Introducción a la Física de Rocas"*. Editorial: EQUINOCCIO. Baruta, Edo. Miranda. 1998.
2. JAEGUER, JC & COOK, NGW. *"Fundamentals of Rock Mechanic"*. 3rd Edition. Chapman & Hall. Australia. 1979.
3. JAEGUER, JC y COOK, GW and ZIMMERMAN, RW. *"Fundamentals of Rock Mechanics"*. Fourth Edition. Blackwell Publishing. Australia. 2007.
4. LAL, M. *"Shale Stability: Drilling Fluid Interacción and Shale Strength"*. SPE Latin American and Caribbean Petrol Eng Conf Held. Caracas - Venezuela. 1999.
5. ALMEIDA, Juan Carlos (Ing.). *"Evaluación de la Estabilidad Mecánica de Pozos Inclinados Mediante Seis Criterios de Resistencia Aplicados a Mecánica de Rocas"*. Trabajo Especial de Grado para Optar al Título de Magister Scientiarum en Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Postgrado de Ingeniería Mecánica. Caracas - Venezuela. 2008.
6. FJÆR, Erling. *"Laboratory Tests on artificial Rock With Controlled Crak Parameters"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997. Vol. 34. Paper 081.
7. HOLT, R:M. y FJAER, E. & RZAYEV, E. *"P- and S-Wave Velocities in Shales: Experiments and a Model"*. ARMA (American Rock Mechanics Association), 2004. ARMA/NARMS 04-543, Houston, Texas.
8. BEJARANO, Silvia. *"Estudio de los Esfuerzos Compresionales Mediante Propagación de Ondas Elásticas en Núcleos de Yacimientos Petrolíferos"*. Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Lic. en Física. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Caracas - Venezuela. 2008.
9. PICKETT, G.R. (1960). *"The Use of Acoustic Logs in the Evaluation of Sandstone Reservoirs"*. Geophysics 25:250-274.
10. PICKETT, G.R. (1963). *"Acoustic Character Logs and Their Applications in Formation Evaluation"*. JPT 15:650-667.
11. DOMENICO, S.N. (1984). *"Rock Lithology and Porosity Determination from Shear and Compressional Wave Velocity"*. Geophysics 49(8):1188-1195.
12. BUSTAMENTE, Americo (M.Sc.). *"Mecánica de Suelos Experimental y sus Aplicaciones. Ensayos de Laboratorio Para Determinar Parámetros de Resistencia al Corte en Suelos"*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima - Perú
13. TIMOSHENKO, S. y DELGADO, Tomás. *"Resistencia de los materiales. Primera Parte: Teoría Elemental y Problemas"* (Traducción al español). Editorial: ESPASA-CALPE. Madrid-España. 1957.
14. TELFORD, W.M. *"Applied Geophysics"*. 1976. Pág. (218-260), (798-813).
15. HUDSON, John A. & HARRISON, John P. *"Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles"*. Second Impression. Pergamon. Kidlington, Oxford. 2000.

16. GONZALES, Luís; FERRER, Mercedes; ORTUÑO, Luís y OTEO, Carlos. *"Ingeniería Geológica"*. Editorial: Pearson - Prentice Hall. Madrid - España. 2002.
17. FJÆR, E.; HOLT, R.M.; HORSRUD, P.; RAAEN, A.M. & RISNES, R. *"Petroleum Related Rock Mechanics"*. Second Edition. ELSEVIER. Amsterdam - The Netherlands. 2008.
18. CASAS, V. & REYES, J. *"Medición de las Propiedades Elásticas del Suelo. Guia de Estudio"*. Impresiones UCV. Caracas - Venezuela.
19. LOWRIE, W. *"Fundamentals of Geophysics"*. Cambridge University Press. Cambridge - United Kingdom. 1997.
20. ARIAS, Fidias G. *"Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica"*. Editorial: EPISTEME. Caracas - Venezuela. 2006.
21. ASTM (American Society For Testing & Materials). *"Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerance"*. D 4543 - 04, United States : ASTM International, 2004.
22. ISRM, SPE (Society of Petroleum Engineers). *"Dynamic and Static Measurements on mm-size shale samples"*. ISRM 47200, s.l. : SPE International, 1996.
23. LINGLE, R. & JONES, A.H. *"Comparison of Log and Laboratory Measured P-Waves and S-Wave Velocities. SPWLA Eighteenth Annual Logging Symposium"*. Salt Lake City - Utha (USA) : Terra Tek, Inc., June 5-8, 1977.