

Comparación de las propiedades Geomecánicas de las rocas a altas temperaturas, con rocas del sistema petrolífero a temperatura normal

Jesús Miguel Ruiz Espitia y Solys Yulieth Peña Rincón

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros de Petróleos

Director

PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo

Doctora en ingeniería química

Ingeniera de Petróleos

Codirector

Juan José Rondón López

Ingeniero de petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Programa Presencial

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Con gratitud en el corazón, dedico este logro a Dios, mi fuente de fortaleza inagotable.

A mi querida Deisy, mi segunda madre y guía en la vida, gracias por ser mi sostén y por inspirarme a ser mejor cada día.

A mis padres, Eva y Ariel, cuyo legado de amor, valores y coraje ha sido mi faro en este viaje académico.

A mis abuelos, cuyo trabajo y sacrificio han allanado el camino para que hoy pueda alcanzar mis metas.

A mis hermanas, Yenifer, Yesenia y Diamis, modelos de fuerza y determinación, gracias por ser mi apoyo incondicional.

A mis amigos y colegas, en especial a Telvia, quien, aunque ya no está físicamente, su amistad y ejemplo perduran en mi corazón.

A mi amigo Johan Ibarra, compañero de sueños y perseverancia, juntos hemos llegado lejos y aún queda mucho por recorrer.

A Solys, por su compañía y paciencia durante este arduo proceso de tesis, tu apoyo fue fundamental para alcanzar este logro.

A nuestra directora de tesis, Zuly Calderón, y a nuestro codirector Juan Rondón, su orientación y apoyo fueron clave en este camino hacia la culminación de mi trabajo de grado.

Este logro es también un tributo a todos aquellos que han formado parte de mi vida y han contribuido, de una forma u otra, a mi crecimiento y desarrollo profesional.

¡Gracias a todos por ser parte de este sueño hecho realidad!

Jesu.

En primer lugar, agradezco y honro a Dios quien ha sido mi principal guía, mi mayor apoyo en tiempos de angustia, y a la virgen María por llevarme de la mano en este largo transitar de la vida.

A mis padres, mi eterna admiración y en tributo a su legado, mi madre quien ha sido aniquiladora de miedos, trabajadora incansable y con su noble corazón ha sido capaz de creer en mi aun en momentos en los que yo he dejado de hacerlo, mi padre, este éxito académico es fruto de su trabajo y esfuerzo diario.

Dedico este trabajo en memoria de mis abuelos, Andrés y Delfina, que no lograron pisar una escuela, pero forjaron ese espíritu de lucha en sus descendientes.

A mis hermanos y sobrinos quienes han sido apoyo y alegría en mi vida, en especial a mi hermana mayor Rocio, quien ha sido una segunda madre y amiga.

A mi compañía diaria viviendo sola lejos de casa, mi perro, mi Buddy.

A mis amigos, colegas y docentes por todo el apoyo que me ofrecieron en el transcurso de mi carrera.

A mi amigo, colega y compañero de tesis Jesús Ruiz, quien ha sido una compañía y ayuda fundamental para la terminación de este trabajo de grado.

Quisiera expresar mi más sincera gratitud a nuestra directora de tesis, la ingeniera Zuly Calderón por siempre sacarnos un espacio y enseñarnos a amar esta carrera. A nuestro codirector, el ingeniero Juan Rondón por las tantas reuniones y ayuda oportuna. Ha sido un honor y privilegio trabajar bajo la tutela de estos dos grandes profesionales.

Solys.

Agradecimientos

Agradecemos este trabajo de grado a nuestra mentora y directora, Ph.D. Zuly Himelda Calderón, por su incansable orientación y apoyo desde los inicios de nuestro trabajo de investigación. Su experiencia y conocimientos fueron elementales para el desarrollo y finalización de este trabajo.

Queremos exaltar la labor del ingeniero Juan Rondón, cuyo conocimiento, consejo y paciencia fueron fundamentales para darle forma a esta investigación y nuestro crecimiento como ingenieros.

A nuestra casa, la Universidad Industrial de Santander, por las oportunidades brindadas y el acceso a incalculables libros, artículos, archivos y fuentes de información que fueron cruciales en nuestra investigación.

Tabla de Contenido

		Pág.
1.	Introducción	18
1.1.	Objetivos	20
1.1.1.	Objetivo General	20
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	20
2.	Introducción a la Geomecánica aplicada en proyectos de hidrocarburos y geotérmicos .	21
2.1.	Geomecánica aplicada a la estabilidad de pozo:.....	21
2.2.	Geomecánica aplicada al fracturamiento hidráulico:.....	21
2.3.	Geomecánica aplicada a yacimientos:	22
2.4.	Geomecánica aplicada al manejo de producción de arena:	22
2.5.	Propiedades geomecánica de las rocas	23
2.5.1.	Módulo de Young.	23
2.5.2.	Relación de Poisson.	24
2.5.3.	Módulo de rigidez o de corte.	24
2.5.4.	Módulo volumétrico.....	25
2.5.5.	Cohesión.	26
2.5.6.	Ángulo de fricción interna (φ).	27
2.6.	Esfuerzos	27
2.6.1.	Esfuerzo (σ).....	27
2.6.2.	Esfuerzos efectivos.	27
2.6.3.	Esfuerzos principales.	28
2.7.	Círculos de Mohr	28

2.7.1.	Círculo de Mohr para dos dimensiones.	28
2.7.2.	Círculo de Mohr para tres dimensiones.	29
2.7.3.	Representación gráfica de los círculos de Mohr.	29
2.8.	Criterios de falla en rocas	33
2.8.1.	Mohr-Coulomb linealizado.	33
2.8.2.	Criterio de Hoek-Brown.	33
2.8.3.	Criterio de Lade.	34
2.9.	Módulo de Young (E) vs Relación de Poisson (ν)	34
2.10.	Índice de fragilidad (BI).....	36
2.10.1.	Metodología de Hucka y Das para el cálculo del BI (%)	37
3.	Casos de estudios	38
3.1.	Caso de estudio C1. Hidrocarburos Woodford (USA)	42
3.2.	Caso de estudio C2. Hidrocarburos shale profundo (China)	42
3.3.	Caso de estudio C3: Hidrocarburos Roseneath y Murteree, Australia	43
3.4.	Caso de estudio C4. Hidrocarburos Junggar, China	45
3.5.	Caso de estudio C5. Hidrocarburos Marcellus, USA	46
3.6.	Caso de estudio C6. Geotérmico Blue Mountain, USA.....	47
3.7.	Caso de estudio C7. Geotérmico Zhacang, China	47
3.8.	Caso de estudio C8. Geotérmico Newberry, USA.....	48
3.9.	Caso de estudio C9: Geotérmico, EGS	49
3.10.	Caso de estudio C10. Geotérmico EGS, Desert Peak.....	49
3.11.	Caso de estudio C11: Geotérmico toba, Newberry.....	50
3.12.	Caso de estudio C12. Campo geotérmico Newberry	51

3.13.	Caso de estudio C13: Geotérmico Yanjiao, China	52
3.14.	Caso de estudio C14. Campo geotérmico de Patua	53
4.	Comparativa de las propiedades geomecánicas: Rocas de alta entalpía (sistemas geotérmicos) vs rocas a temperatura normal (sistemas petrolíferos).....	55
4.1.1.	Módulo de Young vs. Presión de confinamiento.....	55
4.1.2.	Relación de Poisson vs. Presión de confinamiento.....	57
4.1.3.	Módulo de Young vs. Relación de Poisson.	59
4.2.	Construcción y análisis de círculos de Mohr	62
4.2.1.	Metodología para la construcción de los círculos de Mohr.	63
4.2.2.	Círculos de Mohr, Shale - China (C2).	69
4.2.3.	Círculos de Mohr, shale – Australia (C3).	70
4.2.4.	Círculos de Mohr, Junggar - China (C4).	72
4.2.5.	Círculos de Mohr Bloques de Tobas – Newberry C (8).	76
4.2.6.	Círculos de Mohr Bloques de Tobas – Desert Peak C (10).	78
4.2.7.	Círculos de Mohr bloque de toba – Newberry C (11).	81
4.3.	Evaluación cuantitativa y análisis comparativo del índice de fragilidad.....	86
4.4.	Análisis comparativo de la influencia de la temperatura en la cohesión y el ángulo de fricción interna.	94
4.5.	Análisis y aplicabilidad de las propiedades geomecánicas en proyectos petroleros y geotérmicos.	102
4.5.1.	Consideraciones para fracturamiento hidráulico	102
4.5.2.	Consideraciones para la construcción de la ventana de lodo.	109
4.5.2.1.	Factores claves para prevenir problemas de perforación.....	110

4.5.2.2. Problemas de estabilidad de pozo	112
4.5.2.3. Factores importantes en la estabilidad de un pozo.....	113
5. Conclusiones	118
Recomendaciones	120
Referencias Bibliográficas	122
Anexos	127

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Casos de ambientes sedimentarios</i>	39
Tabla 2 <i>Casos de ambientes geotérmicos, parte 1</i>	40
Tabla 3 <i>Casos de ambientes geotérmicos, parte 2</i>	41
Tabla 4 <i>Módulos elásticos, China (C2)</i>	43
Tabla 5 <i>Módulos elásticos, Australia (C3)</i>	44
Tabla 6 <i>Módulos elásticos, Junggar (C4)</i>	45
Tabla 7 <i>Módulos elásticos, Marcellus (C5)</i>	46
Tabla 8 <i>Módulos elásticos, Newberry (C8)</i>	48
Tabla 9 <i>Módulos elásticos, Desert Peak (C10)</i>	50
Tabla 10 <i>Módulos elásticos, Newberry (C11)</i>	51
Tabla 11 <i>Módulos elásticos, Newberry (C12)</i>	52
Tabla 12 <i>Módulos elásticos, Yanjiao (C13)</i>	53
Tabla 13 <i>Módulos elásticos, Patua (C14)</i>	54
Tabla 14 <i>Clasificación dúctil o frágil de las muestras de ambientes sedimentarios</i>	60
Tabla 15 <i>Clasificación dúctil o frágil de las muestras de ambientes geotérmicos</i>	61
Tabla 16 <i>Valores de esfuerzos principales menor y mayor del shale de China (C2)</i>	65
Tabla 17 <i>Ajuste gradual de 0 a 180°</i>	66
Tabla 18 <i>Valores de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, shale de China (C2)</i>	67
Tabla 19 <i>Valores calculados de E (psi), E(BRIT%), V(BRIT%) y índice de fragilidad BI%, para muestras de ambientes geotérmicos</i>	87

Tabla 20	<i>Valores calculados de E (psi), E(BRIT%), V(BRIT%) y índice de fragilidad BI%, para muestras de ambientes sedimentarios.....</i>	88
Tabla 21	<i>Valores de índice de fragilidad a diferentes temperaturas y presiones de confinamiento de muestras sedimentarias.....</i>	90
Tabla 22	<i>Valores de índice de fragilidad a diferentes temperaturas y presiones de confinamiento de muestras geotérmicas.....</i>	91
Tabla 23	<i>Valores de cohesión y ángulo de fricción interna frente a la temperatura- Muestras sedimentarias.....</i>	94
Tabla 24	<i>Valores de cohesión y ángulo de fricción interna frente a la temperatura- Muestras geotérmicas.....</i>	95
Tabla 25	<i>Valores promedios de índice de fragilidad (BI%).....</i>	105
Tabla 26	<i>Clasificación del lodo para las muestras de ambientes sedimentarios.....</i>	116
Tabla 27	<i>Clasificación del lodo para muestras de ambientes geotérmicos.....</i>	117

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Compresión uniforme</i>	26
Figura 2 <i>Compresión de esfuerzos principales</i>	28
Figura 3 <i>Esfuerzos normales positivos</i>	29
Figura 4 <i>Esfuerzos normales negativos</i>	30
Figura 5 <i>Esfuerzo cortante negativo</i>	30
Figura 6 <i>Esfuerzo cortante positivo</i>	30
Figura 7 <i>Definición de los signos del esfuerzo</i>	31
Figura 8 <i>Representación gráfica del círculo de Mohr</i>	32
Figura 9 <i>Comparación de los diferentes criterios de fallas</i>	34
Figura 10 <i>Módulo de Young Vs Relación de Poisson</i>	35
Figura 11 <i>Diagrama esquemático de Mohr Coulomb</i>	37
Figura 12 <i>Módulo de Young vs. Presión de confinamiento</i>	56
Figura 13 <i>Relación de Poisson vs. Presión de confinamiento</i>	58
Figura 14 <i>Módulo de Young vs. Relación de Poisson</i>	61
Figura 15 <i>Círculos de Mohr, shale de China, (C2)</i>	69
Figura 16 <i>Círculos de Mohr, shale - Roseneath, Australia (C3)</i>	70
Figura 17 <i>Círculos de Mohr, shale – Murteree, Australia (C3)</i>	71
Figura 18 <i>Círculos de Mohr, Glutenita G1, Junngar - China (C4)</i>	72
Figura 19 <i>Círculos de Mohr, Glutenita G2, Junngar - China (C4)</i>	73
Figura 20 <i>Círculos de Mohr, Glutenita G3, Junngar - China (C4)</i>	74
Figura 21 <i>Círculos de Mohr, Glutenita G4, Junngar - China (C4)</i>	75

Figura 22	<i>Círculos de Mohr, bloque de Toba 3.8cm d, Newberry (C4)</i>	76
Figura 23	<i>Círculos de Mohr, bloque de Toba 2,5 cm d, Newberry (C4)</i>	77
Figura 24	<i>Círculo de Mohr, Toba riolítica, Desert Peak (C10)</i>	78
Figura 25	<i>Círculo de Mohr, Toba silíceo, Desert Peak (C10)</i>	79
Figura 26	<i>Círculo de Mohr, Toba metamudita, Desert Peak (C10)</i>	80
Figura 27	<i>Círculos de Mohr, muestra de Toba 1H, Newberry (C11)</i>	81
Figura 28	<i>Círculos de Mohr, muestra de Toba 1V, Newberry (C11)</i>	82
Figura 29	<i>Círculos de Mohr, muestra de Toba 2H, Newberry (C11)</i>	83
Figura 30	<i>Círculos de Mohr, muestra de Toba 2V, Newberry (C11)</i>	84
Figura 31	<i>Gráfico comparativo de las envolventes de falla</i>	85
Figura 32	<i>Índice de fragilidad (BI%) por muestras</i>	89
Figura 33	<i>Gráfico comparativo del índice de fragilidad vs presión de confinamiento</i>	92
Figura 34	<i>Gráfica comparativo de la cohesión vs temperatura</i>	96
Figura 35	<i>Gráfico comparativo del ángulo de fricción interna vs la temperatura</i>	98
Figura 36	<i>Gráfico de ángulo de fricción interno vs cohesión</i>	100
Figura 37	<i>Gráfico de la profundidad (ft) vs índice de fragilidad (BI%) de muestras sedimentarias</i>	103
Figura 38	<i>Gráfico de la profundidad (ft) vs índice de fragilidad (BI%) de muestras geotérmicas</i>	104
Figura 39	<i>Gráfico comparativo de la profundidad vs índice de fragilidad</i>	106
Figura 40	<i>Índice de fragilidad vs Temperatura</i>	107

Lista de Anexos

Anexo 1 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, shale de China (C2)</i>	127
Anexo 2 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, shale Roseneath – Australia (C3)</i>	128
Anexo 3 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, shale Murteree – Australia (C3)</i>	129
Anexo 4 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte parte 1, Glutenita - Junggar (C4)</i>	130
Anexo 5 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte parte 2, Glutenita - Junggar (C4)</i>	131
Anexo 6 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba 3.8 cm d, Newberry (C8)....</i>	132
Anexo 7 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba 2,5 cm d, parte 1- Newberry (C8)</i>	133
Anexo 8 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba riolítica - Desert Peak C (10)</i>	134
Anexo 9 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba silícea - Desert Peak C (10)</i>	135
Anexo 10 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba metamudita - Desert Peak C (10)</i>	136
Anexo 11 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, bloque de toba muestra 1H, Newberry C (11)</i>	137
Anexo 12 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, bloque de toba muestra IV, Newberry C (11)</i>	138
Anexo 13 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, bloque de toba muestra 2H, Newberry C (11)</i>	139
Anexo 14 <i>Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, bloque de toba muestra 2V, Newberry C (11)</i>	140

Glosario

BI: índice de fragilidad

Círculos de Mohr: técnica usada en ingeniería para la representación gráfica y calcular momentos de inercia, deformación y tensión.

Dúctil: propiedad que le permite a algunos materiales a deformarse plásticamente sin llegar a romperse.

E: módulo de Young

Entalpía: magnitud termodinámica que equivale a la suma de la energía interna del cuerpo más la multiplicación del volumen de este por la presión exterior.

Estabilidad de pozo: garantiza la seguridad dentro del pozo, ayuda a que no haya colapso durante la perforación, evita problemas como atascos, desviaciones o daños en tubería de revestimiento.

Fracturamiento hidráulico: técnica usada para aumentar la extracción de petróleo y gas.

Frágil: un material frágil carece de flexibilidad, resistencia a la fractura y no produce deformación plástica.

G: módulo de rigidez

Geomecánica: estudia el comportamiento de suelos y rocas, analiza propiedades como la resistencia, la compresibilidad y la permeabilidad del suelo.

Geotermia: rama de la ciencia que estudia las condiciones térmicas de la tierra.

Módulo elástico: es una constante que describe las propiedades elásticas de los materiales, se relaciona con la tensión y la deformación de un material.

Muestra: es una porción representativa, en el caso de esta tesis, se refiere a una porción extraída del pozo estudiado.

Presión de confinamiento: es la presión que actúa sobre las rocas desde todas las direcciones debido al peso de las capas superiores y la presión de los fluidos presentes en los poros y las rocas.

Prueba triaxial: es una prueba que mide la capacidad del suelo para resistir las fuerzas de corte.

V: relación de Poisson

Resumen

Título: Comparación de las propiedades geomecánicas de las rocas a altas temperaturas, con rocas del sistema petrolífero a temperatura normal *

Autor: Jesús Miguel Ruiz Espitia, Solys Yulieth Peña Rincón, Juan José Rondón López y Zuly Himelda Calderón Carrillo **

Palabras Clave: Geomecánica, caracterización geomecánica, yacimientos geotérmicos, pruebas triaxiales, estabilidad de pozo y yacimientos de hidrocarburos

Descripción: La presente tesis de investigación se centra en el estudio y análisis comparativo de las propiedades geomecánicas de muestras de rocas procedentes de ambientes sedimentarios y geotérmicos, teniendo presente las bondades que tiene la geomecánica para analizar temas operacionales tanto en la exploración como en desarrollo de campos de energías del subsuelo. Se lleva a cabo un análisis detallado de parámetros críticos como el módulo de Young, la relación de Poisson, el ángulo de fricción interna, el coeficiente de cohesión y el índice de fragilidad. Se analiza el comportamiento del módulo de Young y relación de Poisson en respuesta a la presión de confinamiento aplicada a las muestras de ambos ambientes, bajo condiciones de temperaturas altas y bajas, realizando un análisis comparativo riguroso. Los valores obtenidos de módulo de Young y relación de Poisson han sido de gran importancia para clasificar las muestras de rocas como dúctiles o frágiles. Posterior a esto, se procede a calcular el índice de fragilidad, parámetro esencial para analizar su comportamiento frente a la variación de la temperatura de cada campo. Por otro lado, mediante la construcción de círculos de Mohr se determinan los valores de ángulo de fricción interna y el coeficiente de cohesión, los cuales se emplean para estudiar su comportamiento mecánico bajo influencia térmica y realizar un análisis comparativo a distintas temperaturas. Los resultados de estos análisis han permitido describir las posibles implicaciones en operaciones de construcción de pozos petroleros y geotérmicos. En particular se han considerado aspectos relacionados con el fracturamiento hidráulico y la construcción de la ventana de lodo, aplicando los datos obtenidos de los casos de estudios experimentales para una comprensión más profunda de estos procesos. Concluyendo que para los casos estudiados en esta tesis si el campo presenta mayor presión y temperatura la roca tiene un comportamiento más dúctil, por esto su deformación puede ser mayor y si el campo está a baja temperatura su comportamiento es frágil.

* Trabajo de Grado

**Grupo de Investigación en Estabilidad de Pozo (GIEP), Escuela de Ingeniería de Petróleos, Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Universidad Industrial de Santander (UIS). Director: PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo. Codirector: Juan José Rondón López. Ingeniero de Petróleos.

Abstract

Title: Comparison of the geomechanical properties of rocks at high temperatures, with rocks of the petroleum system at normal temperature. *

Author(s): Jesús Miguel Ruiz Espitia, Solys Yulieth Peña Rincón, Juan José Rondón López y Zuly Himelda Calderón Carrillo. **

Key Words: Geomechanics, geomechanical characterization, geothermal reservoirs, triaxial testing, well stability, and hydrocarbon reservoirs.

Description: This research thesis focuses on the study and comparative analysis of the geomechanical properties of rock samples from sedimentary and geothermal environments, bearing in mind the benefits of geomechanics to analyze operational issues both in the exploration and development of subsurface energy fields. A detailed analysis of critical parameters such as Young's modulus, Poisson ratio, internal friction angle, cohesion coefficient and fragility index has been carried out. The behavior of Young's modulus and Poisson's relationship in response to the confinement pressure applied to samples from both environments was analyzed, under conditions of high and low temperatures, performing a rigorous comparative analysis. The values obtained from Young's modulus and Poisson's ratio have been of great importance for classifying rock samples as ductile or brittle. After this, the fragility index was calculated, an essential parameter to analyze its behavior in the face of temperature variation. In addition, the values of the internal friction angle and the coefficient of cohesion were determined by means of the construction of Mohr circles, which were used to study their thermal behavior and perform a comparative analysis at different temperatures. The results of these analyses have made it possible to describe the possible implications for oil and geothermal well construction operations. In particular, aspects related to hydraulic fracturing and mud window construction have been considered, applying the data obtained from the experimental case studies for a deeper understanding of these processes. Concluding that for the cases studied in this thesis, if the field presents higher pressure and temperature, the rock exhibits a more ductile behavior, which means its deformation can be greater, and if the field is at a lower temperature, its behavior is brittle.

* Thesis.

** Grupo de Investigación en Estabilidad de Pozo (GIEP), Escuela de Ingeniería de Petróleos, Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Universidad Industrial de Santander (UIS). Director: PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo. Codirector: Juan José Rondón López. Ingeniero de Petróleos.

1. Introducción

La transición energética es uno de los grandes retos que presenta la sociedad en la actualidad, y para afrontar esta necesidad en conjunto con la industria se han venido desarrollando nuevos estudios y herramientas que permitan fortalecer el mercado de las energías limpias. Para complementar las temáticas energéticas, la energía geotérmica se considera como una alternativa de interés por los beneficios técnico-ambientales que representa. Esta energía está asociada a la energía de calor almacenada por debajo de la superficie de un terreno; además, es una fuente de energía consolidada, fiable y autóctona que no requiere la manipulación de combustibles y presenta estabilidad operacional frente a las oscilaciones térmicas estacionales.

Es importante mencionar que existen muchas técnicas, conceptos, y herramientas que son utilizadas en la industria de los hidrocarburos, que pueden ser extrapoladas para que haya un mejor entendimiento, estudio y aplicación en el desarrollo de yacimientos geotérmicos, como es el caso de la perforación de pozos, evaluación del potencial geotérmico, estudio de fracturas, entre otros aspectos análogos a lo que requiere la energía geotérmica.

El análisis de la fragilidad se hace mediante la correlación propuesta por Fernández, Quintero & Calderón (2015), para estimar esta variable se utilizan las ecuaciones 12, 13 y 14, las cuales requieren la obtención de la relación de Poisson y el Módulo de Young, estos parámetros se derivan de los casos de estudios experimentales analizados. Estas variables están en función de la temperatura y de acuerdo con los autores (Macia & Rolando, 2013) la temperatura puede generar un cambio en el módulo de Young ya que este disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Teniendo presente las consideraciones mencionadas y el papel fundamental que pueden tener los avances de la industria de los hidrocarburos en el desarrollo de la energía geotérmica, es fundamental realizar un análisis comparativo de las propiedades de las rocas de alta entalpía con

las rocas de sistemas petrolíferos a temperatura normal, ya que las propiedades geomecánicas juegan un papel crucial tanto en la industria petrolera como en el desarrollo de la energía geotérmica, permitiendo aumentar el rendimiento de los yacimientos y mejorar los diseños de fracturas naturales; también reduce el riesgo colapso del revestimiento y de las formaciones. Además, tiene un impacto significativo en temas económicos, al disminuir los costos de perforación. Estas son solo algunas consideraciones que permiten tomar decisiones claves en la perforación y estabilidad de pozos para la producción de energía limpia.

El presente trabajo de investigación inicia con la descripción de las propiedades geomecánicas de las rocas, los esfuerzos, los criterios de falla, y el índice de fragilidad. Luego se detallan los 14 casos de estudios de esta investigación para proceder con la comparativa de las propiedades geomecánicas, por medio de la construcción del círculo de Mohr, el análisis comparativo del índice de fragilidad, análisis de la influencia de temperatura en la cohesión y el ángulo de fricción interno. Posteriormente se realiza el análisis de aplicabilidad de las propiedades geomecánicas en proyectos petroleros y geotérmicos. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Comparar las propiedades geomecánicas de las rocas de alta entalpía con rocas de sistemas petrolíferos usando resultados de laboratorio presentados en la literatura con el fin de plantear posibles implicaciones prácticas en operaciones de campos geotérmicos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Describir las propiedades geomecánicas y los parámetros de resistencia de las rocas, que serán tenidos en cuenta para hacer el análisis comparativo, tales como módulo de Young, cohesión, ángulo de fricción interna, relación de Poisson, entre otros.
- Documentar casos de estudio de pruebas experimentales presentados en la literatura para rocas de alta entalpía y sistemas petrolíferos.
- Analizar los estudios publicados en la literatura y comparar las propiedades geomecánicas de las rocas de alta entalpía con rocas del sistema petrolífero.
- Definir posibles implicaciones en operaciones de campos geotérmicos y petroleros, tales como estabilidad de pozos, fracturamiento y evaluación de recursos, a partir del análisis comparativo de propiedades geomecánicas y parámetros de resistencia, con sistemas petrolíferos.

2. Introducción a la Geomecánica aplicada en proyectos de hidrocarburos y geotérmicos

La Geomecánica es la disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas de formación. La Geomecánica se basa en los conceptos y teorías de la mecánica de rocas y mecánica de suelos, que relacionan el comportamiento de la formación bajo los cambios de esfuerzos, de las operaciones de perforación, completamiento y producción de pozos en el subsuelo (Vásquez, 2001).

La Geomecánica tiene diversas aplicaciones tanto en la industria del petróleo y gas como en la industria geotérmica. Entre estas aplicaciones se destacan:

2.1. Geomecánica aplicada a la estabilidad de pozo:

La geomecánica en la estabilidad de pozo ayuda a predecir los requerimientos de la densidad del lodo de perforación para prevenir derrumbes excesivos, atascamiento de tuberías, producción de arenas y pérdida de circulación debido al fracturamiento hidráulico de la pared del pozo. Así mismo, este análisis se utiliza para evaluar la influencia de la dirección y la inclinación del pozo en su estabilidad mecánica (Fernández & Alvarelos, 2012).

2.2. Geomecánica aplicada al fracturamiento hidráulico:

La geomecánica permite controlar el diseño de las fracturas hidráulicas, que son una técnica que consiste en la inyección de un fluido a presión denominado fluido de fractura con el objetivo de transmitir la presión hidráulica en la roca hasta fracturarla por tensión, esto ayuda a mejorar y aumentar la producción de los pozos al crear fisuras en las rocas que faciliten el flujo de los fluidos (Angel, 2012).

2.3. Geomecánica aplicada a yacimientos:

La Geomecánica analiza los efectos de inyección y producción de fluidos en los pozos en el comportamiento mecánico del yacimiento, también ayuda a determinar la dirección óptima de pozos desviados y horizontales que intercepten el mayor número de fracturas naturales con el fin de aumentar la producción de fluidos (Angel, 2012).

2.4. Geomecánica aplicada al manejo de producción de arena:

La producción de arena es causada cuando la roca debilitada sometida a un bajo esfuerzo de confinamiento es arrastrada dentro del pozo por las fuerzas del flujo. Por consiguiente, gracias a la geomecánica es necesario conocer el estado de esfuerzos y la envolvente de falla de la formación para poder determinar el gradiente de producción (Drawdown) crítico con el fin de evitar la producción de arena (Angel, 2012).

Dado lo anterior, la geomecánica hoy día juega un papel fundamental en la industria petrolera, su importancia radica en la capacidad de aumentar el rendimiento de un yacimiento mediante la realización y mejora de los diseños de fracturas naturales, de esta forma se reduce el colapso del revestimiento y se disminuyen o eliminan las tuberías atascadas, se reducen los colapsos en las formaciones, y sobre todo, en el tema económico que se pueden reducir los costos al disminuir el tiempo de la perforación.

2.5. Propiedades geomecánica de las rocas

2.5.1. Módulo de Young.

El módulo de Young conocido también como módulo elástico (Y), es la constante de proporcionalidad o gradiente de la curva en una gráfica de esfuerzo vs. deformación axial en la misma dirección en la que se aplica la fuerza ecuación (1) y corresponde a una propiedad constante para un elástico-lineal. Este es uno de los métodos más extendidos usados para conocer la elasticidad de un material. El módulo de Young se puede usar para comprobar el resultado entre distintos materiales o medir la rigidez de un material sólido, (Calderón, 2014).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Donde

$\sigma =$ Es el esfuerzo uniaxial de tensión o compresión

$\varepsilon =$ Es la deformación normal

El módulo de elasticidad es una de las propiedades más importantes usadas en el desarrollo de las ecuaciones de las propiedades mecánicas de los materiales. Así que debe recordarse que E, solo puede utilizarse si un material tiene un comportamiento elástico lineal. También se usa si el esfuerzo en el material es mayor que el límite proporcional, el diagrama de esfuerzo-deformación deja de ser una línea recta y la ecuación $\sigma = E * \varepsilon$ ya no es válida.

2.5.2. *Relación de Poisson.*

La relación de Poisson se define como la relación entre la deformación radial y la deformación longitudinal de una roca sometida a un esfuerzo axial, ecuación (2) y describe que tendencia de deformación presenta la roca, bien sea expansión lateral o contracción axial. Se fracturará con mayor facilidad bajo esfuerzos, por ejemplo, a menor relación de Poisson, la roca tendrá una mayor tendencia a fracturas. (Fernández, Quintero, & Calderón, 2015).

$$V = \frac{\partial \varepsilon \text{ radial}}{\partial \varepsilon \text{ longitudinal}} \quad (2)$$

Donde:

$V = \text{Relación de Poisson [adimensional]}$

$\partial \varepsilon \text{ radial} = \text{Deformación radial [adimensional]}$

$\partial \varepsilon \text{ longitudinal} = \text{Deformación longitudinal [adimensional]}$

2.5.3. *Módulo de rigidez o de corte.*

El módulo de rigidez también es conocido como módulo de cizalla o módulo de corte, este se define como la relación entre el esfuerzo de corte y la deformación de corte, ecuación (3).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3)$$

Donde:

$\tau = \text{Es el esfuerzo de corte}$

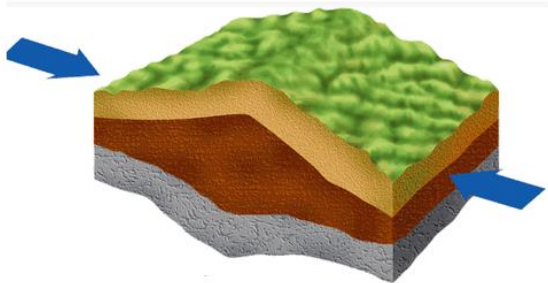
$\gamma = \text{Es la deformación a corte}$

El módulo de rigidez, o el módulo de cizallamiento, se utiliza para determinar qué tan elásticos o flexibles serán los materiales si se cortan, que se empujan en paralelo desde lados opuestos. Esta propiedad se convierte en la parte útil de muchos cálculos y se denomina coeficiente de elasticidad durante el cizallamiento. Puede medirse mediante una prueba de esfuerzo cortante, que se realiza colocando una varilla de un material determinado en una abrazadera y aplicando fuerza a una distancia medida de la abrazadera a solo un lado de la varilla.

En niveles minúsculos, el módulo de rigidez se relaciona con los átomos que se deslizan unos sobre otros. Esto ayuda a explicar por qué la temperatura y la presión también lo afectan. Cuanto más frío es un objeto y más presión está bajo, más rígido o rígido se vuelve. A altas temperaturas y bajas presiones, la mayoría de los materiales comienzan a derretirse y se vuelven más fáciles de doblar (Spiegato, 2024).

2.5.4. Módulo volumétrico.

El módulo de volumen es una constante que describe qué tan resistente es una sustancia a la compresión. Se define como la relación entre el aumento de presión y la disminución resultante en el volumen de un material, ecuación (4). Si bien se aplica a la compresión uniforme de cualquier sustancia, se usa con mayor frecuencia para describir el comportamiento de los fluidos. Se puede utilizar para predecir la compresión, calcular la densidad e indicar indirectamente los tipos de enlaces químicos dentro de una sustancia. El módulo de volumen se considera un descriptor de propiedades elásticas porque un material comprimido vuelve a su volumen original una vez que se libera la presión (Greelane, 2019).

Figura 1*Compresión uniforme*

Nota. Fuente: (Geologyscience, 2024)

Ecuación del módulo de compresibilidad (K)

$$K = -v * \frac{\Delta p}{\Delta v} \quad (4)$$

Donde:

p = Es la presión

v = Es el volumen

Δv = Cambios de volumen

Δp = Cambios de presión

2.5.5. Cohesión.

La cohesión es una medida de la fuerza de adherencia entre las partículas de la formación y, por lo tanto, es una propiedad intrínseca de la resistencia de la roca; dichas fuerzas se deben a la atracción entre los enlaces químicos en los puntos de contacto superficiales entre las partículas. En términos prácticos, representa la resistencia al corte, y es inherente del material (Irausquin, 2014).

2.5.6. *Ángulo de fricción interna (φ).*

El ángulo de fricción interna es la relación entre las resistencias al corte y compresivas del material; se determina de forma experimental por ensayos triaxiales en núcleos de una misma profundidad sometidos a varias presiones de confinamiento (Irausquin, 2014).

2.6. Esfuerzos

2.6.1. *Esfuerzo (σ).*

El esfuerzo se puede definir como la fuerza por unidad de área. La tercera ley de Newton, ley de acción y reacción es llamada también Ley de Esfuerzo, la cual expresa que, para cada acción siempre hay una reacción igual, pero de sentido contrario; esto refleja que cada esfuerzo es en realidad una, de un par de fuerzas iguales, pero de sentido contrario. Por ejemplo, si una roca se presiona con el dedo, el dedo es presionado en la dirección opuesta, con la misma fuerza por la roca (Calderón, 2014).

2.6.2. *Esfuerzos efectivos.*

Según Aadnoy (1999), el principio de los esfuerzos efectivos dice que la tensión en la matriz de la roca es la tensión total menos la presión intersticial. Esto es usado usualmente en la mecánica de las rocas para conocer la roca y la resistencia de la matriz de la roca.

Matemáticamente el esfuerzo efectivo se puede expresar como:

$$\sigma' = \sigma - P_o \quad (5)$$

Donde:

σ' = *Esfuerzo efectivo*

σ = *Esfuerzo total*

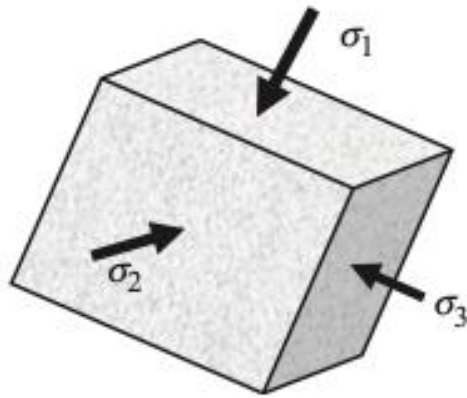
P_o = *Presión de poro*

2.6.3. Esfuerzos principales.

Según Zhang (2019), es posible demostrar que hay un conjunto de ejes con respecto a los cuales todos los esfuerzos cortantes son cero, y los tres esfuerzos normales tienen sus valores extremos. La siguiente imagen, figura 2, muestra los componentes de esfuerzos principales en un plano principal.

Figura 2

Compresión de esfuerzos principales



Nota. Fuente: Imagen tomada del libro Applied petroleum geomechanics, Zhang, J.2019.

Los tres planos mutuamente perpendiculares se llaman planos principales y los tres esfuerzos normales que actúan sobre estos planos se llaman esfuerzos principales.

2.7. Círculos de Mohr

2.7.1. Círculo de Mohr para dos dimensiones.

Según Zhang (2019), el círculo de Mohr o el diagrama de Mohr es una herramienta útil para representar el estado de tensión y falla de la roca. El círculo de Mohr se puede usar para determinar gráficamente los componentes de tensión que actúan sobre un sistema de coordenadas rotadas, es decir, que actúan sobre un plano orientado diferente que pasa por un punto particular.

2.7.2. *Círculo de Mohr para tres dimensiones.*

Para construir círculos de Mohr para un caso tridimensional de esfuerzos en un punto, primero se deben evaluar los valores de los esfuerzos principales (1, 2, 3) y sus direcciones principales (n_1 , n_2 , n_3). Cuando se dispone de las tensiones principales, se pueden trazar los círculos de Mohr tridimensionales (Parry, 2004).

2.7.3. *Representación gráfica de los círculos de Mohr.*

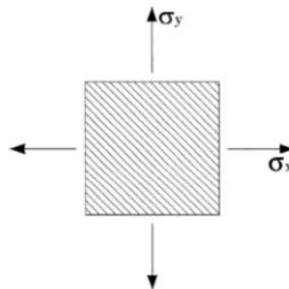
Las ecuaciones de σ_{x1} y τ_{x1y1} son las ecuaciones paramétricas de un círculo. Esto llevó al autor Otto Mohr a presentar el método gráfico que lleva su nombre. Para la correcta aplicación del círculo de Mohr es importante establecer una convención de signos (Vallecilla, 2002).

La teoría de la elasticidad emplea lo siguiente:

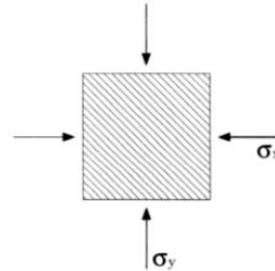
- Son positivos los esfuerzos normales de tracción y son negativos los esfuerzos normales de compresión.
- El esfuerzo cortante τ_{xy} (x = cara positiva, y = dirección positiva) es positivo si tiende a producir una rotación del elemento en sentido antihorario.
- De acuerdo con b) el eje de las ordenadas será “positivo hacia abajo”.

Figura 3

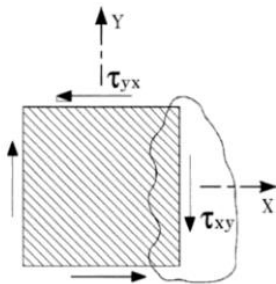
Esfuerzos normales positivos



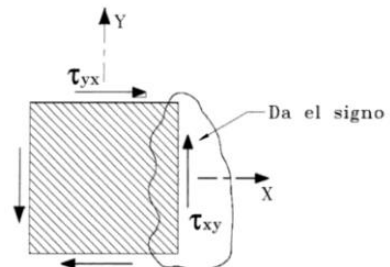
Nota. Adaptado de Vallecilla (2002).

Figura 4*Esfuerzos normales negativos*

Nota. Adaptado de Vallecilla (2002).

Figura 5*Esfuerzo cortante negativo*

Nota. Adaptado de Vallecilla (2002).

Figura 6*Esfuerzo cortante positivo*

Nota. Adaptado de Vallecilla (2002).

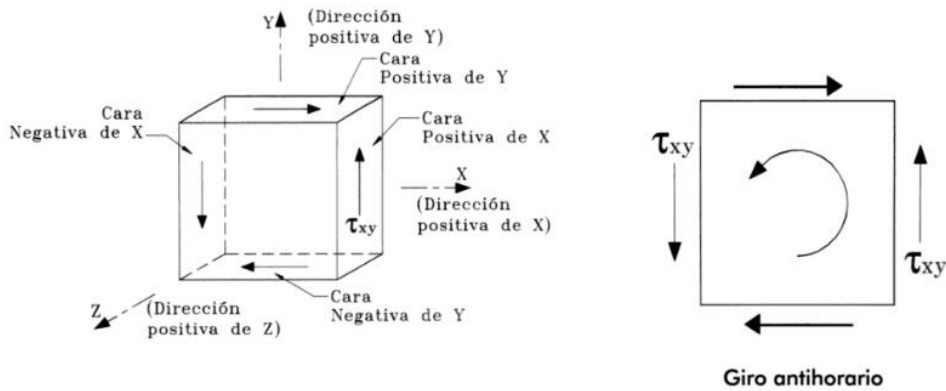
Notación: τ_{xy} = Esfuerzo cortante que actuando en la cara X tiene la dirección del eje Y.

Según el autor Vallecilla (2020), afirma que para definir el signo del esfuerzo cortante basta tan solo fijar el signo de τ_{xy} . La convención de la teoría de la elasticidad supone que τ_{xy} es positivo

si actúa en la cara positiva del eje X y tiene la dirección positiva del eje Y, o lo contrario: τ_{xy} es positivo si actúa en la cara negativa de X en la dirección negativa de Y (P. 14).

Figura 7

Definición de los signos del esfuerzo



Nota. Adaptado de Vallecilla (2002).

Esfuerzo plano: $Z = 0$

Retomando a las ecuaciones para σ_{x_1} y $\tau_{x_1y_1}$

$$\sigma_{x_1} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} * \cos 2\theta + \tau_{xy} * \text{sen}2\theta \tag{ 6 }$$

$$\tau_{x_1y_1} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} * \text{sen} 2\theta + \tau_{xy} * \text{cos}2\theta \tag{ 7 }$$

σ_{x_1} = Esfuerzo normal a lo largo del eje X_1

$\tau_{x_1y_1}$ = Esfuerzo cortante en la cara X_1 , en la dirección Y_1

Si elevamos al cuadrado las expresiones de σ_{x_1} y $\tau_{x_1y_1}$ y se suman, se obtiene:

$$\left(\sigma_{x_1} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{x_1y_1}^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \tag{ 8 }$$

En esta ecuación σ_x , σ_y , τ_{xy} son conocidos y σ_{x1} y τ_{x1y1} con las incógnitas. Esta ecuación puede escribirse como $(\sigma_{x1} - C)^2 + \tau_{x1y1}^2 = R^2$, donde $C = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$ y $R^2 = (\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2$. Esta es la ecuación de un círculo de R con centro en (C,0), (P. 15).

Definiendo:

$$\sigma_{Promedio} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad \text{Abscisa del centro C del círculo de Mohr (9)}$$

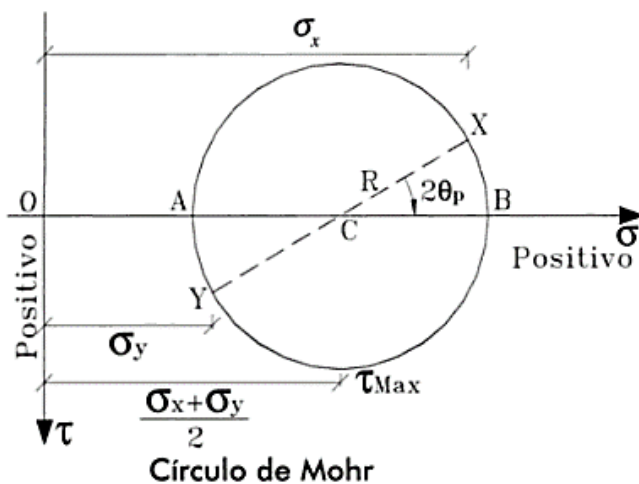
$$R = \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2} \quad R = \text{Radio del círculo de Mohr (10)}$$

Y sustituyendo en σ_{x1} :

$$(\sigma_{x1} - \sigma_{Promedio})^2 + \tau_{xy}^2 = R^2 \quad \text{Ecuación de un círculo de radio R y centro } (\sigma, 0) \quad (11)$$

Figura 8

Representación gráfica del círculo de Mohr



Nota. $\overline{CX} = \overline{CY} = R$; Coordenadas de X y Y (para este círculo): X ($\sigma_x, -\tau_{xy}$) Y ($\sigma_x, +\tau_{xy}$);

$\sigma_B =$ Esfuerzo principal máximo; $\sigma_A =$ Esfuerzo principal mínimo. Adaptado de Vallecilla (2002).

2.8. Criterios de falla en rocas

A través del tiempo se han propuesto muchos criterios de falla para describir a la resistencia de la roca, estos están basados en los límites de fluencia que tienen las rocas. La finalidad de estos criterios es utilizar de la mejor manera los datos de resistencia que se obtienen en los laboratorios de casos reales, es decir, provienen de estudios hechos a núcleos sacados de pozos (Zoback, 2008) P. 94.

2.8.1. Mohr-Coulomb linealizado.

El autor Zoback (2008), afirma que este criterio de falla supone que el esfuerzo principal intermedio no tiene influencia en la falla. Como se ve en el espacio $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, la superficie de fluencia del criterio linealizado de Mohr-Coulomb es una pirámide hexagonal recta igualmente inclinada a los ejes de esfuerzos principales. La intersección de estas superficies de fluencia con el plano π es un hexágono. El plano π es el plano perpendicular a la línea recta $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. La (Figura 9) muestra que la superficie de fluencia del criterio linealizado de Mohr Coulomb es hexagonal en el plano π (p. 94).

2.8.2. Criterio de Hoek-Brown.

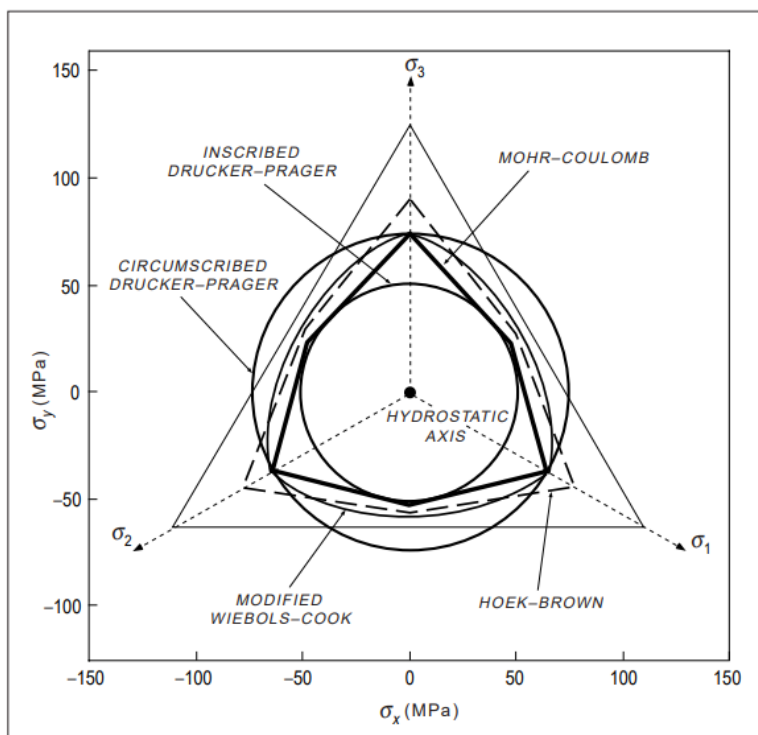
Es un criterio empírico que utiliza como parámetro de escala a la resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso intacto e introduce dos parámetros adimensionales (Zoback, 2008) P. 94.

2.8.3. Criterio de Lade.

El criterio de Lade es un criterio de falla tridimensional que se desarrolló para materiales friccionales sin cohesión efectiva. Se desarrolló originalmente para suelos con envolventes curvas de falla (Zoback, 2008) P. 99.

Figura 9

Comparación de los diferentes criterios de fallas



Nota. Envolventes de rendimiento proyectadas en el plano π para el criterio de Mohr Coulomb y el criterio de Hoke-Brown. Adaptado de Zoback (2008)

2.9. Módulo de Young (E) vs Relación de Poisson (V)

Grieser & Bray (2007), sugieren que la relación de Poisson y el módulo de Young son los parámetros más importantes medidos, debido a que estos parámetros se utilizan para identificar

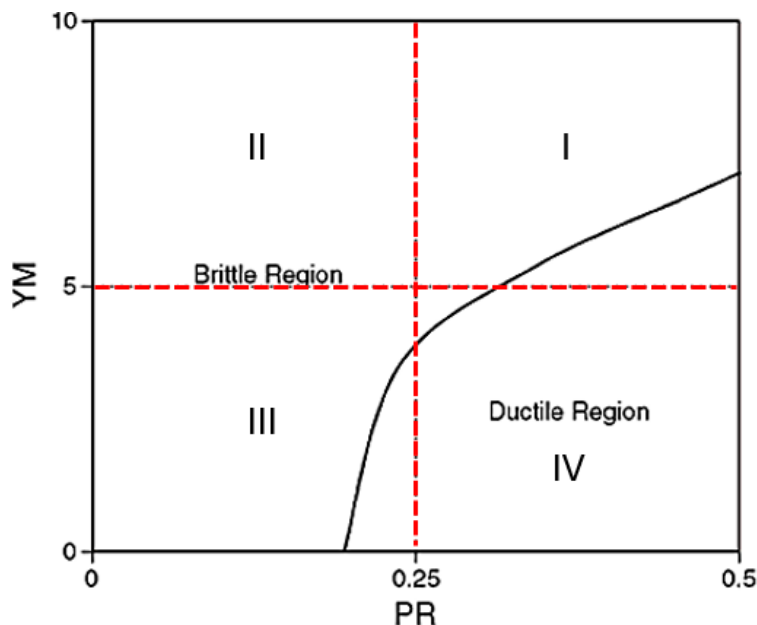
intervalos dúctiles y frágiles en las rocas y para determinar las barreras de tensión, en la figura 10 se puede observar el diagrama cruzado de la relación de Poisson y el módulo de Young que indican regiones dúctiles y frágiles.

En este trabajo de grado, se ha segmentado el gráfico de módulo de Young Vs relación de Poisson en cuatro cuadrantes figura 10, usando la metodología propuesta por Grieser & Bray (2007). Este enfoque permite clasificar cada muestra de roca en dúctil o frágil de acuerdo con su ubicación espacial en el gráfico, lo que se ha denominado de la siguiente manera:

- Cuadrante I: zona frágil por encima de la curva, zona dúctil por debajo de la curva.
- Cuadrante II: zona completamente frágil.
- Cuadrante III: zona frágil a la izquierda de la curva, zona relativamente dúctil a la derecha de la curva.
- Cuadrante IV: Zona completamente dúctil.

Figura 10

Módulo de Young Vs Relación de Poisson



Nota. Diagrama cruzado del módulo de Young y de la relación de Poisson que indica zonas frágiles y dúctiles. Adaptado de Grieser & Bray (2007).

2.10. Índice de fragilidad (BI)

El índice de fragilidad (BI) es un parámetro expresado en porcentaje, que indica que tan frágil es la roca, por ejemplo, con que facilidad se van a desarrollar las fracturas ante un eventual fallamiento. Dicho parámetro se puede expresar en función del módulo de Young y la relación de Poisson como módulos estáticos, ecuaciones (12, 13, 14) o como módulos dinámicos derivados de datos de inversión sísmica. A mayor módulo de Young la roca se deforma menos bajo una carga de esfuerzo, por lo tanto, es más propensa a fallar; a menor relación de Poisson la roca sufre una menor extensión lateral, por lo tanto, será menos flexible y más propensa a fallar bajo esfuerzos (Fernández, Quintero, & Calderón, 2015).

$$E_{BRIT} = \left| \frac{ES - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \right| * 100 \quad (12)$$

$$V_{BRIT} = \left| \frac{VS - V_{max}}{V_{min} - V_{max}} \right| * 100 \quad (13)$$

$$BI = \left| \frac{E_{BRIT} + V_{BRIT}}{2} \right| * 100 \quad (14)$$

Donde:

E_{BRIT} = Fragilidad con base en el módulo de Young (%).

ES = Módulo de Young medido (psi).

E_{min} = $1 E + 06$ (psi), más elástico.

E_{max} = $10 E + 06$ (psi), más frágil.

V_{BRIT} = Fragilidad con base en la relación de Poisson (%).

$VS =$ Relación de Poisson medida (adimensional).

$V_{min} = 0.05$ (adimensional), más frágil.

$V_{max} = 0.4$ (adimensional), más elástico.

$BI =$ índice de fragilidad (%)

2.10.1. Metodología de Hucka y Das para el cálculo del BI (%)

Para el cálculo del índice de fragilidad los autores Meng, Wong, & Zhou (2021), sugieren que estos valores “están simplemente asociados con el ángulo de fricción interna” como se puede observar en la ecuación 15. (p.15).

$$BI = \text{sen}(\varphi) \quad (15)$$

Donde:

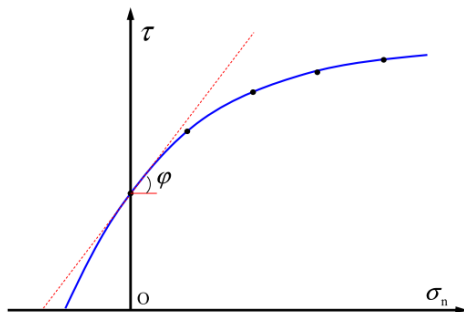
$BI =$ índice de fragilidad (%)

$\varphi =$ Ángulo de fricción interno ($^{\circ}$)

Esta ecuación de índice de fragilidad (Ecuación 15), está determinada por la pendiente de la envolvente de Mohr en $\sigma_n = 0$ (Figura 11). Según los autores Hucka & Das (1974), se cree que “una roca más frágil se caracterizaba por un mayor ángulo de fricción interna”.

Figura 11

Diagrama esquemático de Mohr Coulomb



Nota. Diagrama esquemático sobre la determinación del ángulo de fricción interna a partir de la envolvente de Mohr. σ_n y τ son el esfuerzo normal y la resistencia al cizallamiento. Adaptado de Meng, Wong, & Zhou, (2021).

3. Casos de estudios

La búsqueda de información bibliográfica se centra en la documentación e identificación de estudios de pruebas experimentales, que analicen y/o describan las propiedades geomecánicas a muestras de rocas de ambientes sedimentarios y geotérmicos. En esta tesis se analizan 14 casos de estudios, sistemáticamente catalogados como **C1** a **C14** respectivamente. Cada caso representa un artículo de investigación que contribuyen al entendimiento de las propiedades geomecánicas de las rocas. La estructura de este capítulo permite una exploración detallada de las pruebas experimentales enfocándose en rocas de alta y baja entalpía.

En cada caso se presenta una descripción general que incluye el contexto y relevancia del estudio, seguido de una tabla que muestra los valores del módulo de Young, relación de Poisson. Estos parámetros son de mucha importancia para entender el comportamiento elástico de las rocas bajo cargas y también medir el índice de fragilidad, lo que a su vez es esencial para aplicaciones prácticas en la ingeniería geotérmica y de petróleo.

Las Tablas 1, 2, 3, resumen los resultados de los 14 casos experimentales antes mencionados (C1 a C14) que analizan las propiedades geomecánicas de muestras de rocas provenientes de ambientes geotérmicos y sedimentarios. Cada estudio proporciona datos relevantes sobre el comportamiento elástico y la fragilidad de las rocas. Los casos están organizados por tipo de muestra, y características físicas y mecánicas de mayor importancia.

Tabla 1*Casos de ambientes sedimentarios*

Tipo de muestra	Muestras sedimentarias					
N°	C1	C2	C3		C4	C5
Nombre del campo	Woodford	----	Roseneath	Murteree	Junggar	Marcellus
Ubicación	Woodford	China	Australia	Australia	Junggar, China	EE. UU.
Tipo de roca	Shale	Shale	Shale	Shale	Glutenita	Shale
Profundidad de recuperación de la muestra (ft)	14000	25 - 20028,74	10390,51 - 10882,55	11225,39 - 11613,97	10991,35	9361,5 - 13488,5
Gradiente de temperatura (°C)	----	130 - 145	446	447	20	----
Composición mineralógica (%)	Illita [42%], Cuarzo [34%], Feldespato [13%], Clorito [9%], Pirita [2%]	Cuarzo, feldespato y pirita [45 - 55 %], Minerales de carbón [10 - 16%], Minerales de arcilla [38 - 45]	Quarzo [35,75%], Carbonato [11,75%], Arcilla [44,25%]	Quarzo [39,25%], Carbonato [10,25%], Arcilla [44,5%]	----	Carbono orgánico [2,0 - 13 %]; Sílice [25%]; Carbonato [25%]
Presión de confinamiento (Gpa)	10	0 - 0,09	0,01 - 0,04	0,01 - 0,04	0,01 - 0,03	----
Módulo de Young Promedio (Gpa)	12,44	21,8	16,7 - 13,9	22,5 - 23,6	0,01953 - 0,03540	16,1 - 20,1
Relación de Poisson Promedio	----	0,251	0,283 - 0,2	0,29 - 0,26	0,104 - 0,248	0,22 - 0,25
Módulo Volumétrico	----	14614,286	----	----	----	----
Módulo de Cizalla (Gpa)	----	----	----	----	----	----
Cohesión (Gpa)	----	0.042	0,019	0,018	0,03431	----
Ángulo de fricción interna (°)	----	17	17	20,0	29,1	19,2

Nota. Tabla 1, elaborada y organizada por los autores. Adaptada de Goral, Deo, Nadimi,

McLennan, & H (2018); Li, Li, Liu, & Hang (2021); Bazunu (2015); Shi (2019) y Evans (2020).

Tabla 2

Casos de ambientes geotérmicos, parte 1

Tipo de muestras	Muestras Geotérmicas							
N°	C6	C7	C8		C9	C10		
Nombre del campo	Blue Montain	Zhacang	Newberry		----	Desert Peak		
Ubicación	Nevada, Estados Unidos	Qinghai, China	Oregón - EE. UU.		----	Nevada - EE. UU.		
Tipo de roca	roca filita	Granodiorita	Bloque de Toba (núcleo 3,8 cm D)	Bloque de Toba (núcleo 2,5 cm D)	Granito (Sierra White)	Tobas de Riolita (Desvitrificada)	Tobas de Riolita Silíceas	Metamudita Ilítica / silícea
Profundidad de recuperación de la muestra (ft)	4133858,00	1600-15500	10060	10060	----	2286	2437	2624
Gradiente de temperatura (°C)	210	250	90	90	----	187,5	187,5	187,5
Composición mineralógica (%)	----	Arenisca, Cuarzo, biotita, granodiorita	Plagioclasa (67,2%); Auguita (12,5); Diopsido (11,6); Magnetita (5,9); Microclina (2,8)	Plagioclasa (67,2%); Auguita (12,5); Diopsido (11,6); Magnetita (5,9); Microclina (2,8)	Quarzo (30,1%); Albita (25,2%); Calcio (22,3%); Chinochlor (4,9%); Biotita (1,7%); Magnetita (0,9%); Clorapatita (0,8%); Moscovita (8,2%); Microclina (5,6%)	Quarzo (40%); Feldespatopotásico (20%)	Quarzo (40% - 50%)	----
Presión de confinamiento (Gpa)	0 - 0,5	----	0,7 - 20,7	0 - 20,7	138	1,0 - 20	1,0 - 20	4,0 - 20
Módulo de Young Promedio (Gpa)	74,43	4647 - 7459	3,14 - 5,23	3580 - 8560	67	8,51 - 8,216	22,1 - 26,49	30,34 - 38,09
Relación de Poisson Promedio	18,51	0,211-0,367	0,117 - 0,047	0,063 - 0,069	0,32	0,15 - 0,21	0,13 - 0,19	0,17 - 0,40
Módulo Volumétrico	----	----	----	----	----	----	----	----
Módulo de Cizalla (Gpa)	3186	----	1,4 - 2,5	1,65 - 4	----	----	----	----
Cohesión (Gpa)	----	----	0,00454	0,00772	----	0,01384	0,0021	0,01879
Ángulo de fricción interna (°)	----	----	26,97	20,17	----	29,3	45,23	43,3

Nota. Tabla 2, elaborada y organizada por los autores. Adaptada de Kamali-Asl (2019); Zhang (2022); Lee, Maharidge, Franquet, & Dick (2012); Zhi & Ahmad (2018) y (Lutz, Cline, & Martin J (2010).

Tabla 3

Casos de ambientes geotérmicos, parte 2

Tipo de muestra	Muestras Geotérmicas										
	C11				C12					C13	C14
N°											
Nombre del campo	Newberry				Newberry					Yanjiao	Patua
Ubicación	Oregón - EE. UU.				Oregón - EE. UU.					China	Northern Nevada
Tipo de roca	Toba N1 (1H)	Toba N1 (1V)	Toba N1 (2H)	Toba N1 (2V)	Toba Basáltica (M1)	Toba Basáltica (M2)	Toba Basáltica (M3)	Toba Basáltica (M4)	Toba Basáltica (M5)	Granito	Granodiorita
Profundidad de recuperación de la muestra (ft)	4013 - 4014	4013 - 4014	4348 - 4349	4348 - 4349	4300	4300	4300	4300	4300	9842	5561.5
Gradiente de temperatura (°C)	90	90	90	90	23	23	23	90	90	445	201
Composición mineralógica (%)	----	----	----	----	----	Albita (38,3%); Anorthite (21,9%); Anortita (8,6%); Pigeonite (9,3%); Augita (7,8%); Vermiculita (4,2%); Cuarzo (3,8%); Ferrosillita (2,9%); Ilmenita (3,3%)	----	----	Anorthite (28,5%); Albita (25,7%); Clinochloro (23,2); Corrensite (5,8%); Cuarzo (9,8%); Hematita-Ti (2,9%); Ferrosillita (3%); Fluorita (1%)	----	----
Presión de confinamiento (Gpa)	3,45 - 31,03	3,45 - 31,03	10,34 - 31,03	10,34 - 31,03	0,02413	0,02413	0,02413	0,01	0,01034	0,04	0,01 - 0,05
Módulo de Young Promedio (Gpa)	25,88 - 27,21	25,72 - 28,2	15,19 - 16,57	11,17 - 13,38	39,2	53	51	38,8	46,9	40,9 - 17,52	68,25 - 79,94
Relación de Poisson Promedio	0,31 - 0,42	0,28 - 0,39	0,28 - 0,31	0,32 - 0,37	0,17	0,17	0,17	0,25	0,25	0,322 - 0,476	0,23 - 0,24
Módulo Volumétrico	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Módulo de Cizalla (Gpa)	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Cohesión (Gpa)	0,002473	0,03248	0,0254	0,0017	----	----	----	----	----	----	----
Ángulo de fricción interna (°)	45,83	34,01	21,38	19,28	43,8	41,3	38,1	30,3	46,7	14	48,5

Nota. Tabla 3, elaborada y organizada por los autores. Adaptada de Wang, Jung, & Ghassemi (2012); Bakshi, Halvaei, & Ghassemi (2016); Wang (2020) y KC, Foroutan, Kamali-Asl, Ghazanfari, & Cladouhos (2019).

3.1. Caso de estudio C1. Hidrocarburos Woodford (USA)

Pruebas geomecánicas a micro y macro escala del shale de Woodford (USA)

Este artículo se basa en el estudio del comportamiento de la deformación por compresión uniaxial de muestras de tamaño micrométrico, milimétrico y de centímetros de una muestra de shale de Woodford. Se realizan pruebas geomecánicas a microescala en 25 micro pilares de $10\mu\text{m}$ de diámetro nanoindentador, fabricados mediante FIB – SEM. A nivel macroscópico, se comparan con pruebas en 15 macro pilares de 2,5 mm y 2 muestras de 25 mm de diámetro. Se realiza la medición la deformación, resistencia, relación de Poisson y el módulo de Young (Goral, Deo, Nadimi, McLennan, & H, 2018).

3.2. Caso de estudio C2. Hidrocarburos shale profundo (China)

Propiedades mecánicas de roca del reservorio de gas de shale profundo

En este estudio se realizan experimentos sistemáticos de mecánica de rocas en muestras de shale de la misma formación con varias profundidades. Se centra en adquirir leyes de variación de parámetros mecánicos como la resistencia a la compresión triaxial, la resistencia a la tracción, la resistencia al cizallamiento, el ángulo de fricción interna, la resistencia a la cohesión, el módulo elástico, la relación de Poisson, el índice de fragilidad y los modos de falla frente a la profundidad (Li, Li, Liu, & Hang, 2021).

Tabla 4*Módulos elásticos, China (C2)*

C2: Shale de China		
Presión de confinamiento (Gpa)	Módulo de Young (Gpa)	Relación de Poisson
0	17,49	0,303
0,015	20,07	0,282
0,03	21,14	0,265
0,045	21,96	0,238
0,06	23,28	0,225
0,075	23,55	0,223
0,09	25,13	0,219

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Li, Li, Liu, & Hang (2021).

3.3. Caso de estudio C3: Hidrocarburos Roseneath y Murteree, Australia

Caracterización geomecánica de rocas de yacimiento shale de gas para la planificación y el diseño del tratamiento de estimulación: un estudio de caso de la cuenca de Cooper

El propósito de este artículo es proporcionar una visión preliminar de las propiedades mecánicas y el potencial de estimulación de las rocas Roseneath y Murteree. Ocho muestras de núcleo recuperados a una profundidad de 3167,03 – 3539,94 m respectivamente, de dos pozos que se sometieron a pruebas de laboratorio utilizando técnicas acústicas estándar y pruebas triaxiales para la caracterización mecánica del shale en términos de resistencia, módulo de Young, relación de Poisson, compresibilidad, etc. Se utiliza una celda para realizar mediciones de tensión-deformación en cuatro muestras para cada formación bajo carga uniaxial y diferente presión de confinamiento (Bazunu, y otros, 2015).

Tabla 5*Módulos elásticos, Australia (C3)*

C3: Shale de Australia			
Muestras	Presión de confinamiento (Gpa)	Módulo de Young (Gpa)	Relación de Poisson
Muestra 1 Roseneath	0,01	10,9	0,2
	0,02	16,5	0,28
	0,03	19,5	0,32
	0,04	19,9	0,33
Muestra 2 Roseneath	0,01	13,6	0,17
	0,02	19,3	0,26
	0,03	24	0,25
	0,04	27,1	0,28
Muestra 3 Roseneath	0,01	16,8	0,13
	0,02	19,3	0,18
	0,03	21,1	0,22
	0,04	19,4	0,22
Muestra 4 Roseneath	0,01	9	0,21
	0,02	11,8	0,21
	0,03	16,2	0,25
	0,04	18,7	0,27
Muestra 1 Murteree	0,01	18,2	0,26
	0,02	23,6	0,28
	0,03	23,9	0,29
	0,04	24,3	0,33
Muestra 2 Murteree	0,01	13,7	0,2
	0,02	14,1	0,22
	0,03	15	0,25
	0,04	19,3	0,3
Muestra 3 Murteree	0,01	22,5	0,19
	0,02	27	0,21
	0,03	28,4	0,22
	0,04	29,4	0,25
Muestra 4 Murteree	0,01	19,4	0,22
	0,02	24	0,25
	0,03	25,6	0,28
	0,04	25,4	0,3

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Bazunu, y otros (2015).

3.4. Caso de estudio C4. Hidrocarburos Junggar, China

Propiedades mecánicas de la roca y el comportamiento de falla de la glutenita

El objetivo de este caso de estudio es analizar el comportamiento mecánico de una muestra de roca Glutenita de la depresión de Muhu en la cuenca de Junggar, China, realizando pruebas de compresión triaxial, donde se determinan los valores de módulo de Young, relación de Poisson, cohesión y ángulo de fricción interna; Además se analizan los efectos de la grava en los modos de falla de la glutenita, destacando su mayor ductilidad en comparación con la arenisca (Shi, y otros, 2019).

Tabla 6

Módulos elásticos, Junggar (C4)

C4: Glutenita, Junggar			
Muestras	Presión de confinamiento (Gpa)	Módulo de Young (Gpa)	Relación de Poisson
Muestra 1	0,01	31,07	0,171
	0,02	33,21	0,207
	0,03	35,4	0,15
Muestra 2	0,01	22,6	0,104
	0,02	27,05	0,248
	0,03	29,67	0,164
Muestra 3	0,01	19,54	0,143
	0,02	24,56	0,209
	0,03	23,31	0,121
Muestra 4	0,01	19,53	0,188
	0,02	21,68	0,168
	0,03	25,81	0,167

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Shi (2019).

3.5. Caso de estudio C5. Hidrocarburos Marcellus, USA

Relación de velocidades sísmicas, tensión horizontal mínima y distribución natural de fracturas a la eficiencia de estimulación durante la finalización de Marcellus Shale MIP-3H Pozo no convencional, Virginia Occidental, EE. UU.

Este caso de estudio tiene como objetivo comprender la influencia de las propiedades geomecánicas en la eficiencia de la estimulación hidráulica en el pozo de gas de shale MIP-3H. Se analizan los módulos geomecánicos, el módulo de Young y la relación de Poisson a lo largo de 28 etapas del pozo, se identifican con estos datos zonas de fragilidad y su impacto en la fracturación (Evans, 2020).

Tabla 7

Módulos elásticos, Marcellus (C5)

Etapas	Módulo de Young (Gpa)					Relación de Poisson				
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
2	17,3	14,6	16,8	17,6	18,3	0,23	0,21	0,2	0,27	0,23
3	18,3	16,8	17,8	17,7	15,9	0,22	0,21	0,23	0,23	0,2
4	16,9	17,7	16,8	19,2	18,1	0,23	0,22	0,23	0,26	0,24
5	17,4	17,5	18,1	17,7	17,8	0,21	0,23	0,21	0,25	0,23
6	17,2	17,3	18,6	17,5	18,1	0,22	0,23	0,25	0,22	0,24
7	17,7	16,8	16,7	16,9	16,6	0,23	0,22	0,22	0,23	0,2
8	16,6	18,4	17,9	16,9	17,7	0,23	0,23	0,24	0,22	0,23
9	18,5	18,4	18,1	17,7	17,1	0,24	0,24	0,23	0,23	0,21
10	17,5	17,9	18,8	19,6	22,5	0,22	0,22	0,22	0,25	0,26
11	21,5	18,9	16,8	17,9	16,8	0,26	0,25	0,22	0,22	0,22
12	33,3	16,3	15,8	16,8	18,3	0,33	0,22	0,21	0,23	0,26
13	17,1	16,5	16,0	16,0	16,0	0,24	0,23	0,22	0,19	0,23
14	17,4	16,3	16,8	17,0	17,0	0,25	0,23	0,23	0,23	0,24
15	16,6	18,6	18,6	17,0	----	0,22	0,22	0,2	0,22	----
16	17,4	17,0	17,0	15,9	----	0,23	0,21	0,22	0,21	----
17	17,9	17,9	17,4	17,4	----	0,22	0,23	0,23	0,23	----
18	16,6	17,0	17,7	17,7	----	0,22	0,23	0,23	0,22	----
19	19,6	17,7	17,1	17,2	----	0,27	0,24	0,25	0,25	----
20	16,4	16,5	17,9	18,6	17,5	0,23	0,22	0,2	0,27	0,23
21	15,0	15,9	17,1	15,9	16,3	0,19	0,23	0,24	0,22	0,22

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Evans (2020).

3.6. Caso de estudio C6. Geotérmico Blue Mountain, USA

Respuesta a esfuerzo-deformación y análisis de la huella sísmica de rocas reservorio de filita del campo geotérmico Blue Mountain

Este estudio analiza una serie de pruebas mecánicas realizadas en muestras de roca del campo geotérmico Blue Mountain en Nevada, EE. UU. Este artículo detalla el proceso de preparación de las muestras para la realización de ensayos triaxiales, diseñados para determinar los módulos estáticos y dinámicos. Se enfatiza en la obtención de propiedades mecánicas fundamentales, incluyendo el módulo de Young, la relación de Poisson y el módulo volumétrico, que son cruciales para comprender la respuesta de la roca bajo condiciones de carga (Kamali-Asl, y otros, 2019).

3.7. Caso de estudio C7. Geotérmico Zhacang, China

Diseño de estimulación de yacimientos y evaluación de la explotación del calor de un sistema geotérmico mejorado del campo geotérmico Zhacang.

En este caso de estudio se realiza el análisis de un plan de estimulación en el campo geotérmico Zhacang ubicado en la provincia de Qinghai, China, se desarrollan técnicas de extracción en un yacimiento de granodiorita a profundidades de 4100 – 4700 metros. Mediante la prueba brasileña y métodos ultrasónicos se determinan las propiedades geomecánicas tales como el módulo de Young y la relación de Poisson. Utilizando una serie de datos y representaciones gráficas, se ilustrará el comportamiento de estas muestras de rocas bajo condiciones específicas de temperatura y profundidad (Zhang, y otros, 2022).

3.8. Caso de estudio C8. Geotérmico Newberry, USA

Deformaciones frágiles a dúctiles dependientes de las tensiones de muestras de toba en pozos geotérmicos

Este estudio analiza las muestras del bloque toba de los pozos geotérmicos, en Newberry, Oregón, EE. UU., se recupera a 3066 metros de profundidad, se procede con la selección de la muestra y posteriormente se le realizan las pruebas de laboratorio, entre estas, prueba de compresión triaxial y velocidad de ondas ultrasónicas. Las pruebas de compresión y cizallamiento arrojan datos de las propiedades dinámicas de los núcleos, así como también propiedades mecánicas estáticas. Se hacen comparaciones de los módulos de Young estáticos frente a dinámicos a condiciones confinadas y de la relación de Poisson estática frente a dinámica en condiciones confinadas (Lee, Maharidge, Franquet, & Dick, 2012).

Tabla 8

Módulos elásticos, Newberry (C8)

C8: NEWBERRY			
MUESTRAS	Módulo de Young	Relación de Poisson	Presión de confinamiento
NÚCLEO 3,8	0,00314	0,117	0,0007
	0,00469	0,046	0,0034
	0,00379	0,05	0,0103
	0,00523	0,047	0,0207
NÚCLEO 2,5	0,00358	0,063	0
	0,00599	0,099	0
	0,00879	0,124	0,0007
	0,00469	0,035	0,0021
	0,00788	0,061	0,0034
	0,00586	0,051	0,0069
	0,00957	0,056	0,0103
	0,00856	0,069	0,0207

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Lee, Maharidge, Franquet, & Dick (2012).

3.9. Caso de estudio C9: Geotérmico, EGS

Propagación y coalescencia de fracturas inducidas por inyección bajo carga triaxial

Este estudio analiza la estimulación por cizallamiento en sistemas geotérmicos mejorados (EGS), destacando su papel en la mejora de la permeabilidad. El proceso de hidro - cizallamiento activa fracturas preexistentes a presiones sub-óptimas, causando su deslizamiento y dilatación, y potencialmente generando nuevas grietas. Se evidencia que este mecanismo puede crear una red de fracturas más permeable, facilitando flujos económicos (Zhi & Ahmad, 2018).

3.10. Caso de estudio C10. Geotérmico EGS, Desert Peak

Pruebas mecánicas de rocas para el proyecto del Sistema Geotérmico Mejorado

(EGS) de Desert Peak, Nevada

Con el fin de hacer estimulación de pozos y desarrollo de un sistema geotérmico mejorado en el campo geotérmico Desert Peak, se hacen pruebas en unas muestras de núcleos, y así encontrar módulo de Young, resistencia a la fricción, respuesta bajo fallas relaciones tensión-deformación, relación de Poisson, densidad aparente, entre otras. Las muestras que fueron sacadas son riolita desvitrificada, riolita, silicea y metamudita, que se encontraban a diferentes profundidades (Lutz, Cline, & Martin J, 2010).

Tabla 9*Módulos elásticos, Desert Peak (C10)*

C10: DESERT PEAK			
MUESTRAS	Presión de confinamiento (GPA)	Relación de Poisson	Módulo de Young (GPA)
TOBAS DE RIOLITA	0,001	0,15	8,51
	0,004	0,14	6,538
	0,01	0,17	7,819
	0,02	0,21	8,216
TOBAS DE RIOLITA SILÍCEAS	0,001	0,13	22,1
	0,004	0,18	25,41
	0,01	0,18	25,97
	0,02	0,19	26,49
METAMUDITA	0,004	0,4	30,34
	0,02	0,17	38,09

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Lutz, Cline, & Martin J (2010).

3.11. Caso de estudio C11: Geotérmico toba, Newberry

Propiedades de deformación y falla de la toba soldada Newberry

En este estudio se muestran pruebas triaxiales multietapa para determinar propiedades geomecánicas como relación de Poisson, módulo de Young, también se tuvo en cuenta la porosidad, densidad aparente y la permeabilidad. Estas muestras de toba se obtuvieron del pozo GEO-N1 en la parte occidental del volcán Newberry Tuff a una profundidad de 4013 pies, se prepararon secciones petrográficas delgadas que se usan para describir la textura y la mineralogía de la roca (Wang, Jung, & Ghassemi, 2012).

Tabla 10*Módulos elásticos, Newberry (C11)*

C11: NEWBERRY			
MUESTRAS	Presión de confinamiento (GPA)	Relación de Poisson	Módulo de Young (GPA)
TOBA N1 (1H)	0,00345	0,31	25,88
	0,01034	0,34	27,24
	0,01724	0,36	27,84
	0,02414	0,4	27,48
	0,03103	0,42	27,21
TOBA N1 (1V)	0,00345	0,28	25,72
	0,01034	0,33	28,35
	0,01724	0,36	28,43
	0,02414	0,39	28,2
	0,03103	-----	-----
TOBA N1 (2H)	0,01034	0,29	15,19
	0,01379	0,31	16,35
	0,01724	0,3	16,22
	0,02414	0,29	16,41
	0,03103	0,28	16,57
TOBA N1 (2V)	0,01034	0,32	11,17
	0,01379	0,36	13,36
	0,01724	0,37	13,76
	0,02414	0,36	13,38
	0,03103	-----	-----

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Wang, Jung, & Ghassemi (2012).

3.12. Caso de estudio C12. Campo geotérmico Newberry

Experimentos de Inyección en Tobas Basálticas en condiciones triaxiales y calentadas con monitoreo de emisiones acústicas

El artículo muestra los experimentos hechos a los núcleos de toba basáltica en el campo geotérmico Newberry, describe las pruebas de experimentos triaxiales y de inyección en los núcleos para medir varios parámetros petrofísicos y geotécnicos, también se hacen algunas pruebas en condiciones de temperatura elevada para investigar la respuesta de las rocas a la estimulación

térmica. Los resultados muestran información sobre las propiedades elásticas, de falla, análisis de la composición mineralógica, porosidad y permeabilidad (Bakshi, Halvaei, & Ghassemi., 2016)

Tabla 11

Módulos elásticos, Newberry (C12)

C12: NEWBERRY			
MUESTRAS	Presión de confinamiento	Relación de Poisson	Módulo de Young
M1	0,02413	0,24	64,4
M2	0,02413	0,25	62,2
M3	0,02413	0,27	60,5
M4	0,02413	0,31	53,6
M5	0,02413	0,18	58,25

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Bakshi, Halvaei, & Ghassemi(2016).

3.13. Caso de estudio C13: Geotérmico Yanjiao, China

Un estudio experimental sobre la evaluación de la fracibilidad de roca seca caliente:

Uso de un modelo termo-mecánico integrado.

En este caso de estudio, se examina de forma experimental la fracibilidad de especímenes de granito de alta resistencia dieléctrica (HDR) bajo tensión uniaxial y triaxial. Se seleccionan ocho muestras de granito que fueron expuestas a un tratamiento térmico a distintas temperaturas durante dos horas. Posteriormente, se someten a pruebas de compresión a una tasa de deformación constante de 0,04 mm/min. Para evaluar la deformación volumétrica de las fisuras, se emplean cálculos numéricos que permitieron identificar los puntos de inicio de las grietas y la tensión asociada al daño, se utilizan las curvas obtenidas de tensión frente a deformación (Wang, y otros, 2020).

Tabla 12*Módulos elásticos, Yanjiao (C13)*

C13: Yanjiao		
Presión de confinamiento (GPA)	Relación de Poisson	Módulo de Young (GPA)
0	0,322	40,9
0	0,339	34,54
0	0,332	13,06
0	0,401	6,76
0,04	0,339	53,45
0,04	0,397	42,97
0,04	0,302	34,31
0,04	0,476	17,52

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Wang (2020).

3.14. Caso de estudio C14. Campo geotérmico de Patua

Caracterización geomecánica de una roca granodiorita del campo geotérmico de Patua

Este artículo presenta ensayos de laboratorio que se realizan en un espécimen cilíndrico de roca de granodiorita recuperado de un pozo a una profundidad de 5561,5 pies en el campo geotérmico de Patua en el norte de Nevada. En este estudio, se analizan pruebas elásticas para caracterizar las propiedades de histéresis, plástico- elástico y resistencia de la muestra bajo diferentes condiciones de carga. En los resultados se muestran la evolución de la deformación axial, radial y volumétrica a diferentes niveles de la presión de confinamiento (KC, Foroutan, Kamali-Asl, Ghazanfari, & Cladouhos, 2019).

Tabla 13*Módulos elásticos, Patua (C14)*

C14: Patua		
Presión de confinamiento (GPA)	Relación de Poisson	Módulo de Young (GPA)
0,01	0,24	69,94
0,01	0,24	70,28
0,02	0,24	68,25
0,02	0,24	69,32
0,02	0,24	71,65
0,02	0,24	71,07
0,03	0,23	68,64
0,03	0,24	69,48
0,03	0,24	71,09
0,03	0,24	71,44
0,04	0,24	69,99
0,04	0,23	69,79
0,04	0,24	72,34
0,04	0,24	73,03
0,05	0,24	71,73
0,05	0,24	71,62
0,05	0,24	73,67
0,05	0,24	73,94

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de KC, Foroutan, Kamali-Asl, Ghazanfari, & Cladouhos (2019).

4. Comparativa de las propiedades geomecánicas: Rocas de alta entalpía (sistemas geotérmicos) vs rocas a temperatura normal (sistemas petrolíferos)

Para llevar a cabo los análisis comparativos de las propiedades geomecánicas de las rocas de alta entalpía con las rocas de temperatura normal, se seleccionaron dos variables fundamentales: Módulo de Young, Relación de Poisson, así como su comportamiento y variación frente a la presión de confinamiento. Se procede a realizar un análisis detallado de estos parámetros, organizando los datos y elaborando los gráficos respectivos.

4.1.1. Módulo de Young vs. Presión de confinamiento.

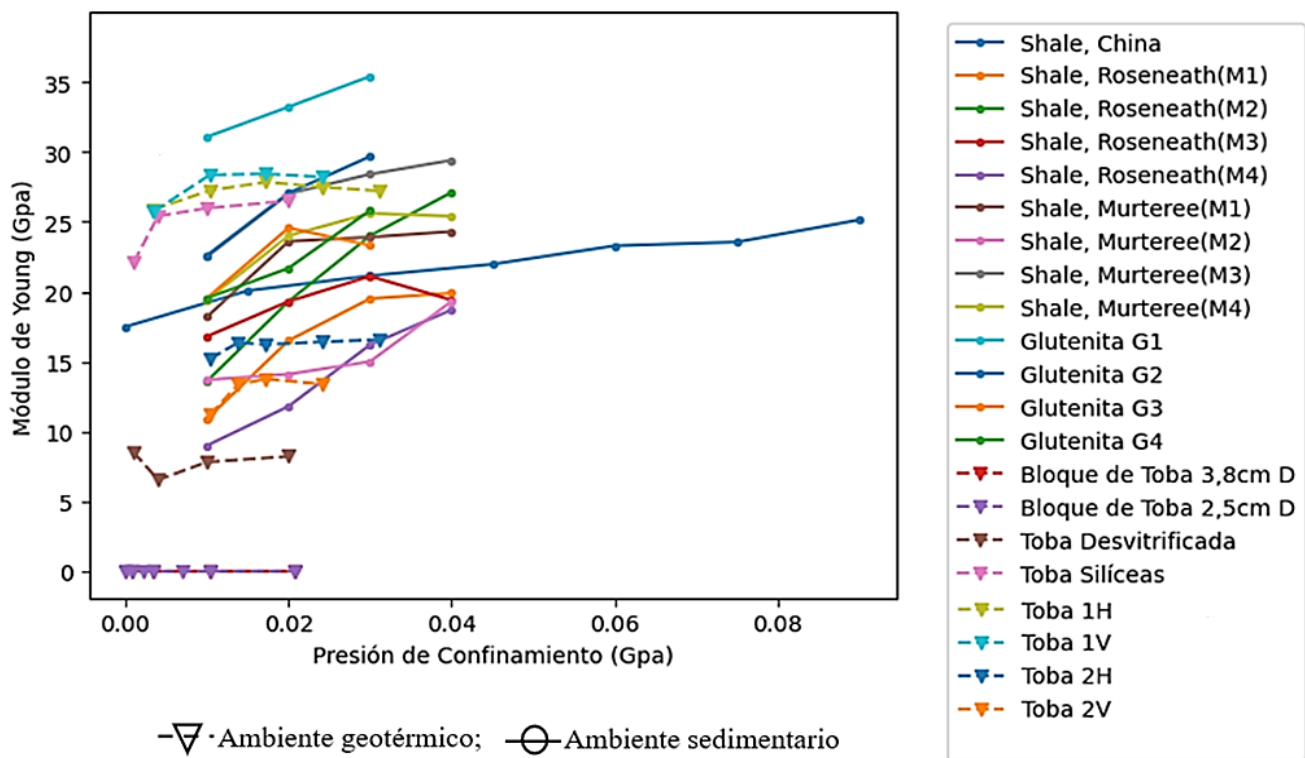
En la gráfica de módulo de Young frente a la presión de confinamiento, figura 12, se aprecia que, para las muestras sedimentarias, particularmente en el caso (C1) del shale de China, se observa un incremento significativo del módulo de Young con el aumento de la presión de confinamiento, esto indica una mayor fragilidad del shale cuando el módulo de Young es mayor y la relación de Poisson es menor (Rickman, Mullen, Petre, Grieser, & & Kundert, 2008). Así mismo, para muestras de Shale de Roseneath y Murteree (M1, M2, M3, M4) caso (C3), se observa un aumento del módulo de Young con el incremento de la presión de confinamiento. Respecto a las muestras de Glutenita, caso (C4), se observa que el módulo de Young aumenta con la presión de confinamiento, oscilando entre 19.53 Gpa y 35.40 Gpa, lo que indica un incremento en la resistencia a la compresión (Shi, y otros, 2019).

Para las muestras geotérmicas, se observa que en el caso (C8) del bloque de Toba de 3,5 y 2,5 cm se observa que la presión de confinamiento con relación al módulo de Young se mantiene constante, mientras que, en la toba riolita caso (C10), primero muestra una tendencia a disminuir y luego tiene un incremento moderado. Las Tobas 2H, 2V, 1V, caso (C11) y Toba Silíceo caso (C10), tienen aumentos constantes. por otro lado, en la Toba 1H caso (C11) se observa un leve

incremento en el módulo de Young. Todas estas tendencias que se pueden observar en la figura 12 junto a las variaciones particulares son las respuestas de los materiales, esto se debe a que cada muestra es diferente debido a sus propiedades y cómo reacciona frente a las diversas presiones de confinamiento a las que son sometidas.

Figura 12

Módulo de Young vs. Presión de confinamiento



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. La figura 12 hace referencia a los resultados de la variación del módulo de Young frente a la presión de confinamiento, obtenidos de los casos de estudios de muestras sedimentarias y geotérmicas.

4.1.2. Relación de Poisson vs. Presión de confinamiento.

La figura 13, ilustra el comportamiento de la relación de Poisson frente a la presión de confinamiento de los casos de estudios antes mencionados. Para las muestras sedimentarias se observa el siguiente comportamiento: En el caso (C1) del shale de China se registra una disminución de la relación de Poisson con el incremento de la presión de confinamiento (Li, Li, Liu, & Hang, 2021). Igualmente, para las muestras de shale de Roseneath y Murteree (M1, M2, M3, M4) caso (C3), se observa un aumento en la relación de Poisson al incrementar la presión de confinamiento y una fuerte anisotropía en estos valores (Bazunu, y otros, 2015).

En cuanto a las muestras de Glutenitas caso (C4), se logra observar una variabilidad en estos valores, lo cual indica una disminución a medida que incrementa la presión de confinamiento, así mismo para todas las pruebas realizadas en este caso. (Shi, y otros, 2019).

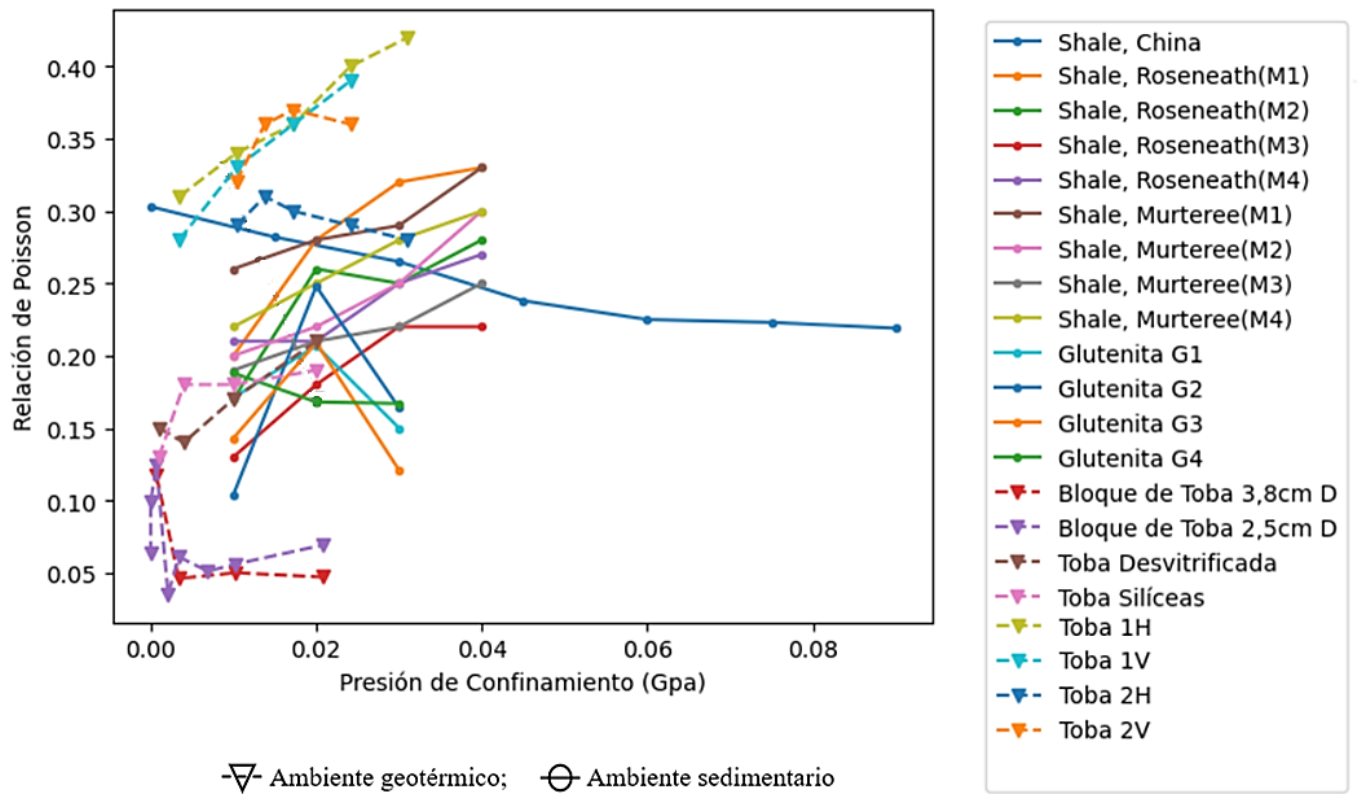
Respecto a las muestras geotérmicas, los valores de relación de Poisson de las Tobas Silíceas, riolitas, caso (10) y los bloques de Toba de 3,8cm y 2,5cm, caso (C8) se muestran más bajos en comparación con los de las Tobas 1H, 1V, 2H, 2V caso (C11). Sin embargo, todos estos valores se encuentran dentro de los rangos normales para la relación de Poisson, así como en su comparación respecto a la presión de confinamiento los valores de Toba 1H, 1V, 2H, 2V caso (C11) aumentan un poco.

Los casos en los ambientes geotérmicos no presentan una tendencia clara. En algunos casos los valores de la relación de Poisson disminuyen al inicio y luego aumentan, mientras que en otros casos aumentan de forma inicial y van disminuyendo. Este comportamiento no tiene una explicación evidente. Para un análisis más profundo se requieren de más datos, evidenciando la necesidad de desarrollar una investigación más profunda para encontrar a que se debe esta

distorsión y/o la falta de una tendencia en común de todos los campos geotérmicos en esta investigación.

Figura 13

Relación de Poisson vs. Presión de confinamiento



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. La figura 13 hace referencia a los resultados de la variación de la relación de Poisson frente a la presión de confinamiento, obtenidos de los casos de estudios de muestras sedimentarias y geotérmicas.

4.1.3. *Módulo de Young vs. Relación de Poisson.*

El análisis presentado en la figura 14, que corresponde a la gráfica de módulo de Young (E) vs. Relación de Poisson (V), se observa un comportamiento distintivo en las muestras de ambientes sedimentarios y geotérmicos. Según los estudios de Grieser & Bray (2007), indican que “la relación de Poisson y el módulo de Young son dos parámetros importantes medidos, que se utilizan para identificar intervalos dúctiles y frágiles en los shales y para determinar las barreras de tensión”. Basados en estos estudios, para las muestras de ambientes sedimentarios (shale y gluteninas) se clasificaron según la posición en cada cuadrante del gráfico de E vs V , figura 10, con la finalidad de determinar si son rocas dúctiles o frágiles.

La figura 14, que ilustra la gráfica de E vs V , se construyó utilizando los datos obtenidos de los casos de estudios experimentales. En el gráfico el módulo de Young se expresa en Giga pascuales (Gpa) y la relación de Poisson es adimensional. Este análisis incluyó muestras de shale de Marcellus caso (C5), algunas de las cuales se clasificaron como rocas frágiles, al igual que las muestras del shale de China caso (C1), las muestras de Glutenitas caso (C4) y ciertas muestras de los shales de Roseneath (M2 y M3) y Murteree (M3 y M4) caso (C3). Por otro lado, aquellas muestras que presentaron un comportamiento dúctil incluyen las M1 y M4 del shale de Roseneath, M1 y M2 del shale de Murteree y las muestras e2, e12 y e19 del shale de Marcellus, tabla 14.

En cuanto a la variabilidad en la clasificación de las muestras de shale de Roseneath, Murteree y Marcellus, es posible que dicha discrepancia sea debido a las distintas condiciones geológicas a las que están sometidas, como la profundidad, temperatura o esfuerzos. Estos factores pueden influir significativamente en las propiedades mecánicas de las rocas resultando en una diversidad de comportamientos frente a los ensayos de laboratorio.

Tabla 14*Clasificación dúctil o frágil de las muestras de ambientes sedimentarios*

Muestras sedimentarias		
Dúctiles	Frágiles	
Shale de Roseneath M1	Shale de China	Shale Marcellus e7
Shale de Roseneath M4	Shale de Roseneath M2	Shale Marcellus e8
Shale de Murteree M1	Shale de Roseneath M3	Shale Marcellus e9
Shale de Murteree M2	Shale de Murteree M3	Shale Marcellus e10
Shale Marcellus e2	Shale de Murteree M4	Shale Marcellus e11
Shale Marcellus e12	Glutenita G1	Shale Marcellus e13
Shale Marcellus e19	Glutenita G2	Shale Marcellus e14
	Glutenita G3	Shale Marcellus e15
	Glutenita G4	Shale Marcellus e16
	Shale Marcellus e3	Shale Marcellus e17
	Shale Marcellus e4	Shale Marcellus e18
	Shale Marcellus e5	Shale Marcellus e20
	Shale Marcellus e6	Shale Marcellus e21

Nota. Tabla 14, elaborada y organizada por los autores.

En cuanto a las muestras geotérmicas, su clasificación en el gráfico E vs V figura 14, indica que las muestras de bloque de Toba de 2,5cm, bloque de Toba de 3,8 cm caso (C8), toba Silícea caso (10), Toba 1H y Toba 1V caso (C11), se encuentran clasificadas en el rango de rocas frágiles o relativamente frágiles. Por otro lado, las muestras de Toba 2H caso (C11), toba desvitrificada caso (C10), Toba metamudita caso (C10) y Toba 2V caso (C11) se clasifican en el rango de rocas dúctiles tabla 15.

Tabla 15

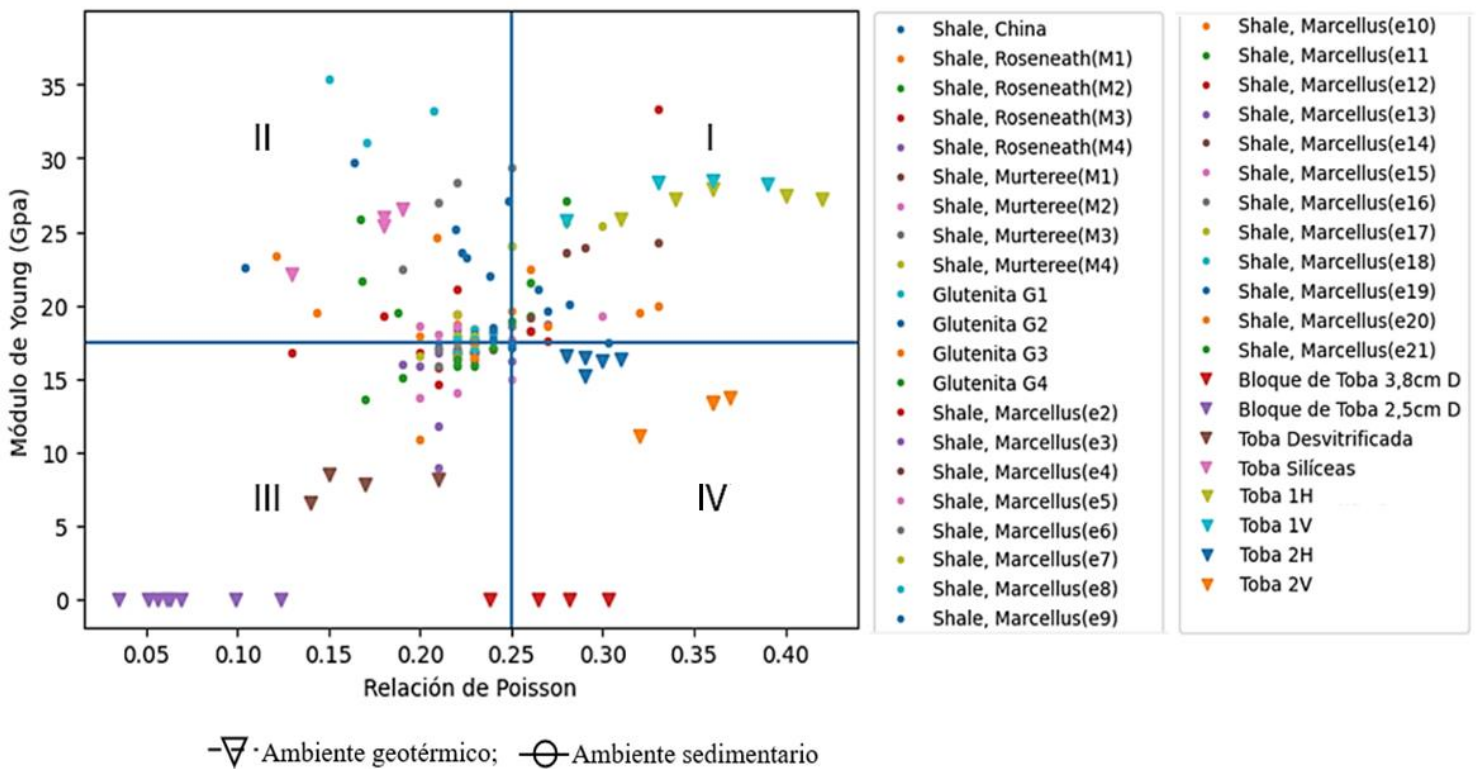
Clasificación dúctil o frágil de las muestras de ambientes geotérmicos

Muestras geotérmicas	
Dúctiles	Frágiles
Toba 2V	Tobas silíceas
Toba 2H	Toba 1V
Toba metamudita	Toba 1H
Toba desvitrificada	Bloque de toba 3.8
	Bloque de toba 2.5

Nota. Tabla 15 elaborada y organizada por los autores.

Figura 14

Módulo de Young vs. Relación de Poisson



Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de (Grieser & Bray, 2007) utilizando los datos de las tablas 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13.

Nota. La figura 14 hace referencia a la clasificación dúctil o frágil, de los diferentes tipos de rocas obtenidos de los casos de estudios de muestras sedimentarias y geotérmicas.

4.2. Construcción y análisis de círculos de Mohr

En el marco de la investigación, se realiza la elaboración de círculos de Mohr para analizar los casos de estudios experimentales antes mencionados, provenientes de ambientes sedimentarios y geotérmicos. El objetivo es obtener de manera gráfica, los valores de esfuerzo normal, cortante, cohesión y el ángulo de fricción interno. Aunque varios de estos parámetros ya se encuentran establecidos para algunos de estos casos de estudios, su verificación y ajuste se realizan mediante la representación gráfica correspondiente.

El procedimiento para construir los círculos de Mohr se fundamenta en la aplicación de las ecuaciones de Mohr Coulomb (9), (10) y (11), partiendo del conocimiento de los valores de esfuerzo principal menor aplicado, correspondiente a la presión de confinamiento, y el esfuerzo principal mayor, asociado a la resistencia a la compresión confinada. A través de estas ecuaciones se calculan el esfuerzo normal [eje X en el gráfico de Mohr] y el esfuerzo cortante [eje Y en el gráfico de Mohr], parámetros esenciales para la construcción de los círculos de Mohr (Vallecilla, 2002).

En los casos donde no se encuentran los valores de esfuerzo máximo, se recurre a los valores de UCS (resistencia a la compresión uniaxial). Estos se utilizan para estimar el esfuerzo principal mayor, aplicando la ecuación (22), proporcionada por (Helmuth, et al., 2012), la cual correlaciona el ángulo de fricción interna (φ) con la presión de confinamiento (P_c), permitiendo así la construcción de estos gráficos.

4.2.1. Metodología para la construcción de los círculos de Mohr.

- Partiendo de la ecuación general del círculo que se define de la siguiente manera:

$$r^2 = (x - h)^2 + (y - k)^2 \tag{ 16 }$$

Donde (h, k) , son las coordenadas del centro del círculo que corresponde a los ejes (x, y) respectivamente.

Se parte de esta ecuación para tener un amplio entendimiento en la construcción de los círculo de Mohr.

- Extrapolando las ecuaciones (9), (10) y (11) de Mohr Coulomb para relacionarlas con la ecuación general de un círculo, remplazando en ella las siguientes variables: r^2 por $\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2$; $(x - h)^2$ por $\left(\sigma - \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)\right)^2$ y $(y - k)^2$ por τ^2 . Es importante resaltar que para la coordenada $(y - k)^2$, $k = 0$, debido a que el centro del círculo de Mohr se encuentra en el eje x . Por lo tanto, queda la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 = \left(\sigma - \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)\right)^2 + \tau^2 \tag{ 17 }$$

$$r = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 \tag{ 18 } \text{ Radio}$$

$$c = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \tag{ 19 } \text{ Centro}$$

Donde:

$\sigma_1 = \text{Esfuerzo principal mayor}$

$\sigma_3 = \text{Esfuerzo principal menor}$

$\sigma = \text{Esfuerzo normal}$

$\tau = \text{Esfuerzo cortante}$

- Despejando el esfuerzo cortante (τ) de la ecuación (17), se obtiene como resultado lo siguiente: El esfuerzo cortante es igual a la raíz cuadrada del radio al cuadrado siendo este la diferencia de los esfuerzos principales dividido en dos, menos el cuadrado del esfuerzo normal, menos la coordenada en x del centro del círculo siendo esta la suma de los esfuerzos principales dividida en dos. Ecuación (20).

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 - \left(\sigma - \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)\right)^2} \quad \text{Ecuación del esfuerzo cortante (20)}$$

$$\sigma = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 - \cos(\theta_{rad}) * \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \quad \text{Ecuación del esfuerzo normal (21)}$$

Donde:

θ_{rad} = se utilizan grados expresados en radianes, para ajustar gradualmente los valores del esfuerzo principal menor hasta que coincidan con los del esfuerzo principal mayor. Este ajuste se realiza dentro de un rango de 0 a 180°, que es convertido a radianes, permitiéndonos así general los círculos de Mohr en el gráfico de manera precisa.

- Para realizar los círculos de Mohr del caso de estudio del shale de China C2, se tiene previamente los valores de esfuerzo principal menor y mayor, como se puede observar en la tabla 16.

Tabla 16

Valores de esfuerzos principales menor y mayor del shale de China (C2)

Esfuerzo principal mayor (σ_1)	Esfuerzo principal menor (σ_3)
111,52	0
152,19	15
169,24	30
193,63	45
215,7	60
226,18	75
246,21	90

Nota. Elaborado y organizado por los autores. Adaptado de Li, Li, Liu, & Hang (2021).

- Se procede a calcular los valores del radio y centro de los círculos, reemplazando los valores de la tabla 16 en las ecuaciones (18) y (19), respectivamente, p. ej.,

$$Radio \rightarrow r = \left(\frac{111.52 - 0}{2} \right)^2 \rightarrow r = 55.76$$

$$Centro \rightarrow C = \left(\frac{111.52 + 0}{2} \right)^2 \rightarrow r = 55.76$$

Este mismo cálculo se hace con los demás valores de (σ_1) y (σ_3), hasta obtener el radio y centro de los círculos con cada uno de ellos.

- Luego se realizó un ajuste gradualmente en un rango de 0 a 180° convirtiéndolos posteriormente a radianes, con la finalidad de variar el valor del esfuerzo principal menor hasta hacerlo coincidir con el valor del esfuerzo principal mayor, este proceso permite determinar el esfuerzo normal asociado a cada valor de los esfuerzos principales. Tabla 17.

Tabla 17*Ajuste gradual de 0 a 180°*

(°)	(rad)
0	0,00
10	0,17
20	0,35
30	0,52
40	0,70
50	0,87
60	1,05
70	1,22
80	1,40
90	1,57
100	1,75
110	1,92
120	2,09
130	2,27
140	2,44
150	2,62
160	2,79
170	2,97
180	3,14

Nota. Elaborado y organizado por los autores.

- Una vez realizado el ajuste, se procede a calcular el esfuerzo normal reemplazando los valores en la ecuación (21), posterior a esto se realizó el cálculo del esfuerzo cortante utilizando la ecuación (20), p. ej.,

$$\text{Esfuerzo normal} \rightarrow \sigma = (55.76)^2 - \text{Cos}(0) * (55.76) \rightarrow \sigma = 0$$

$$\text{Esfuerzo cortante} \rightarrow \tau = \sqrt{(55.76)^2 - (0 - (55.76))^2} \rightarrow \tau = 0$$

Tabla 18

Valores de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, shale de China (C2)

Esfuerzo normal (Mpa)	Esfuerzo cortante (Mpa)
0,00	0,00
0,85	9,68
3,36	19,07
7,47	27,88
13,05	35,84
19,92	42,71
27,88	48,29
36,69	52,40
46,08	54,91
55,76	55,76
65,44	54,91
74,83	52,40
83,64	48,29
91,60	42,71
98,47	35,84
104,05	27,88
108,16	19,07
110,67	9,68
111,52	0,00

Nota. Elaborado y organizado por los autores.

- En caso de contar con valores del esfuerzo principal mayor (resistencia a la compresión confinada), es posible calcularlos utilizando la ecuación (22) propuesta por Portilla, Suárez, & Corzo (2012). Este cálculo se basa en el conocimiento previo del valor de UCS (resistencia a la compresión uniaxial), que a su vez se calcula a partir de los valores conocidos del ángulo de fricción interna (φ) con la presión de confinamiento (P_c).

$$CSS = UCS + DP + 2DP * \frac{Sen(\varphi)}{(1 - Sen(\varphi))} \quad (22)$$

Donde:

CSS = Resistencia a la compresión confinada

UCS = Resistencia a la compresión uniaxial

DP = Presión de confinamiento

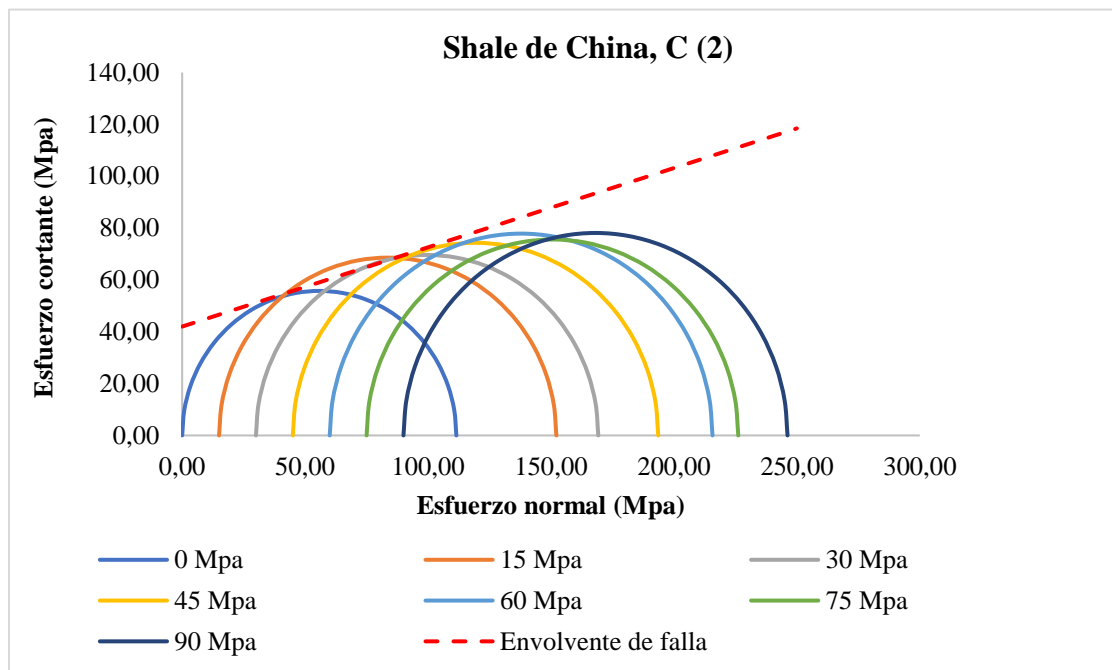
φ = Ángulo de fricción interna

Este mismo cálculo se aplica con todos los valores de esfuerzos principales para obtener los círculos de Mohr. Dicho procedimiento se emplea sistemáticamente en la construcción de estos círculos para cada uno de los casos de estudios experimentales documentados en esta tesis, permitiendo profundizar en la comprensión del comportamiento mecánico de las distintas muestras analizadas.

4.2.2. Círculos de Mohr, Shale - China (C2).

Figura 15

Círculos de Mohr, shale de China, (C2)



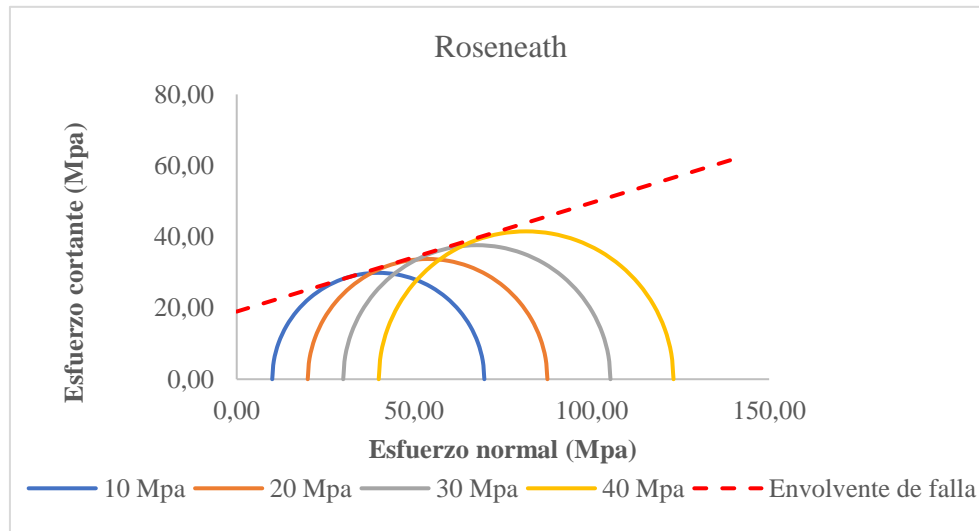
Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 15 se evidencia los círculos de Mohr y la envolvente de falla para la muestra de shale de China (profundidad: 12310,73 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (42 Mpa = 0,042 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (17°). Ver anexo 1.

4.2.3. Círculos de Mohr, shale – Australia (C3).

Figura 16

Círculos de Mohr, shale - Roseneath, Australia (C3)

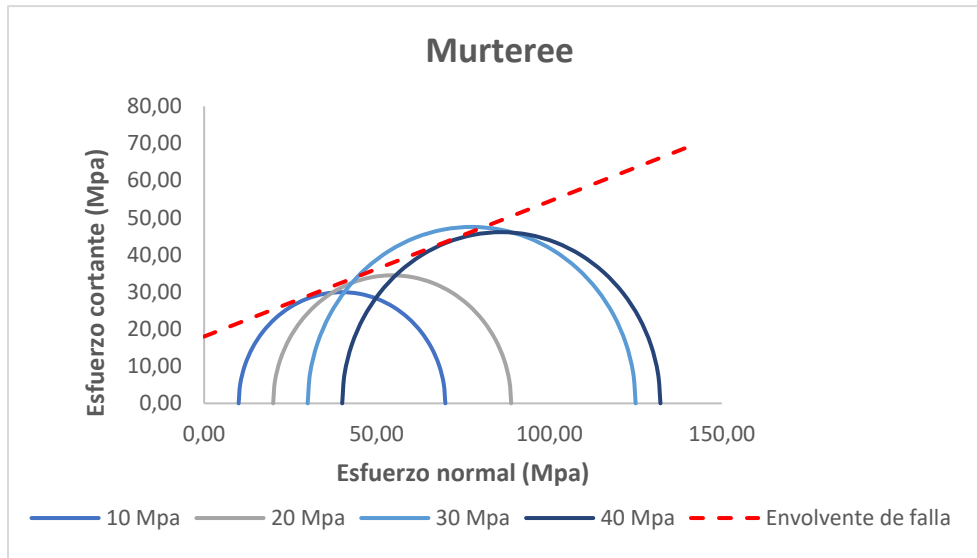


Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 16, se evidencia los círculos de Mohr y la envolvente de falla para la muestra de shale de Roseneath (profundidad: 1039,51 – 10882,55 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (19 Mpa = 0,019 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (17°). Ver anexo 2.

Figura 17

Círculos de Mohr, shale – Murteree, Australia (C3)



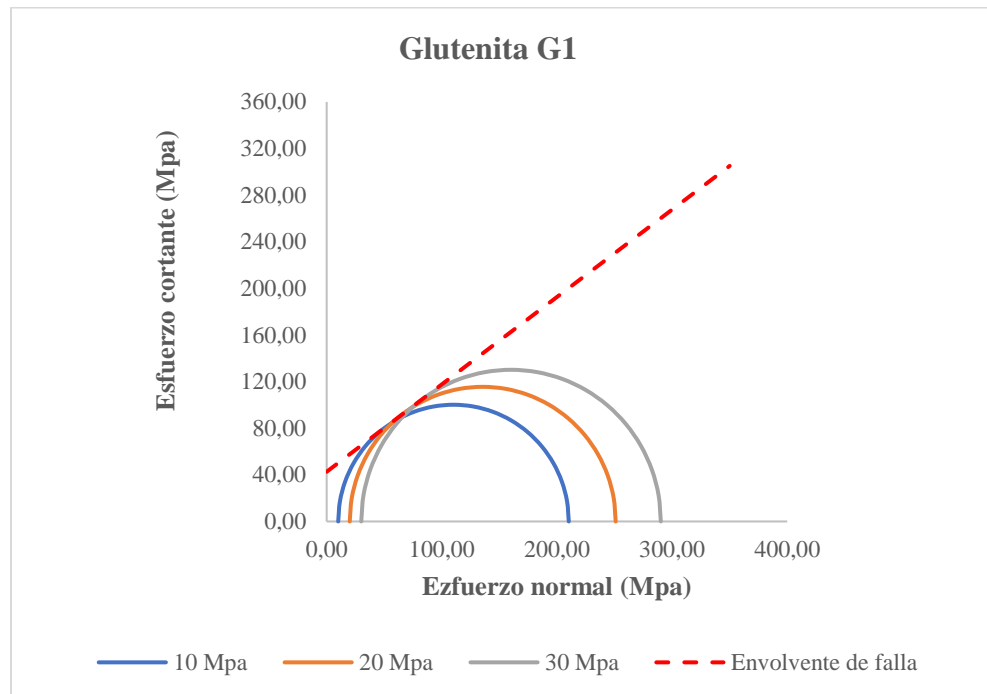
Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 17, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla para la muestra de shale de Murteree (profundidad: 11225,39 – 11613,97 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (18 Mpa = 0,018 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (20°). Ver anexo 3.

4.2.4. Círculos de Mohr, Junggar - China (C4).

Figura 18

Círculos de Mohr, Glutenita G1, Junngar - China (C4)

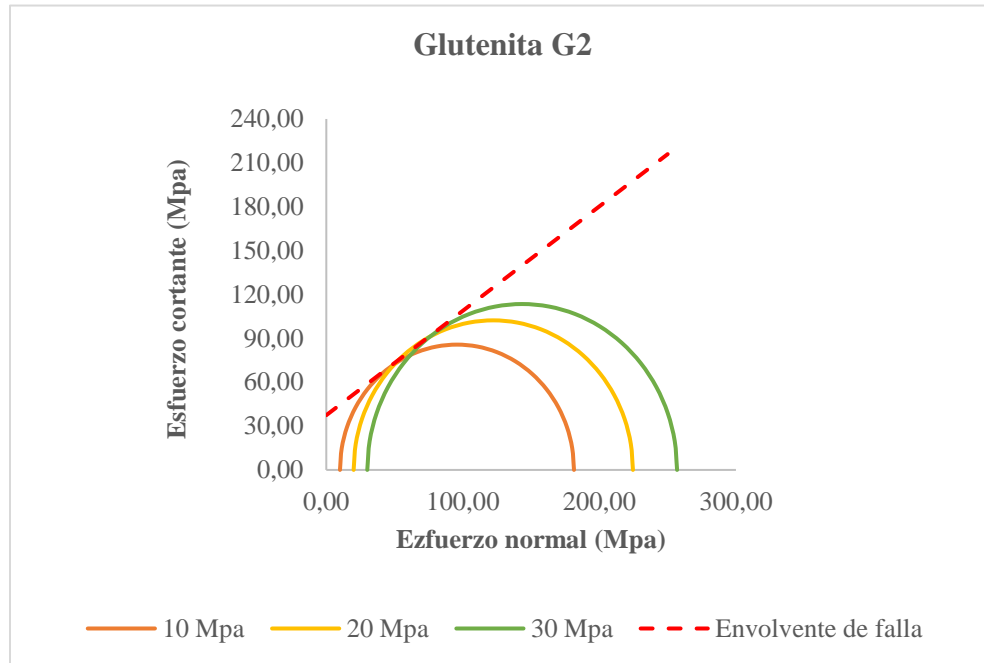


Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 18, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de glutenita (grupo 1) del campo Junngar – China, (profundidad: 10991.35 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (42,65 Mpa = 0,04265 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (36.86°). Ver anexo 4.

Figura 19

Círculos de Mohr, Glutenita G2, Junngar - China (C4)

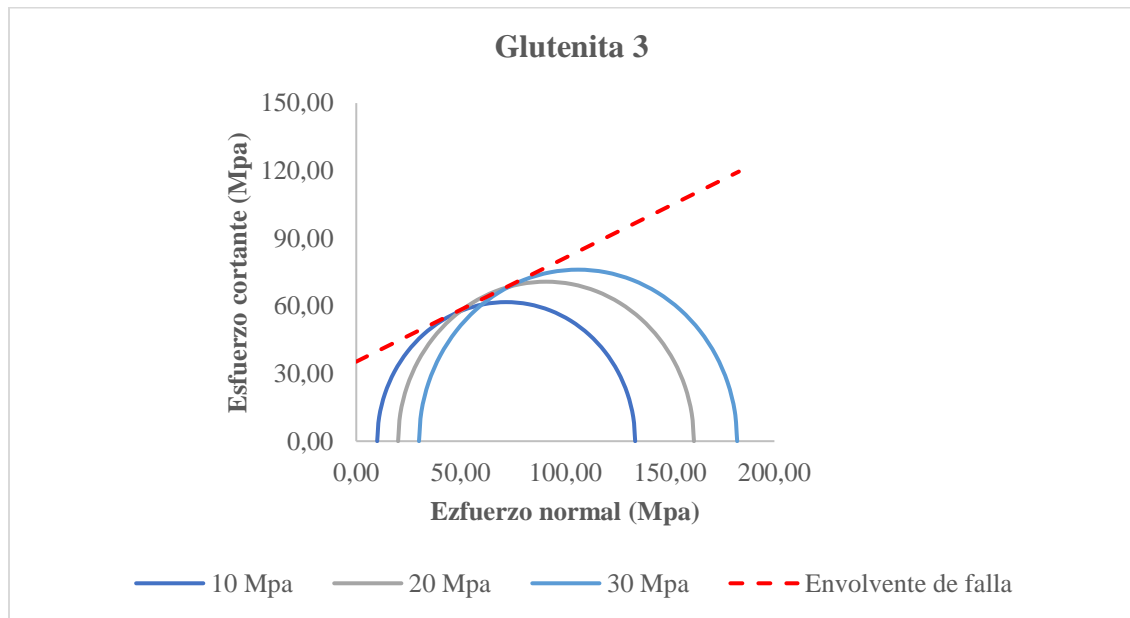


Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 19, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de glutenita (grupo 2) del campo Junngar – China, (profundidad: 10991.35 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión ($37,43 \text{ Mpa} = 0,03743 \text{ Gpa}$) y el ángulo de fricción interna de (35.53°). Ver anexo 4.

Figura 20

Círculos de Mohr, Glutenita G3, Junngar - China (C4)

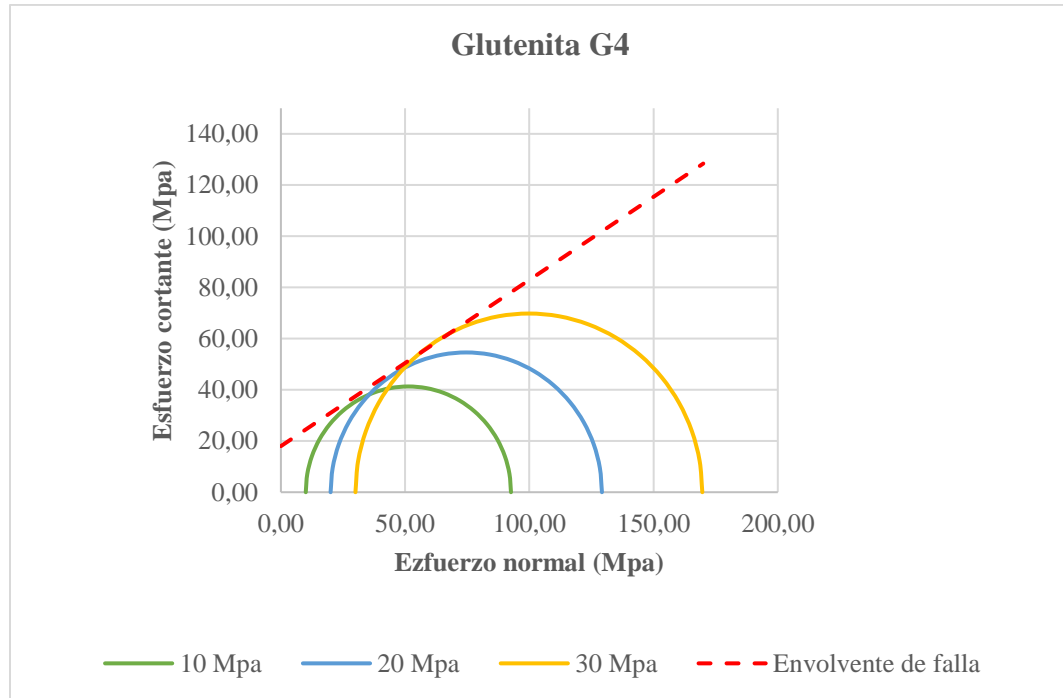


Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 20, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de glutenita (grupo 3) del campo Junngar – China, (profundidad: 10991.35 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (35,29 Mpa = 0,03529 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (24.74°). Ver anexo 5.

Figura 21

Círculos de Mohr, Glutenita G4, Junngar - China (C4)



Elaborado y organizado por los autores.

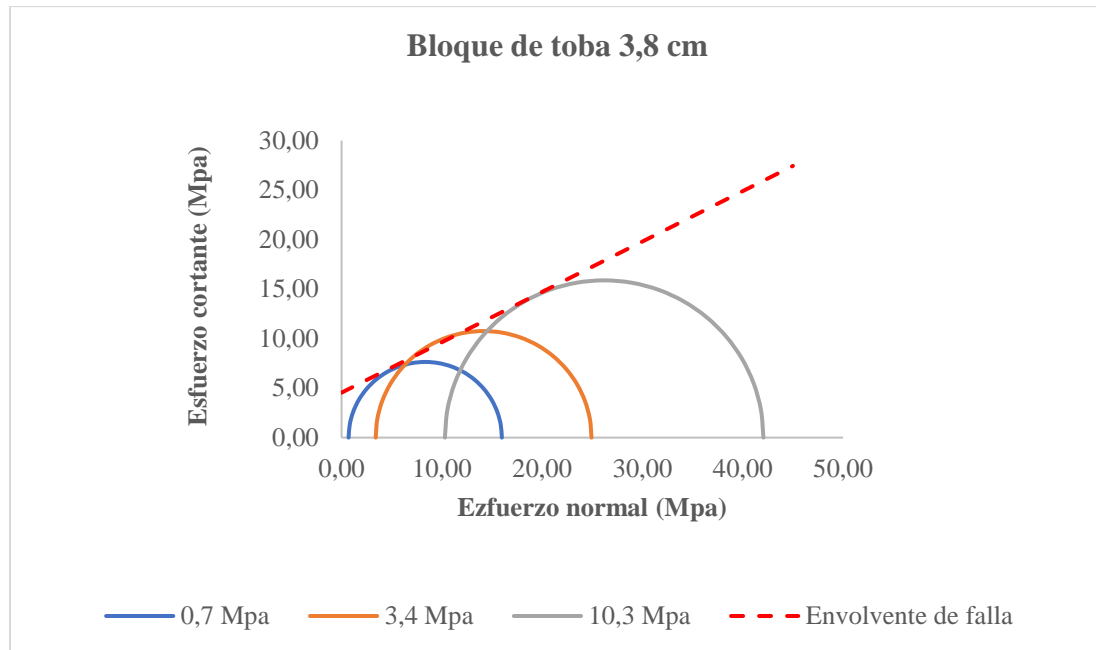
Nota. En la figura 21, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de Glutenita (grupo 4) del campo Junngar – China, (profundidad: 10991.35 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (17 Mpa = 0,017 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (34°).

Ver anexo 5.

4.2.5. Círculos de Mohr Bloques de Tobas – Newberry C (8).

Figura 22

Círculos de Mohr, bloque de Toba 3.8cm d, Newberry (C4)

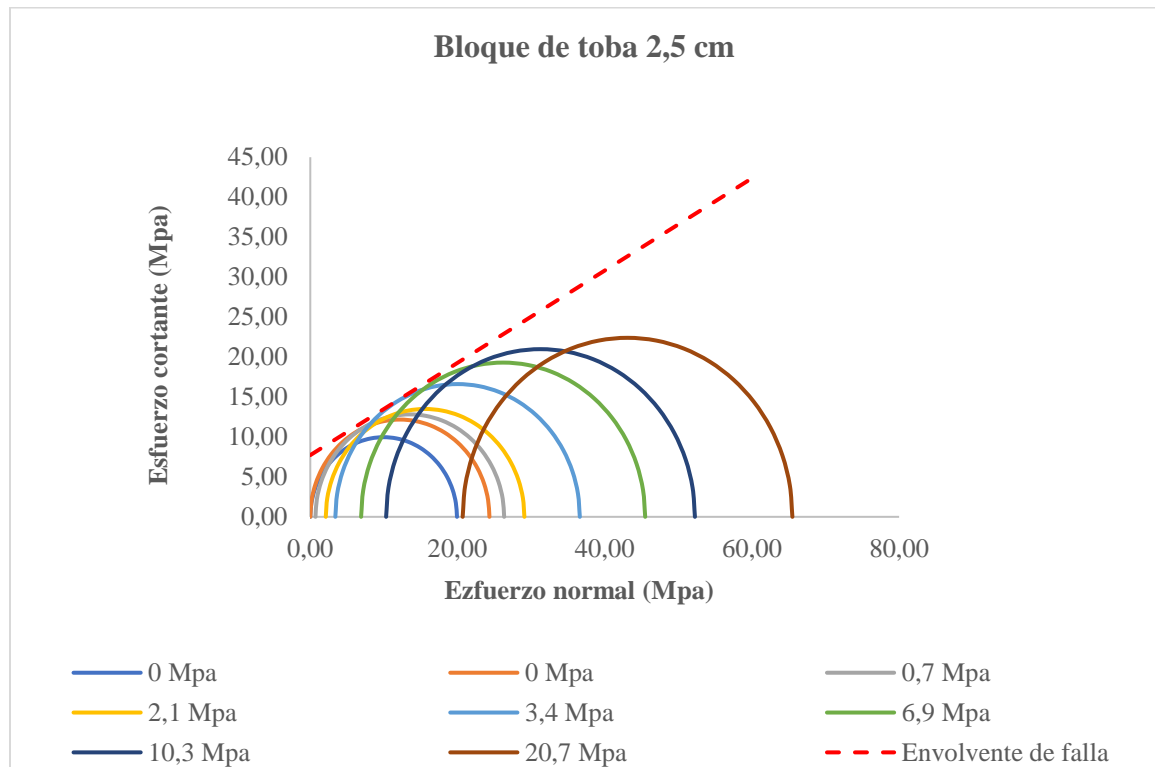


Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 22, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de bloque de Toba de 3.8 cm de diámetro del campo Newberry – USA, (profundidad: 10060 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (4,54 Mpa = 0,00454 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (26.97°). Ver anexo 6.

Figura 23

Círculos de Mohr, bloque de Toba 2,5 cm d, Newberry (C4)



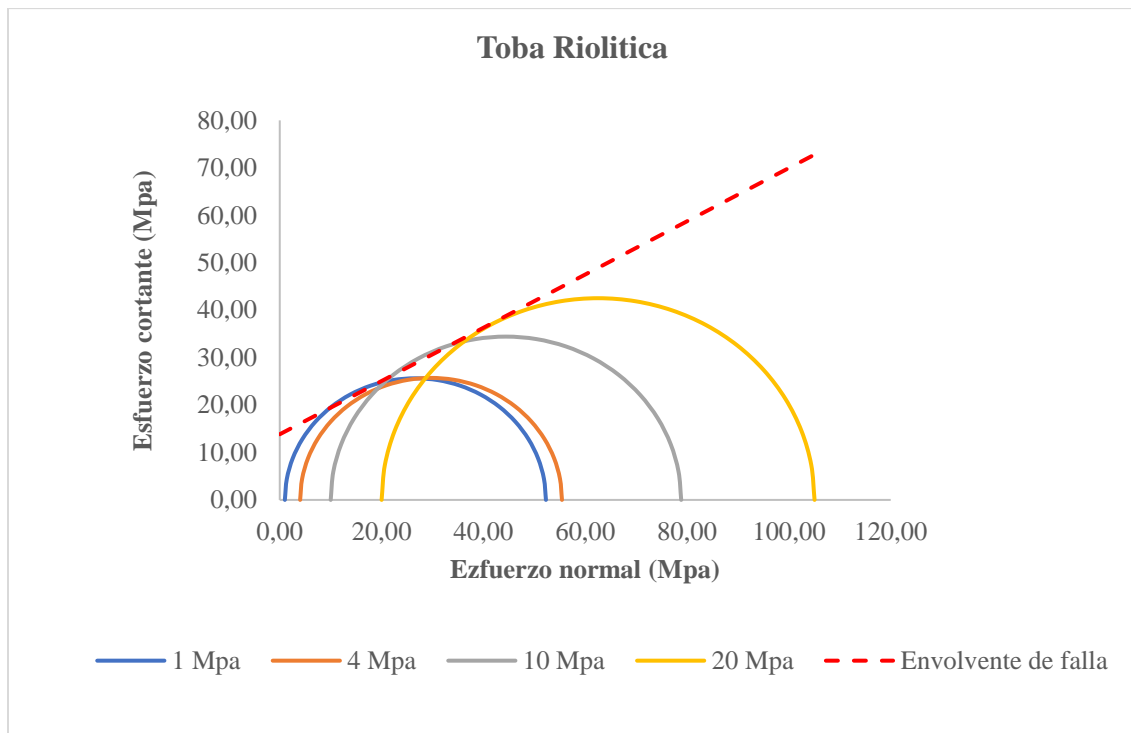
Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 23, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de bloque de Toba de 2.5 cm de diámetro del campo Newberry – USA, (profundidad: 10060 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión ($7,72 \text{ Mpa} = 0,00772 \text{ Gpa}$) y el ángulo de fricción interna de (20.17°). Ver anexo 7.

4.2.6. Círculos de Mohr Bloques de Tobas – Desert Peak C (10).

Figura 24

Círculo de Mohr, Toba riolítica, Desert Peak (C10)

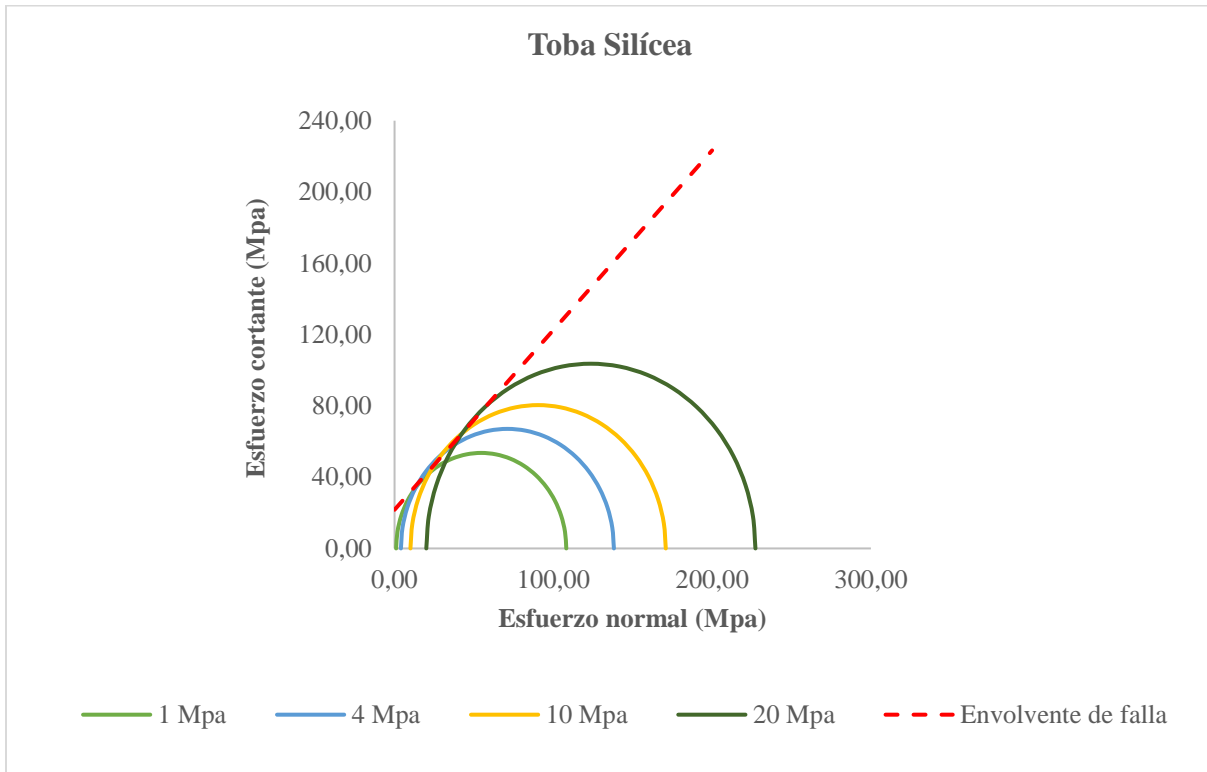


Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 24, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de boque de Toba riolítica del campo Desert Peak– USA, (profundidad: 2286 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (13,84 Mpa = 0,001384 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (29.3°). Ver anexo 8.

Figura 25

Círculo de Mohr, Toba silíce, Desert Peak (C10)

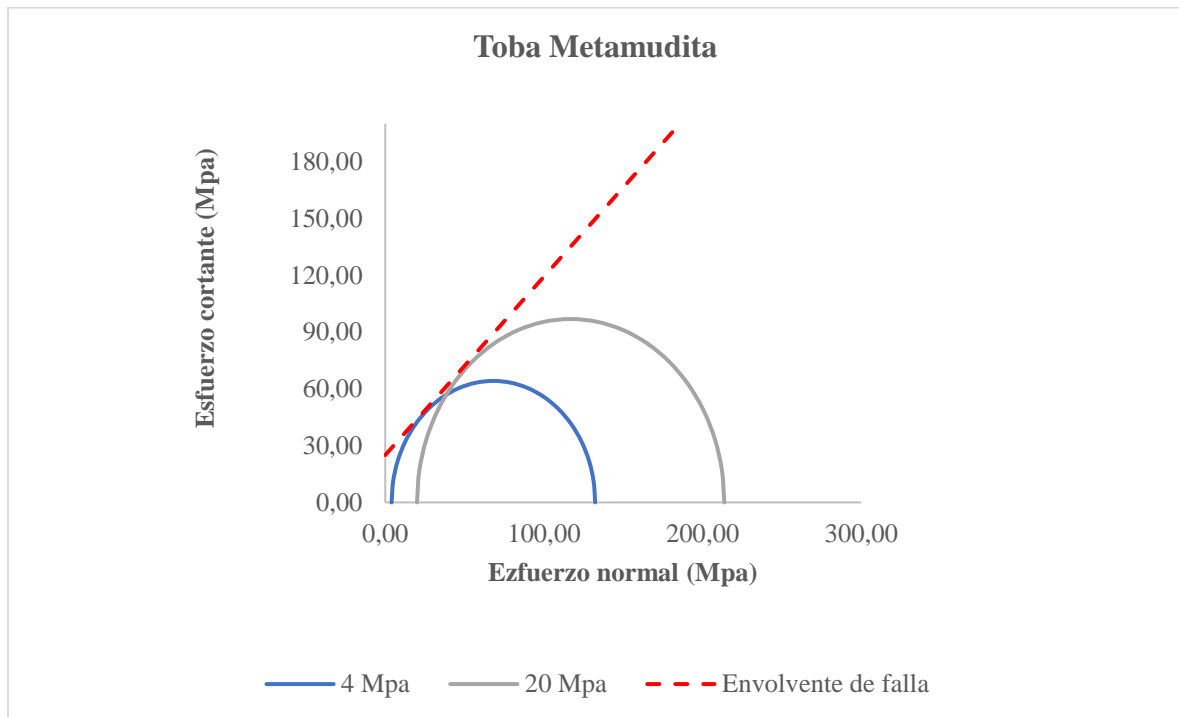


Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 25, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de boque de Toba silíce del campo Desert Peak– USA, (profundidad: 2286 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (21,27 Mpa = 0,002127 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (45,23°). Ver anexo 9.

Figura 26

Círculo de Mohr, Toba metamudita, Desert Peak (C10)



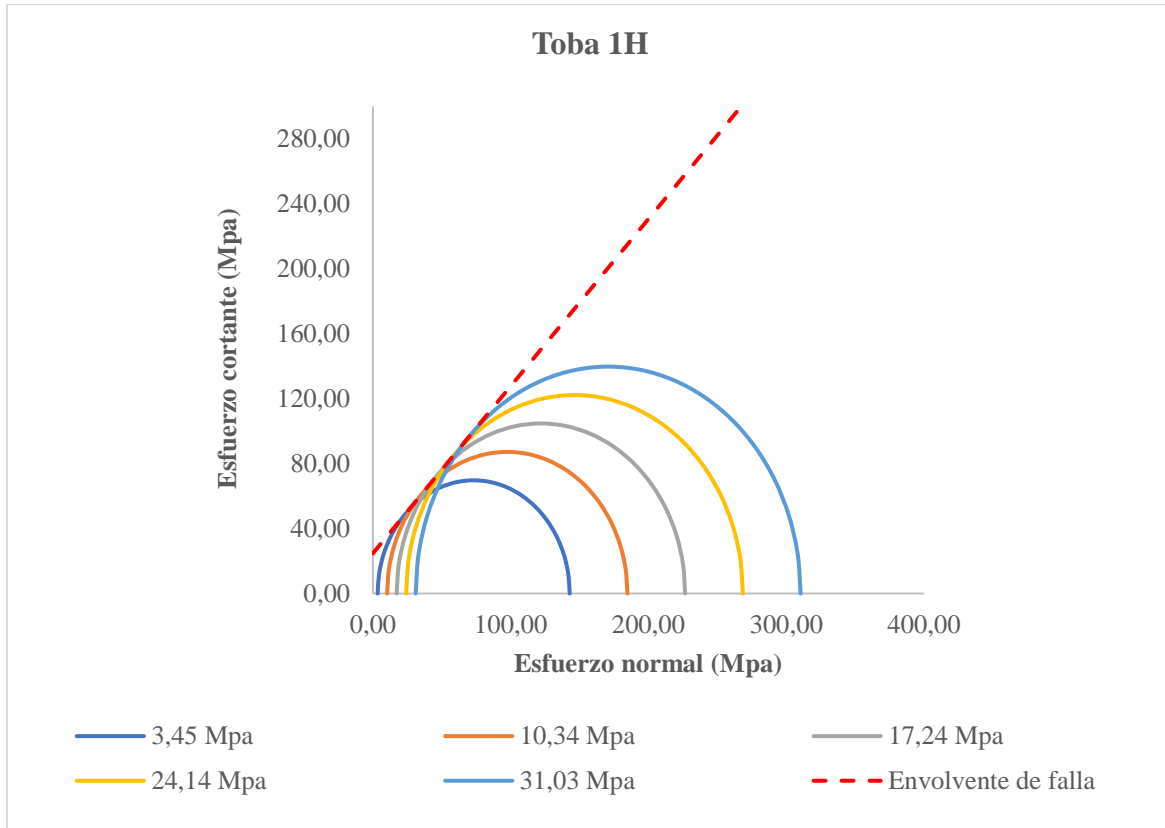
Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 26, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de boque de toba metamudita del campo Desert Peak– USA, (profundidad: 2286 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (25Mpa = 0,001879 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (43.3°). Ver anexo 10.

4.2.7. Círculos de Mohr bloque de toba – Newberry C (11).

Figura 27

Círculos de Mohr, muestra de Toba 1H, Newberry (C11)



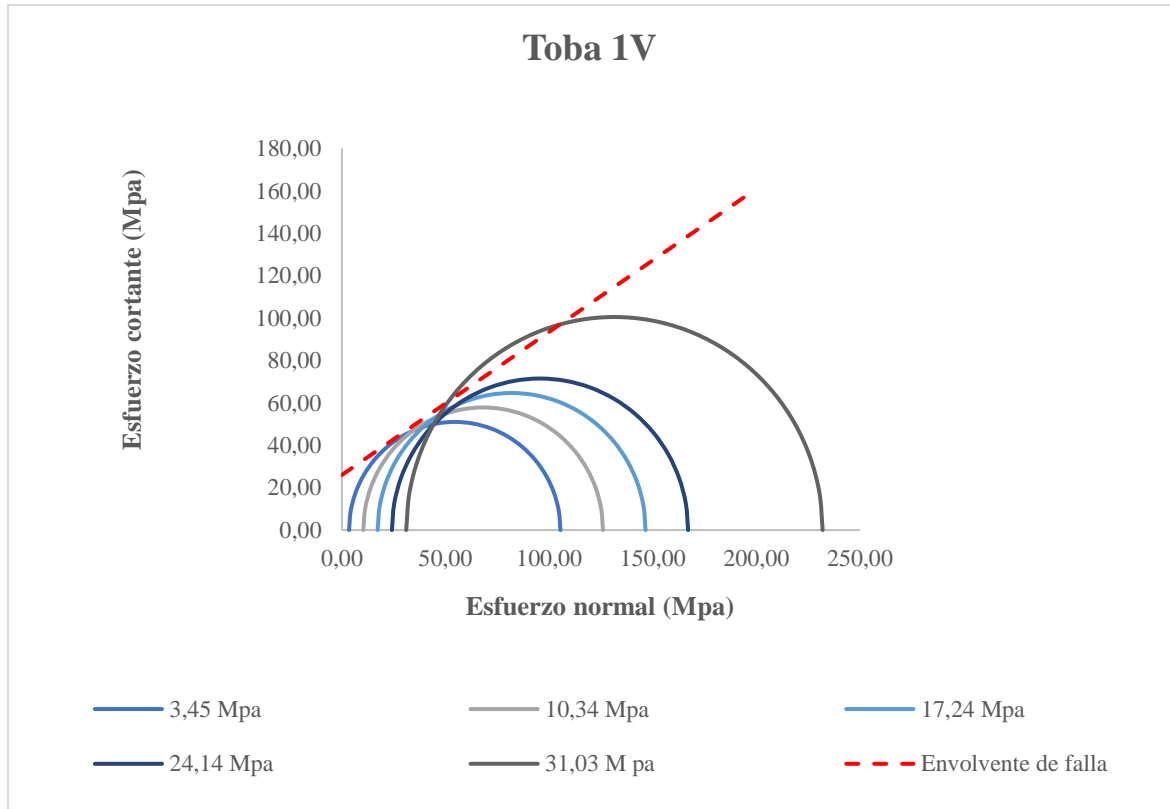
Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 27, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de Toba 1H del campo Newberry – USA, (profundidad: 4013,54 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (24,73 Mpa = 0,002473 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (43.3°).

Ver anexo 11.

Figura 28

Círculos de Mohr, muestra de Toba 1V, Newberry (C11)

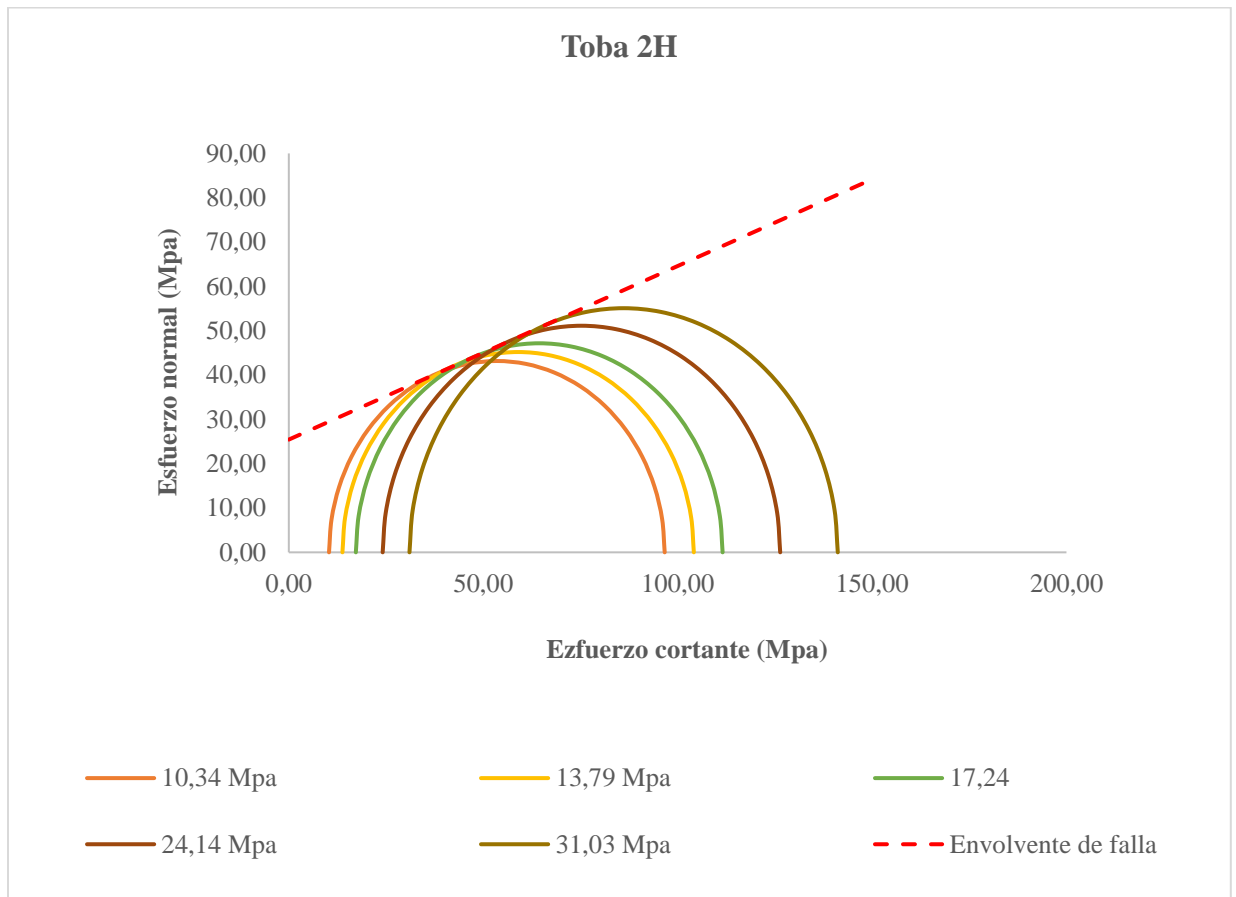


Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 28, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de Toba 1V del campo Newberry – USA, (profundidad: 4013,54 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (26 Mpa = 0,003248 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (34,01°). Ver anexo 12.

Figura 29

Círculos de Mohr, muestra de Toba 2H, Newberry (C11)



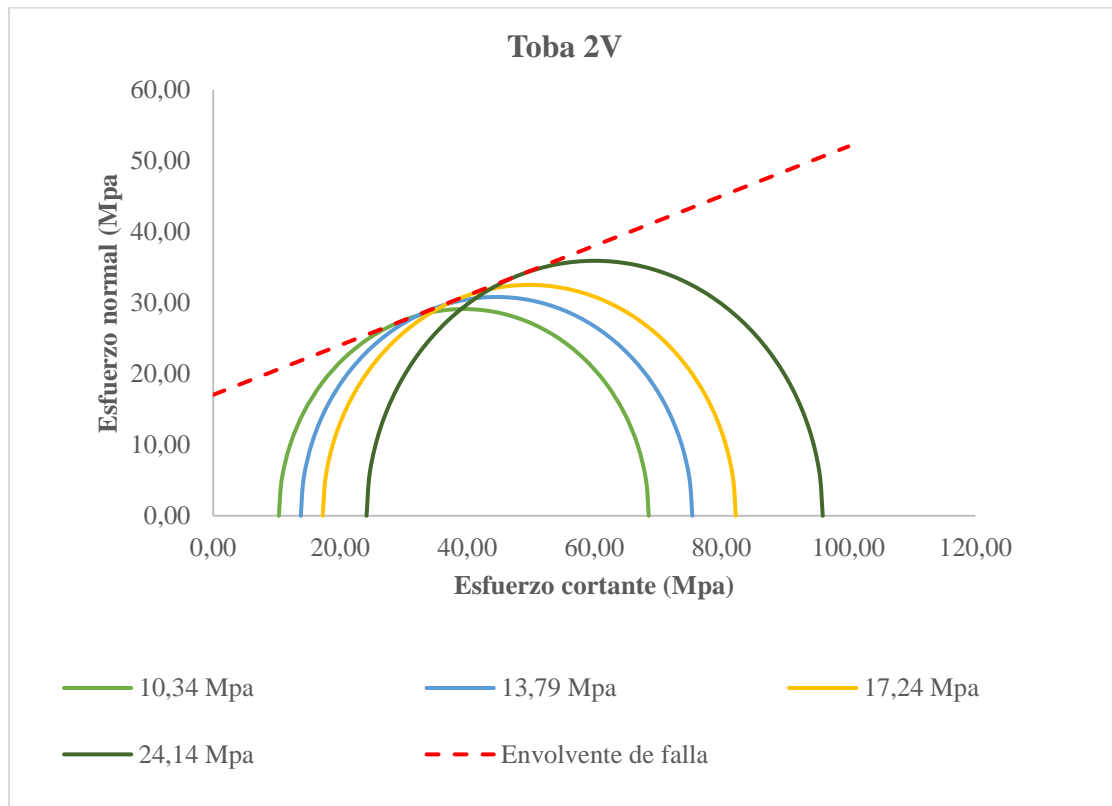
Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 29, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de Toba 2H del campo Newberry – USA, (profundidad: 4013,54 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (25,44 Mpa = 0,002544 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (21,38°).

Ver anexo 13.

Figura 30

Círculos de Mohr, muestra de Toba 2V, Newberry (C11)



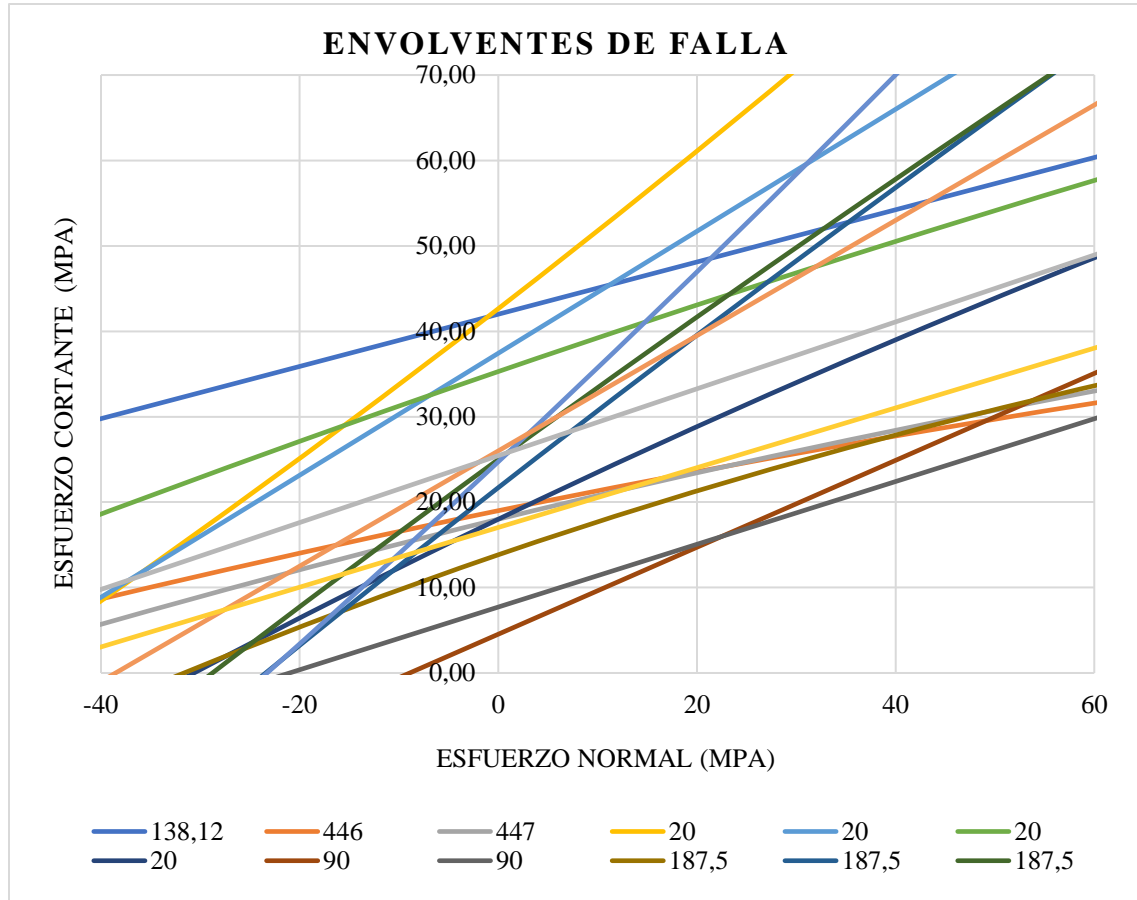
Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 30, se evidencia los círculos de Mohr y envolvente de falla de la muestra de Toba 2V del campo Newberry – USA, (profundidad: 4013,54 ft) del cual se puede inferir el coeficiente de cohesión (17,04 Mpa = 0,001704 Gpa) y el ángulo de fricción interna de (19,28°).

Ver anexo 14.

Figura 31

Gráfico comparativo de las envolventes de falla



Elaborado y organizado por los autores.

En el gráfico 31 se muestran las envolventes de falla reunidas en un solo gráfico para los casos de estudio sedimentarios y geotérmicos, los cuales varían según la temperatura de cada muestra.

En la figura 31, se muestran envolventes de falla según la variación de los niveles de esfuerzo cortante y normal, las líneas representan la variación de la resistencia de las rocas bajo diversos niveles de carga. Se evidencia que, con el aumento del esfuerzo normal, el esfuerzo cortante que se necesita para llegar a la falla debe aumentar.

4.3. Evaluación cuantitativa y análisis comparativo del índice de fragilidad

En el contexto de este proyecto de investigación, se realiza un análisis del índice de fragilidad (BI%) para las muestras de roca de los casos experimentales abordados en esta tesis. Este análisis comprende el cálculo del BI% y la descripción de su metodología.

El cálculo del índice de fragilidad se realiza aplicando las ecuaciones (12), (13) y (14) tal como se describe en el estudio de Fernández Rojas et al., (2015). Este procedimiento se lleva a cabo siguiendo la siguiente metodología:

- a) Primero, para realizar este cálculo se dispone a tener los parámetros de relación de Poisson y módulo de Young, este último en unidades de (Psi), esta conversión se aplica a todos los valores de las muestras de rocas presentadas en los casos de estudios de esta tesis, utilizando el siguiente factor de conversión: $1 \text{ Gpa} = 145038 \text{ Psi}$, para obtener un resultado aproximado, se multiplican los valores de $E \text{ (Gpa)}$ por 145000. Estos valores los podemos observar en las tablas 34 y 35.
- b) Segundo, se procede a calcular los valores de fragilidad con base al módulo de Young (E_{BRIT}) y a la relación de Poisson (V_{BRIT}), utilizando las ecuaciones (12) y (13) respectivamente, p. ej:

Cálculo de (E_{BRIT}) y (V_{BRIT}), para el shale de China.

$$E_{BRIT} = \left| \frac{3161414 - (1e + 06)}{(10e + 06) - (1e + 06)} \right| \rightarrow E_{BRIT} = 0.24 \text{ [adimensional]}$$

$$V_{BRIT} = \left| \frac{0.25 - 0.4}{0.05 - 0.4} \right| \rightarrow V_{BRIT} = 0.43 \text{ [adimensional]}$$

- c) Por último, se procede a calcular el IB% una vez obtenido los valores de (E_{BRIT}) y (V_{BRIT}), se aplica la formula (14), p. ej:

Cálculo de índice de fragilidad IB% del shale de China.

$$BI = \left| \frac{0.24 + 0.43}{2} \right| * 100 \rightarrow BI = 33,33 \%$$

Este mismo cálculo se aplica a todos los casos de estudios que se analizan en esta tesis, obteniendo para cada uno de ellos el índice de fragilidad IB%, según muestra la tabla 36y 37.

Tabla 19

Valores calculados de E (psi), E(BRIT%), V(BRIT%) y índice de fragilidad BI%, para muestras de ambientes geotérmicos.

Muestras de ambientes geotérmicas					
Muestra	E (Psi)	V	E (BRIT) %	V(BRIT) %	BI %
Toba 3,8 cm D	61,045	0,065	0,11	0,96	53,41%
Toba 2,5 cm D	95,99	0,07	0,11	0,94	52,70%
Toba Riolita	1126650	0,17	0,01	0,66	33,56%
Toba Silíceas	3623550	0,17	0,29	0,66	47,43%
Toba Metamudita	4961175	0,285	0,44	0,33	38,44%
Toba 1H	3933850	0,37	0,33	0,09	20,58%
Toba 1V	4013600	0,34	0,33	0,17	25,31%
Toba 2H	2341750	0,29	0,15	0,31	23,17%
Toba 2V	1873400	0,35	0,10	0,14	12,00%
Granito (china)	4413618,75	0,3635	0,38	0,10	24,18%
Granodiorita (patua)	10373452,6	0,24	1,04	0,46	74,93%
Toba basáltica M1	9338000	0,24	0,93	0,46	69,18%
Toba basáltica M2	9019000	0,25	0,89	0,43	65,98%
Toba basáltica M3	8772500	0,27	0,86	0,37	61,75%
Toba basáltica M4	7772000	0,31	0,75	0,26	50,48%
Toba basáltica M5	8446250	0,18	0,83	0,63	72,80%

Nota. En la tabla 19, podemos observar los valores del módulo de Young (E) ya convertidos a (Psi), los valores de relación de Poisson (V), los valores de (E_{BRIT}) y (V_{BRIT}), ya calculados y el índice de fragilidad BI% de cada muestra. Elaborado y organizado por los autores.

Tabla 20

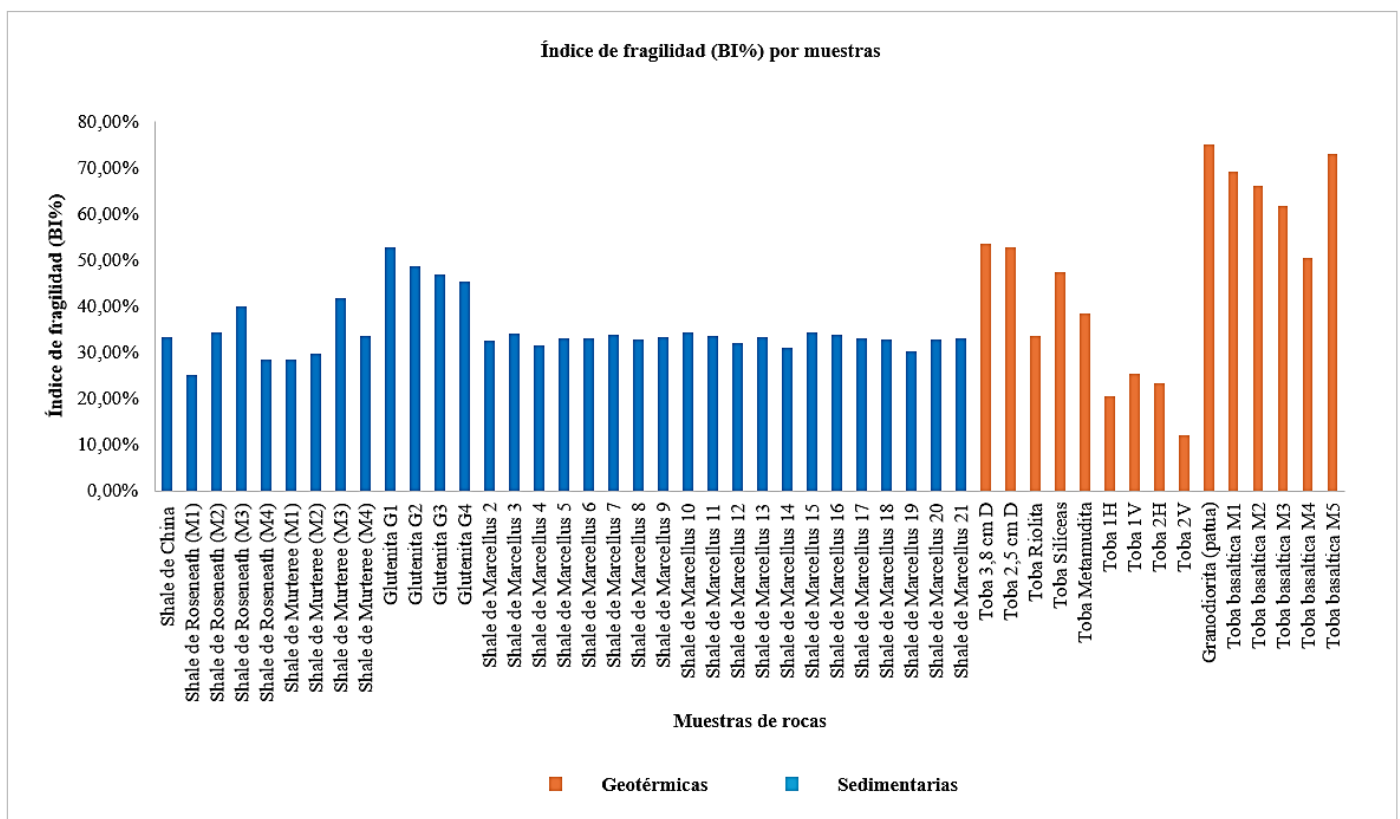
Valores calculados de E (psi), $E(\text{BRIT}\%)$, $V(\text{BRIT}\%)$ y índice de fragilidad $\text{BI}\%$, para muestras de ambientes sedimentarios.

Muestras de ambientes sedimentarios					
Muestra	E (Psi)	V	E (BRIT) %	V(BRIT) %	BI %
Shale de China	3161414	0,25	0,24	0,43	33,33%
Shale de Roseneath (M1)	2421500	0,28	0,16	0,34	25,04%
Shale de Roseneath (M2)	3045000	0,24	0,23	0,46	34,22%
Shale de Roseneath (M3)	2776750	0,19	0,20	0,60	39,87%
Shale de Roseneath (M4)	2019125	0,24	0,11	0,46	28,52%
Shale de Murteree (M1)	3262500	0,29	0,25	0,31	28,28%
Shale de Murteree (M2)	2251125	0,24	0,14	0,46	29,81%
Shale de Murteree (M3)	3889625	0,22	0,32	0,51	41,77%
Shale de Murteree (M4)	3422000	0,26	0,27	0,40	33,46%
Glutenita G1	4818350	0,18	0,42	0,63	52,64%
Glutenita G2	3833800	0,17	0,31	0,66	48,60%
Glutenita G3	3258150	0,16	0,25	0,69	46,83%
Glutenita G4	3239300	0,17	0,25	0,66	45,30%
Shale de Marcellus 2	2456300	0,23	0,16	0,49	32,38%
Shale de Marcellus 3	2511400	0,22	0,17	0,51	34,11%
Shale de Marcellus 4	2569400	0,24	0,17	0,46	31,58%
Shale de Marcellus 5	2566500	0,23	0,17	0,49	32,99%
Shale de Marcellus 6	2572300	0,23	0,17	0,49	33,02%
Shale de Marcellus 7	2451950	0,22	0,16	0,51	33,78%
Shale de Marcellus 8	2536050	0,23	0,17	0,49	32,82%
Shale de Marcellus 9	2601300	0,23	0,18	0,49	33,18%
Shale de Marcellus 10	2792700	0,23	0,20	0,49	34,25%
Shale de Marcellus 11	2668000	0,23	0,19	0,49	33,55%
Shale de Marcellus 12	2914500	0,25	0,21	0,43	32,06%
Shale de Marcellus 13	2366400	0,22	0,15	0,51	33,31%
Shale de Marcellus 14	2456300	0,24	0,16	0,46	30,95%
Shale de Marcellus 15	2562150	0,22	0,17	0,51	34,39%
Shale de Marcellus 16	2440350	0,22	0,16	0,51	33,72%
Shale de Marcellus 17	2554900	0,23	0,17	0,49	32,92%
Shale de Marcellus 18	2502700	0,23	0,17	0,49	32,63%
Shale de Marcellus 19	2595500	0,25	0,18	0,43	30,29%
Shale de Marcellus 20	2518650	0,23	0,17	0,49	32,72%
Shale de Marcellus 21	2328700	0,22	0,15	0,51	33,10%

Nota. En la tabla 20, podemos observar los valores del módulo de Young (E) ya convertidos a (Psi), los valores de relación de Poisson (V), los valores de (E_{BRIT}) y (V_{BRIT}), ya calculados y el índice de fragilidad BI% de cada muestra de ambientes sedimentarios. Elaborado y organizado por los autores.

Figura 32

Índice de fragilidad (BI%) por muestras



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 32, se observa el gráfico correspondiente al índice de fragilidad por cada una de las muestras analizadas, provenientes de ambientes sedimentarios y geotérmicos.

Tabla 21

Valores de índice de fragilidad a diferentes temperaturas y presiones de confinamiento de muestras sedimentarias

Muestras de ambientes sedimentarios				
Muestra	Temperatura °C	Profundidad (ft)	Presión de confinamiento (Mpa)	BI %
Shale de China	138,12	12310,73	45	33,33%
Shale de Roseneath (M1)	446	10391,03	25	25,04%
Shale de Roseneath (M2)	446	10771,69	25	34,22%
Shale de Roseneath (M3)	446	10794,82	25	39,87%
Shale de Roseneath (M4)	446	10883,08	25	28,52%
Shale de Murteree (M1)	447	11224,47	25	28,28%
Shale de Murteree (M2)	447	11501,05	25	29,81%
Shale de Murteree (M3)	447	11538,62	25	41,77%
Shale de Murteree (M4)	447	11614,54	25	33,46%
Glutenita G1	20	10991,35	20	52,64%
Glutenita G2	20	10991,35	20	48,60%
Glutenita G3	20	10991,35	20	46,83%
Glutenita G4	20	10991,35	20	45,30%
Shale de Marcellus 2	-----	13488,50	-----	32,38%
Shale de Marcellus 3	-----	13257,50	-----	34,11%
Shale de Marcellus 4	-----	13023,50	-----	31,58%
Shale de Marcellus 5	-----	12790,50	-----	32,99%
Shale de Marcellus 6	-----	12554,00	-----	33,02%
Shale de Marcellus 7	-----	12325,50	-----	33,78%
Shale de Marcellus 8	-----	12104,50	-----	32,82%
Shale de Marcellus 9	-----	11876,00	-----	33,18%
Shale de Marcellus 10	-----	11646,00	-----	34,25%
Shale de Marcellus 11	-----	11417,00	-----	33,55%
Shale de Marcellus 12	-----	11185,00	-----	32,06%
Shale de Marcellus 13	-----	10956,00	-----	33,31%
Shale de Marcellus 14	-----	10730,00	-----	30,95%
Shale de Marcellus 15	-----	10524,50	-----	34,39%
Shale de Marcellus 16	-----	10343,00	-----	33,72%
Shale de Marcellus 17	-----	10162,00	-----	32,92%
Shale de Marcellus 18	-----	9980,50	-----	32,63%
Shale de Marcellus 19	-----	9794,50	-----	30,29%
Shale de Marcellus 20	-----	9591,00	-----	32,72%
Shale de Marcellus 21	-----	9361,50	-----	33,10%

Nota. En la tabla 21, se pueden observar los valores de temperatura (°C), profundidad (ft), presión de confinamiento (Mpa), e índice de fragilidad (%) anteriormente calculado. En el caso de estudio del shale de Marcellus, para esta investigación no se disponía de los valores de temperatura y presión de confinamiento. Elaborado y organizado por los autores.

Tabla 22

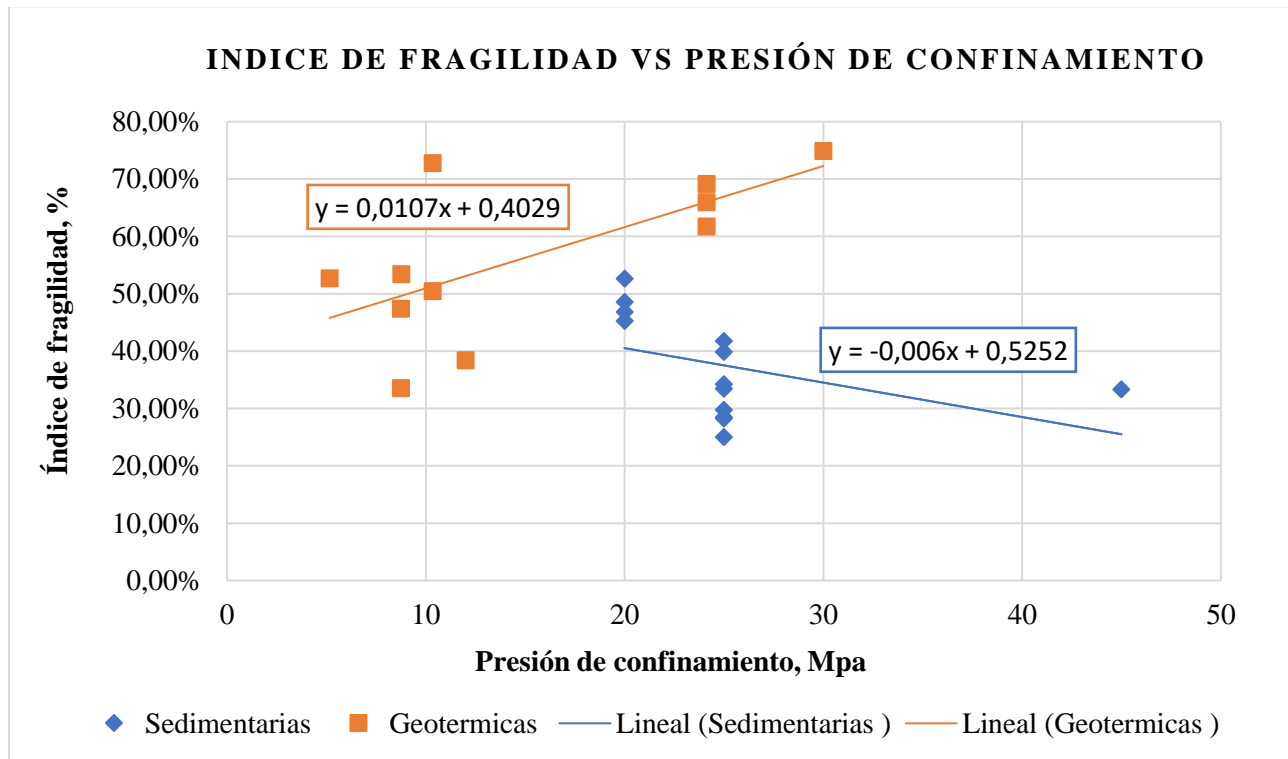
Valores de índice de fragilidad a diferentes temperaturas y presiones de confinamiento de muestras geotérmicas

Muestras de ambientes geotérmicos				
Muestra	Temperatura °C	Profundidad (ft)	Presión de confinamiento (Mpa)	BI %
Toba 3,8 cm D	90	10060	8,77	53,41%
Toba 2,5 cm D	90	10060	5,16	52,70%
Toba Riolita	187,5	2286	8,75	33,56%
Toba Silíceas	187,5	2437	8,75	47,43%
Toba Metamudita	187,5	2624	12	38,44%
Toba 1H	90	4013,5	17,24	20,58%
Toba 1V	90	4013,5	17,24	25,31%
Toba 2H	90	4348,5	19,31	23,17%
Toba 2V	90	4348,5	19,31	12,00%
Granodiorita (patua)	201	5561,5	30	74,93%
Toba basáltica M1	90	4300	24,13	69,18%
Toba basáltica M2	90	4300	24,13	65,98%
Toba basáltica M3	90	4300	24,13	61,75%
Toba basáltica M4	90	4300	10,34	50,48%
Toba basáltica M5	90	4300	10,34	72,80%

Nota. En la tabla 22, se pueden observar los valores de temperatura (°C), profundidad (ft), presión de confinamiento (Mpa), e índice de fragilidad (%) anteriormente calculado. Elaborado y organizado por los autores.

Figura 33

Gráfico comparativo del índice de fragilidad vs presión de confinamiento



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. La figura 33 presenta el análisis comparativo del índice de fragilidad (BI%) frente a la presión de confinamiento (Mpa) para las muestras provenientes de ambientes sedimentarios y geotérmicos. Se destaca la correlación para cada conjunto de muestra, evidencia a través de las líneas de tendencias y sus respectivas ecuaciones lineales.

En el anterior gráfico, figura 34, se observa el comportamiento del índice de fragilidad frente a la presión de confinamiento de diferentes muestras rocosas de ambientes sedimentarios y geotérmicos. Las muestras sedimentarias de estos casos presentan una tendencia general, a medida que aumenta la presión de confinamiento disminuye el índice de fragilidad. Para las muestras geotérmicas se observa un aumento en los valores de índice de fragilidad a medida que aumenta

la presión de confinamiento. Es importante resaltar que esta relación no es perfectamente lineal y hay cierta dispersión en los datos.

Además, es notable que la pendiente negativa para las muestras sedimentarias indica una correlación inversa entre los parámetros analizados. Así mismo se observa una variabilidad significativa en los valores de índice de fragilidad para ambos tipos de rocas. Este comportamiento podría deberse a diferentes características de los tipos de rocas o condiciones geológicas de formación.

La composición de las muestras sedimentarias puede contener una variedad de componentes que pueden generar heterogeneidad en los resultados. Así como el índice de fragilidad que se refiere a la susceptibilidad de las muestras a la deformación bajo presión o a la deformación, al haber mayor presión de confinamiento las partículas pueden compactarse más, lo que conlleva a una disminución del índice de fragilidad, debido a que las partículas se comprimen y generan mayor resistencia a la deformación. (Madrid, López, & Jiménez, 2012).

4.4. Análisis comparativo de la influencia de la temperatura en la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Tabla 23

Valores de cohesión y ángulo de fricción interna frente a la temperatura- Muestras sedimentarias

Muestras de ambientes sedimentarios					
Muestra	Temperatura °C	Profundidad (ft)	Presión de confinamiento (Mpa)	Cohesión (Mpa)	Angulo de fricción interna (°)
Shale de China	138,12	12310,73	45	42	16,8
Shale de Roseneath (M1)	446	10391,03	25	19	17
Shale de Roseneath (M2)	446	10771,69	25	19	17
Shale de Roseneath (M3)	446	10794,82	25	19	17
Shale de Roseneath (M4)	446	10883,08	25	19	17
Shale de Murteree (M1)	447	11224,47	25	18	20,00
Shale de Murteree (M2)	447	11501,05	25	18	20,00
Shale de Murteree (M3)	447	11538,62	25	18	20,00
Shale de Murteree (M4)	447	11614,54	25	18	20,00
Glutenita G1	20	10991,35	20	42,65	36,86
Glutenita G2	20	10991,35	20	37,43	35,53
Glutenita G3	20	10991,35	20	35,29	24,74
Glutenita G4	20	10991,35	20	16,94	33,97

Nota. En la tabla 23, se encuentran los valores de temperatura, profundidad, presión de confinamiento, cohesión y ángulo de fricción interna de las muestras de ambientes sedimentarios.

Elaborado y organizado por los autores.

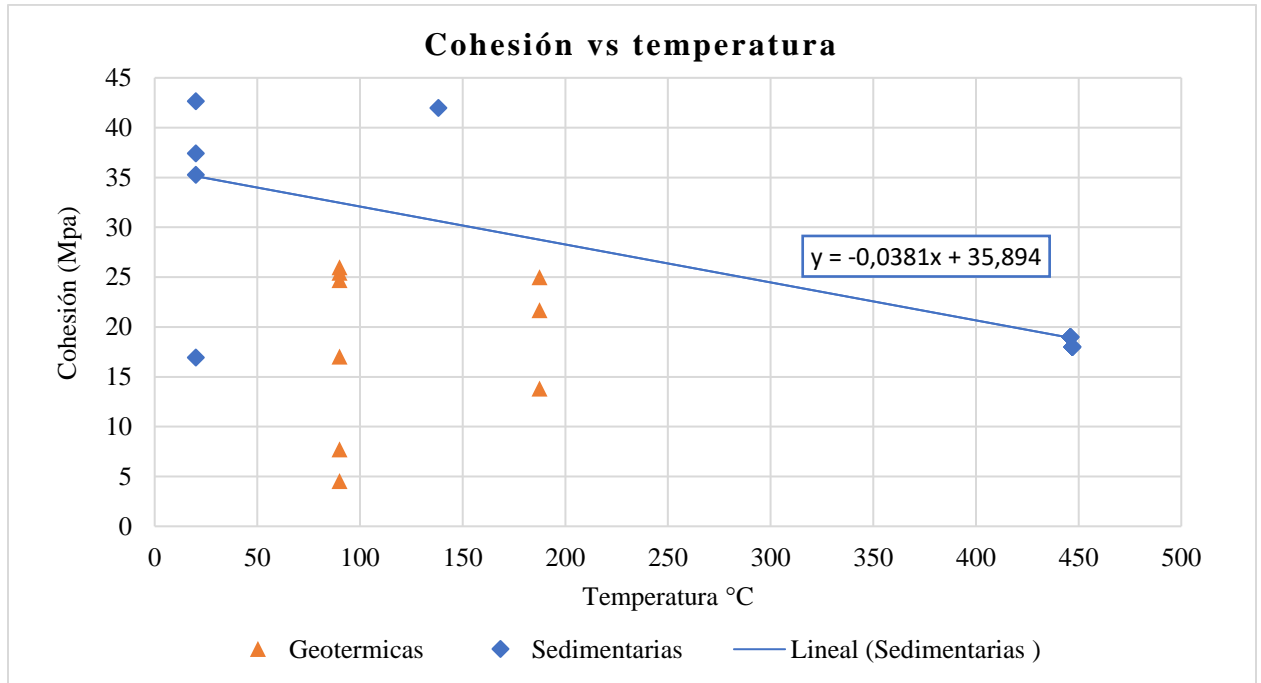
Tabla 24*Valores de cohesión y ángulo de fricción interna frente a la temperatura- Muestras geotérmicas*

Muestras de ambientes geotérmicas					
Muestra	Temperatura °C	Profundidad (ft)	Presión de confinamiento (Mpa)	Cohesión (Mpa)	Angulo de fricción interna (°)
Toba 3,8 cm D	90	10060	8,77	4,54	26,97
Toba 2,5 cm D	90	10060	5,16285	7,72	20,17
Toba Riolita	187,5	2286	8,75	13,84	29,30
Toba Silíceas	187,5	2437	8,75	21,7	45,23
Toba Metamudita	187,5	2624	12	25	43,30
Toba 1H	90	4013,5	17,24	24,73	45,83
Toba 1V	90	4013,5	17,24	26	34,01
Toba 2H	90	4348,5	19,308	25,44	21,38
Toba 2V	90	4348,5	19,308	17,04	19,28
Granodiorita (patua)	201	5561,5	30	-----	48,53
Toba basáltica M1	90	4300	24,13	-----	43,77
Toba basáltica M2	90	4300	24,13	-----	41,28
Toba basáltica M3	90	4300	24,13	-----	38,14
Toba basáltica M4	90	4300	10,34	-----	30,32
Toba basáltica M5	90	4300	10,34	-----	46,72

Nota. En la tabla 24, se encuentran los valores de temperatura, profundidad, presión de confinamiento, cohesión y ángulo de fricción interna de las muestras de ambientes geotérmicos. En el caso de las muestras de tobas basálticas y granodiorita del campo Patua, no fue posible determinar los valores de cohesión debido a la ausencia de datos esenciales requeridos para el cálculo. Elaborado y organizado por los autores.

Figura 34

Gráfica comparativo de la cohesión vs temperatura



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 34, se puede observar el gráfico de la cohesión (Mpa) frente a la temperatura (°C) para las muestras provenientes de ambientes sedimentarios y geotérmicos. Se destaca la correlación existente para cada conjunto de muestras, evidenciada a través de las líneas de tendencia y sus respectivas ecuaciones lineales.

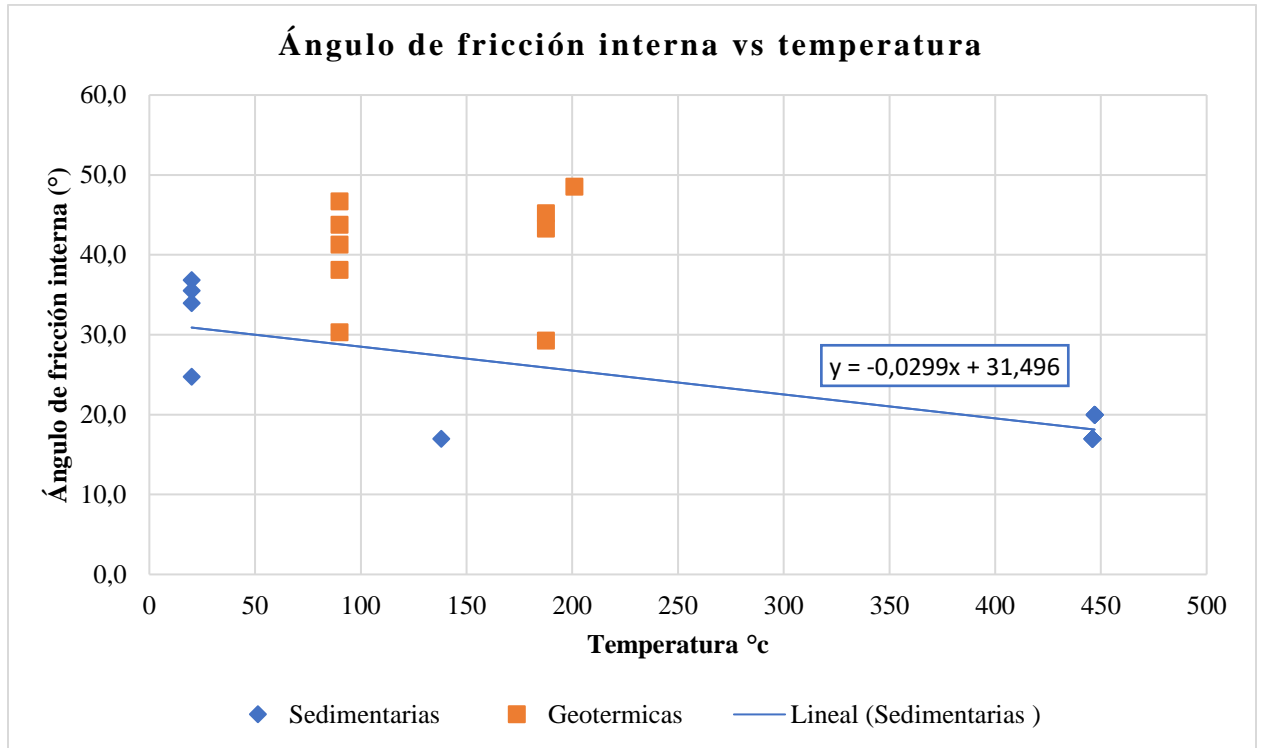
Basándonos en los datos proporcionados de los casos experimentales antes mencionados, se puede realizar un análisis preliminar de las tendencias de la cohesión en relación con la temperatura, para los diferentes tipos de rocas de ambientes sedimentarios y geotérmicos.

- Para las muestras de rocas sedimentarias, se puede observar que, a 20°C la cohesión es relativamente alta, con valores entre 16,94 y 42,65 Mpa; a 138,12°C, la cohesión disminuye a 42 Mpa y a 446 - 447 °C, la cohesión aumenta ligeramente a valores alrededor de 18 y 19 Mpa. Figura 31.
- Para las muestras geotérmicas se puede observar que a 187,5 °C la cohesión varía entre 13,84 y 25 Mpa, y a 90°C este valor varía entre 17,04 y 26 Mpa, indicando una considerable variabilidad a temperaturas constantes. Figura 31.

Para estos casos, estas observaciones sugieren que el comportamiento de la cohesión de muestras de rocas de ambientes sedimentarios tiene una tendencia a disminuir a medida que se incrementa la temperatura. Para las rocas geotérmicas, la variabilidad en la cohesión a diferentes temperaturas, no se encuentra una explicación clara para dicho comportamiento, ya que los datos analizados no muestran ninguna tendencia en el gráfico. Esto podría deberse a diferencias en su composición mineralógica, lo que resalta la necesidad de una investigación a nivel experimental para establecer cuál es el comportamiento de este parámetro frente a la temperatura.

Figura 35

Gráfico comparativo del ángulo de fricción interna vs la temperatura



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 35, podemos observar el gráfico del ángulo de fricción interna (°) frente a la temperatura (°C) para las muestras provenientes de ambientes sedimentarios y geotérmicos. Se destaca la correlación existente para cada conjunto de muestras, evidenciada a través de las líneas de tendencia y sus respectivas ecuaciones lineales.

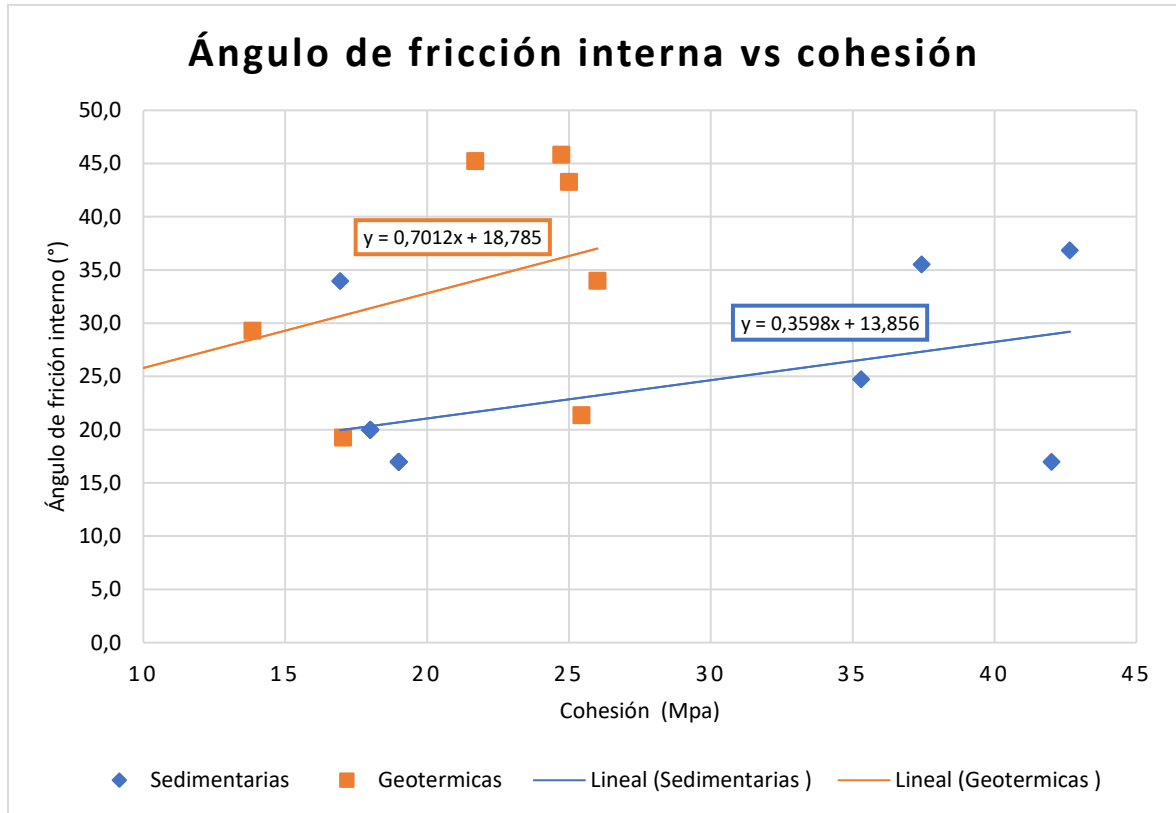
Para el análisis del comportamiento del ángulo de fricción interna de rocas de ambientes sedimentarios y geotérmicos a diferentes temperaturas, se puede analizar las siguientes tendencias con los datos proporcionados.

- Para las muestras de rocas sedimentarias, se puede observar que a temperaturas bajas (20°C), los valores del ángulo de fricción interna son relativamente altos, variando entre 24.74 y $36,86^{\circ}$; a la temperatura de $138,12^{\circ}\text{C}$ el ángulo de fricción interna disminuye a 17° y a temperaturas más altas entre 446 y 447°C , el ángulo de fricción interna se mantiene constante alrededor de 17° a 20° .
- Para las muestras de ambientes geotérmicos, se puede observar que a la temperatura de $187,5^{\circ}\text{C}$ los valores del ángulo de fricción interna varían significativamente, entre $29,3^{\circ}$ hasta $45,23^{\circ}$; a una temperatura más alta de 200°C , el ángulo de fricción interna aumenta considerablemente a $48,5^{\circ}$ y a temperaturas más bajas de 90°C los valores del ángulo de fricción interna son más altos, oscilando entre $30,32^{\circ}$ y $46,7^{\circ}$.

En estos casos, estas observaciones sugieren que los valores del ángulo de fricción interna en rocas de ambientes sedimentarios tienden a ser más altos a temperaturas más bajas y disminuye ligeramente a temperaturas más altas. Para las rocas geotérmicas, No se observa ninguna explicación clara en este comportamiento ya que los datos analizados no presentan una tendencia definida al ser graficados. Esto podría estar relacionado con variaciones en su composición mineralógica en las muestras analizadas.

Figura 36

Gráfico de ángulo de fricción interno vs cohesión



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 36, podemos observar el gráfico del ángulo de fricción interna (°) frente la cohesión (Mopa) para las muestras provenientes de ambientes sedimentarios y geotérmicos. Se destaca la correlación existente para cada conjunto de muestras, evidenciada a través de las líneas de tendencia y sus respectivas ecuaciones lineales.

Para el análisis del comportamiento del ángulo de fricción interna de rocas de ambientes sedimentarios y geotérmicos frente a la cohesión, se puede analizar las siguientes tendencias con los datos proporcionados.

Muestras sedimentarias

- Las muestras de shale presentan valores de ángulos de fricción interna bajos (17-20°), indicando una baja resistencia al deslizamiento.
- El shale de China caso (C1), tiene una cohesión significativamente más alta (42 Mpa) en comparación con otros shales, sugiriendo una mayor capacidad de resistir fuerzas de corte.
- Las muestras de glutenitas caso (C4), tienen valores de ángulos de fricción interna más altos (24,74° - 36,86°) y una variabilidad considerable en los valores de cohesión. En las muestras de glutenita G1 y G2 se evidencian altos valores de ángulos de fricción interna y cohesión, mientras que la muestra de glutenita G4 tiene un ángulo de fricción relativamente alto con una cohesión baja.

Muestras geotérmicas

- Las Tobas presentan una amplia variabilidad en el ángulo de fricción interna (19,28° - 45,83°) y cohesión (4,54 - 26).
- Las muestras de Tobas con valores de ángulos de fricción interna altos (Toba Silíceas, Toba 1H) también presentan valores de cohesión relativamente altos, lo que indica una mayor resistencia tanto al deslizamiento como a la ruptura.
- Para las muestras de Tobas con cohesión baja (Toba 3,8 cm D) tienen valores de ángulos de fricción interna moderados (26,97°), indicando una resistencia moderada tanto al deslizamiento como a la ruptura.

4.5. Análisis y aplicabilidad de las propiedades geomecánicas en proyectos petroleros y geotérmicos.

Para el análisis de la aplicabilidad de las propiedades geomecánica en proyectos petroleros y geotérmicos, nos centramos en el análisis integral de los casos experimentales estudiados. A través de estos estudios, se han obtenido datos importantes sobre las propiedades geomecánicas de las rocas, tales como módulo de Young y relación de Poisson. Estos parámetros han sido de gran importancia para el cálculo del índice de fragilidad, un dato clave que ha permitido evaluar la aplicabilidad de estas propiedades en proyectos geotérmicos y petroleros en temas de fracturamiento hidráulico y construcción de ventana de lodo.

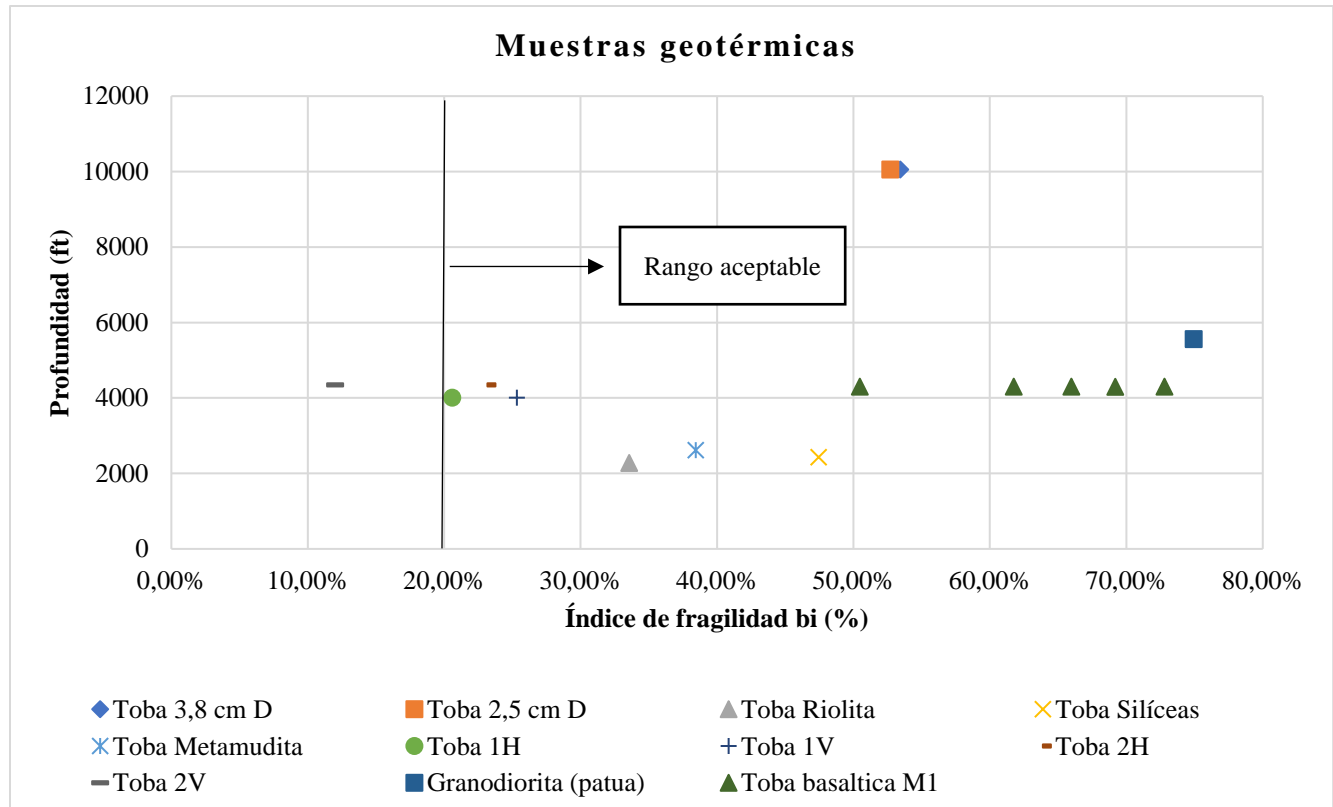
4.5.1. Consideraciones para fracturamiento hidráulico

Según los autores Fernández, Quintero, & Calderón (2015), un índice de fragilidad mayor o igual a 40% representa una formación prospecta a fracturar hidráulicamente, sin embargo, los valores menores a 40% hasta un 20% pueden considerarse aceptables en intervalos de interés o "sweet spots" teniendo en cuenta el fluido de fractura apropiado a utilizar.

Según esta consideración, se pueden definir cuales tipos de muestras de diferentes formaciones son prospectos a un fracturamiento hidráulico, tomando como base, los casos estudiados:

Figura 38

Gráfico de la profundidad (ft) vs índice de fragilidad (BI%) de muestras geotérmicas



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 38, se observa el gráfico de la profundidad (ft) vs el índice de fragilidad (BI%) de las muestras procedentes de ambientes sedimentarios. Este gráfico es adaptado utilizando los datos detallados en la tabla 22.

Rocas Geotérmicas: Para estos casos se puede observar que las muestras que son prospectas para fracturamiento hidráulico con un porcentaje de BI% mayor a un 40% son: toba 3,8cm (53,41%), toba 2,5 cm (52,70), granodiorita Pauta (74,93%), tobas silíceas (47,43%) y las tobas basálticas (64,04%), tabla 40. Aquellas muestras de rocas que presentan valores de BI% menores a 40% pero mayores a 20% son: Toba Riolita (33,56%), toba metamudita (38,44%), toba 1H (20,58%), toba 1V (25,31%), toba 2H (23,17%) y tobas 2V (12%). Tabla 40. Figura 36.

Tabla 25

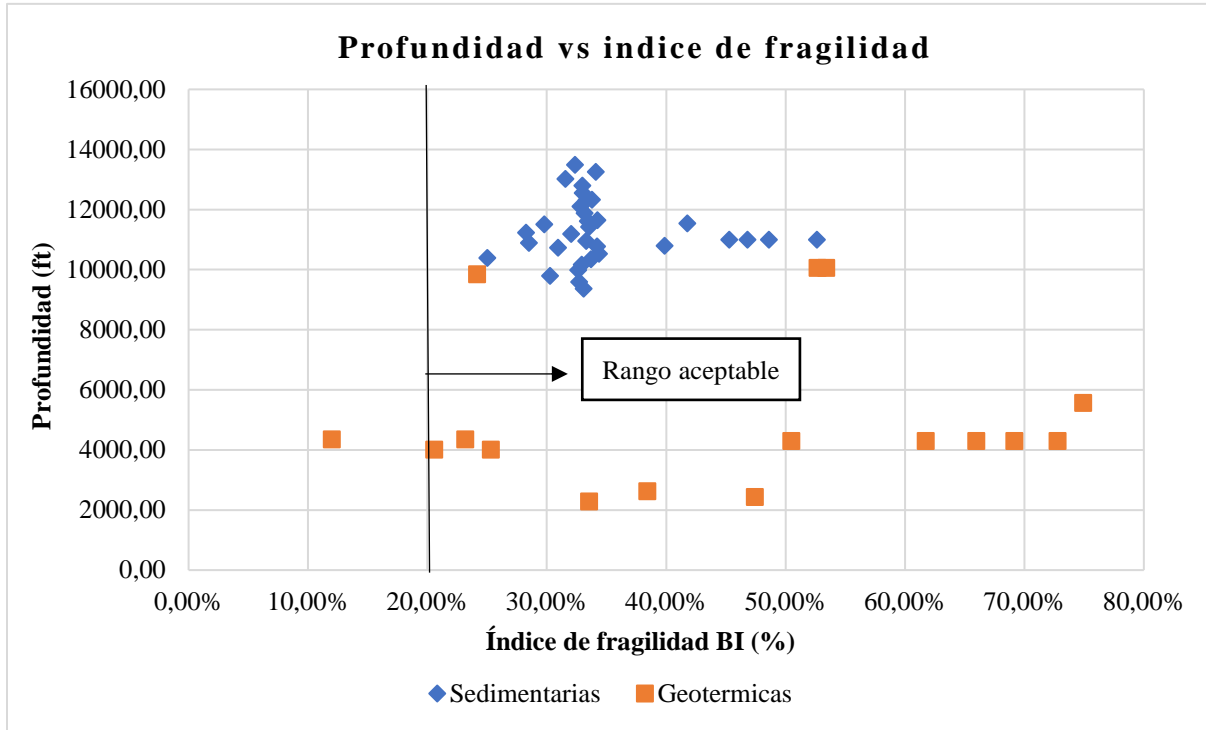
Valores promedios de índice de fragilidad (BI%)

Índice de fragilidad promedio			
Ambiente geológico	Muestra	BI (%)	Temperatura °C
Sedimentario	Shale de China	33,33%	138,12
	shale de Roseneath	31,91%	446
	Shale de Murteree	33,33%	447
	Glutenita	48,34%	20
	Shale de Marcellus	32,89%	90
Geotérmico	Toba 3,8 cm D	53,41%	90
	Toba 2,5 cm D	52,70%	187,5
	Toba Riolita	33,56%	187,5
	Toba Silíceas	47,43%	187,5
	Toba Metamudita	38,44%	90
	Toba 1H	20,58%	90
	Toba 1V	25,31%	90
	Toba 2H	23,17%	90
	Toba 2V	12,00%	201
	Toba Basáltica	64,04%	90

Nota. En la tabla 40, se encuentran los valores de índice de fragilidad, promediados y obtenidos de las tablas 38 y 39. Elaborado y organizado por los autores.

Figura 39

Gráfico comparativo de la profundidad vs índice de fragilidad



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 39, se observa el gráfico comparativo de la profundidad (ft) vs el índice de fragilidad (BI%) de las muestras procedentes de ambientes sedimentarios y geotérmicos. Este gráfico es adaptado utilizando los datos detallados en la tabla 21 y 22.

Tendencias observadas:

- ✓ Para estos casos de estudios, las muestras de rocas de ambientes geotérmicos presentan un mayor porcentaje de índice de fragilidad BI% por encima del 40%.
- ✓ Las muestras de glutenita en el ambiente sedimentario muestran una alta fragilidad, lo que las hace muy adecuadas para un fracturamiento hidráulico. Figura 36.

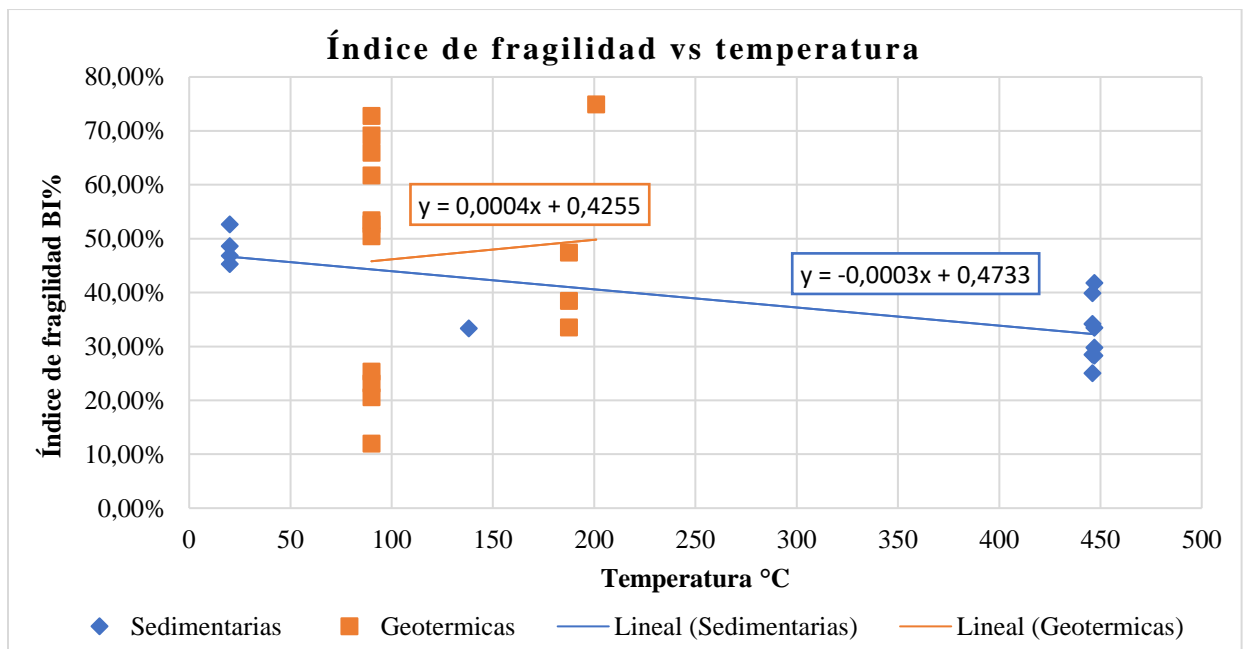
- ✓ Las muestras de tobas basálticas en el ambiente geotérmico también muestran una alta fragilidad, lo que sugiere un buen potencial para el fracturamiento hidráulico.

Figura 36.

- ✓ Se observa que ambos ambientes presentan oportunidades para realizar fracturamiento hidráulico, pero el ambiente geotérmico presenta un número mayor de formaciones altamente prospectas. Sin embargo, es importante considerar otros factores geológicos. Figura 37.

Figura 40

Índice de fragilidad vs Temperatura



Elaborado y organizado por los autores.

Nota. En la figura 40 se observa el comportamiento del índice de fragilidad BI (%) frente a la temperatura (°C), adaptado de las tablas 21 y 22, del presente estudio.

En el gráfico del índice de fragilidad frente a la temperatura se puede observar que, para las muestras sedimentarias a temperaturas de 20°C (condiciones de laboratorio), el índice de fragilidad es alto, con valores entre 45,30% y 52,64%, esto indica una mayor fragilidad de las muestras de rocas sedimentarias a bajas temperaturas, lo que las convierte en zonas prospectas para fracturamiento hidráulico. Por otro lado, a temperaturas altas, específicamente entre 446°C – 447°C, se observa una variabilidad en el índice de fragilidad, sin embargo, la tendencia general indica una disminución con valores que oscilan entre 25,04% y 41,77%. Este comportamiento indica un menor índice de fragilidad de las muestras a medida que aumenta la temperatura.

En cuanto a las muestras de rocas de ambientes geotérmicos, se observa valores del índice de fragilidad superiores al 50% a temperaturas de 90°C y 201°C. Sin embargo, a 187,5°C se observa una reducción considerable con valores de BI comprendidos entre 33,56% y 47,43%.

En general de lo anterior se logra observar que para estos casos el índice de fragilidad de muestras de rocas de ambientes sedimentarios es mayor a temperaturas más bajas, mientras que para las muestras de rocas de ambientes geotérmicos el índice de fragilidad es alto a temperaturas moderadas y muy altas, pero estos valores disminuyen a una temperatura intermedia de 187,5°C lo que en estos casos podría indicar diferentes comportamientos de fragilidad en función del tipo de muestra y el rango de temperatura.

4.5.2. Consideraciones para la construcción de la ventana de lodo.

Al abordar la construcción de una ventana de lodo en pozos petroleros, es importante considerar los desafíos potenciales y las soluciones viables que la geomecánica ofrece. La selección adecuada del lodo de perforación es crucial, como se destaca en “Modern Well Design” por Aadnoy (1999), donde se enfatiza la importancia de elegir el peso óptimo del lodo, para diferenciar entre el éxito y el fracaso de la perforación de un pozo. Un peso excesivo puede resultar en pérdidas de lodo o atascos en la tubería, mientras que un peso insuficiente puede conducir al colapso del pozo y problemas en el llenado (Aadnoy, 1999).

De acuerdo con el autor Zoback (2008), existen varios problemas recurrentes asociados con el lodo de perforación que pueden surgir debido a fallas en su composición o manejo. Estos incluyen:

- **Costos del lodo:** El costo inicial del lodo suele ser elevado, especialmente al realizar análisis químicos detallados, estos gastos suelen ser insignificantes en comparación con los beneficios de reducir complicaciones durante la perforación.
- **Estimación de la presión de poro:** Durante la perforación se estima la presión de poro, y un peso de lodo elevado puede ocultar lecturas de gas, lo que dificulta las operaciones en el pozo durante la perforación.
- **Colapso de pozo:** Un peso de lodo demasiado bajo o insuficiente puede provocar colapso de pozo. Y un peso de lodo demasiado alto puede causar pérdida de circulación y daños en la formación.
- **Variación de presión:** Las variaciones en la presión del pozo pueden resultar en fallas si no se mantiene un peso del lodo constante para asegurar las presiones estáticas.

- Problemas en el llenado: Los ripios o fragmentos colapsados acumulados, pueden obstruir el pozo impidiendo el correcto posicionamiento del revestimiento.

4.5.2.1. Factores claves para prevenir problemas de perforación.

Muchos elementos afectan el éxito de una operación de perforación. Dado que la función principal de una plataforma de perforación es penetrar y sellar formaciones, cualquier fallo técnico puede detener este progreso, causando así gastos adicionales. Además de las prácticas de ingeniería sólidas, la cultura operativa también puede afectar fuertemente el resultado de un posible problema de perforación (Aadnoy, 2019).

La selección adecuada del peso del lodo es clave, también se deben tener otros factores importantes como una planificación ordenada para que la perforación sea exitosa, debe haber prácticas de limpieza de los agujeros y el escamado de las tuberías.

El peso de lodo demasiado bajo puede resultar en problemas de colapso y llenado, mientras que un peso de lodo demasiado alto puede provocar pérdidas de lodo o una adherencia de tuberías. Se puede concluir que un peso de lodo relativamente alto es aceptable y preferible desde muchos puntos de vista. Sin embargo, se debe prestar especial atención a la pérdida de circulación, el pegado diferencial, las lecturas de gas de fondo en la perforación de exploración y las formaciones fracturadas de forma natural. Además, no se debe descuidar la química del lodo (Aadnoy, 2019).

- Colapso del agujero de perforación: Es bien sabido que el colapso del agujero de perforación se produce cuando el peso del lodo es demasiado bajo y porque la tensión del aro alrededor de la pared del agujero es muy alta. Esto a menudo resulta en un fallo de roca. La solución es aumentar el peso del barro. El relleno es el problema de limpiar el pozo. Los cortes o fragmentos colapsados pueden acumularse en la parte inferior del pozo, lo que lleva a problemas como la incapacidad de llegar al fondo con la carcasa. El relleno se asocia

comúnmente con el caudal y la capacidad de carga del lodo. También hay una fuerte conexión con la química del lodo. Por lo tanto, un aumento del peso del lodo debería reducir el potencial de colapso del pozo, reduciendo así el potencial de relleno (Aadnoy, 2019).

- Variaciones de presión: Si el peso del lodo se mantiene constante, el pozo se somete a presiones más estáticas. Como las variaciones de presión pueden conducir a fallas en los agujeros de perforación, se debe preferir un peso de lodo más alto y constante (Aadnoy, 2019).
- Lavados: La teoría detrás del lavado del pozo es que la acción del chorro a través de las boquillas de la broca erosiona hidráulicamente la pared del pozo. Es difícil lavar hidráulicamente una roca consolidada a varios kilómetros de profundidad. Lo que a veces puede suceder es que el peso del barro es demasiado bajo, lo que resulta en una pared de perforación fallida. Por lo tanto, el lavado a menudo se considera un colapso (Aadnoy, 2019).
- Agujero apretado: Un alto peso de lodo equilibrará las tensiones de la roca y mantendrá el pozo más dentro del medidor. Sin embargo, todavía es probable que el agujero disminuya de diámetro el primer día después de que sea perforado por hinchazón, lo que sigue requiriendo disparos de limpiaparabrisas o escariado trasero. Por lo tanto, se propone un aumento en el peso del lodo, pero no una reducción (Aadnoy, 2019).
- Pérdida de circulación: A veces se penetra un larguero débil o una falla, lo que resulta en la pérdida de fluidos de perforación. En general, los pesos del lodo deben mantenerse por debajo de este límite crítico. Además, las formaciones fracturadas pueden establecer restricciones en la densidad del lodo (Aadnoy, 2019).

- Tasa de perforación reducida: Comúnmente se cree que un alto sobreequilibrio resulta en una perforación lenta. La tasa de perforación es principalmente una característica de formación y que el efecto del sobreequilibrio es de menor importancia. También se debe medir una reducción en la tasa de perforación en comparación con el costo de los problemas de la perforación (Aadnoy, 2019).
- Estimación de la presión de poro: Durante la perforación, el geólogo estima la presión de los poros utilizando varios criterios. Un elemento de preocupación es el registro del exceso de gas. Esto ayuda a cuantificar la presión de los poros a una profundidad particular. Un alto peso de lodo puede suprimir altas lecturas de gas; por esta razón, el alto peso de lodo puede no ser preferible durante la perforación de gatos salvajes. Durante la perforación de producción, este requisito a menudo se relaja (Aadnoy, 2019).

4.5.2.2. Problemas de estabilidad de pozo

Las inestabilidades del pozo durante la perforación y la operación son la consecuencia de muchos fenómenos y varios factores. Estos incluyen la interacción del fluido - sólido, las condiciones de estrés desafiantes y complejas, la desviación y la multiplicidad del pozo, el comportamiento del depósito de formación irregular, la inconsistencia o falta de prácticas de perforación y operación adecuadas, la operación en aguas profundas y los depósitos de alta presión y temperatura. (Aadnoy, 2019).

Además, existe el potencial de minimizar los problemas de los pozos mediante la planificación de la trayectoria y la orientación del pozo, las direcciones de las perforaciones y la implementación de pruebas de fugas. Además de las tensiones in situ, la presión de fracturación, la presión de los poros de formación, la profundidad de formación y el acimut y la inclinación del agujero de perforación deben evaluarse antes de cualquier análisis de falla. (Aadnoy, 2019).

4.5.2.3. Factores importantes en la estabilidad de un pozo

- Examinar experimentalmente los puentes de tensión. Esto incluye las partículas, concentraciones y clasificación, pruebas de estabilidad y magnitudes de presión obtenibles. (Aadnoy, 2019).
- Llevar a cabo un trabajo teórico y experimental sobre la fracturación de roca de tracción. Esto incluye la investigación sobre los efectos de compresibilidad, las condiciones de puente y las condiciones de propagación de fracturas. (Aadnoy, 2019).
- Establecer tablas de resistencia a la tracción de la roca para el análisis del LOT. Posiblemente se establecen correlaciones entre la resistencia a la tracción de la roca y la resistencia a la compresión uniaxial para su uso tanto en el análisis de fracturas como de colapso. (Aadnoy, 2019).
- Llevar a cabo pruebas a gran escala para determinar si se puede encontrar información sobre el estrés in situ después de la parada de la bomba. Además de las lecturas de presión del pozo bajo, también se deben recopilar las mediciones del flujo del pozo descendente. (Aadnoy, 2019).
- Evaluar más a fondo la fricción y la angularidad de las partículas. El aumento de la fricción intraarticular puede ayudar a reducir las pérdidas de circulación con fluidos de perforación a base de petróleo. Una forma de hacerlo es aumentar la angularidad de las partículas de lodo. (Aadnoy, 2019).

En relación con la importancia del peso del lodo en la estabilidad del pozo, la presión hidrostática es regulada eficazmente por la densidad del lodo, previniendo flujos indeseados y colapsos en la tubería de revestimiento. La densidad del lodo es esencial para proporcionar soporte a las paredes del pozo y prevenir colapsos (Zoback, 2008).

La densidad del lodo es sumamente importante en los procesos de perforación y fracturación en pozos petroleros. Una densidad baja puede causar deformaciones y comprometer la estabilidad del pozo. Por el contrario, si se trata de una densidad de lodo muy alta se pueden presentar fracturas en el plano de dirección del esfuerzo horizontal máximo, lo que conlleva a afectaciones en las formaciones y dificultades en la fracturación hidráulica. La densidad máxima del lodo para tener una perforación segura se obtiene del gradiente de fractura, esta densidad máxima es la que crea una presión de pozo que supera la suma de la resistencia a la tracción de la formación y el esfuerzo tangencial en la pared de pozo (Oscarelena & Sanabria, 2008).

Según los autores Moos, Peska, Finkbeiner, & Zoback (2003) “La consideración principal para el diseño de un pozo respecto a la perforación se debe hacer con un peso de lodo mayor a la presión de poro o a la presión de colapso, pero también debe ser menor a la presión de fractura hidráulica o al gradiente de fractura”.

Una densidad adecuada del lodo de perforación garantiza una buena ejecución en la perforación y en el fracturamiento. Comúnmente se usan dos criterios para seleccionar la densidad óptima del lodo, el primero es que la presión ejercida por el lodo sea mayor a la presión de colapso del hoyo, el segundo criterio que se tiene en cuenta es que la presión del lodo no exceda la presión de fracturamiento hidráulico (Fam, 1998).

Acoplar características importantes del lodo es fundamental a la hora de hacer perforaciones en campo para garantizar que sean eficientes y seguras, como la densidad, que se

debe adaptar según la formación existente. En formaciones frágiles es recomendable el uso de un lodo con densidad baja, en estas zonas frágiles se recomienda no exceder la presión de fractura de roca, en formaciones dúctiles el lodo debe tener una densidad moderada a alta. La densidad del lodo debe ser suficiente para balancear la presión de la formación, en especial en las zonas de baja presión (Pérez, 2023).

La temperatura es un parámetro importante para tener en cuenta en la hora de la preparación del lodo, ya que, por ejemplo, durante la perforación la temperatura va aumentando de manera gradual a medida que va aumentando la profundidad, esto se debe a la fricción que se va generando entre la barrena y la formación rocosa. La temperatura afecta directamente a la viscosidad del lodo, ya que si se trata de una temperatura alta el lodo se vuelve menos viscoso, lo que conllevaría a una inestabilidad del pozo y a afectar la reología del lodo pues se reduce la capacidad de este para transportar ripios y así evitar atascos. También es importante tener presente la temperatura en la adición de aditivos, pues se deben seleccionar aditivos resistentes a altas temperaturas que no se puedan degradar o perder eficacia frente a altas temperaturas (Pérez, 2023).

Según las recomendaciones en los estudios previos, se recomienda el uso del lodo con densidad moderada a alta para formaciones dúctiles, mientras que para formaciones frágiles se prefiere el uso de un lodo de baja densidad. En las tablas 41 y 42 se clasifican las muestras de rocas estudiadas en esta tesis de acuerdo con estas directrices y especifican el tipo de lodo más adecuado para su uso en cada una de ellas.

Tabla 26

Clasificación del lodo para las muestras de ambientes sedimentarios

Muestras sedimentarias	
Densidad de lodo	
Moderada - Alta	Baja
Shale de Roseneath M1	Shale de China
Shale de Roseneath M4	Shale de Roseneath M2
Shale de Murteree M1	Shale de Roseneath M3
Shale de Murteree M2	Shale de Murteree M3
Shale Marcellus e2	Shale de Murteree M4
Shale Marcellus e12	Glutenita G1
Shale Marcellus e19	Glutenita G2
	Glutenita G3
	Glutenita G4
	Shale Marcellus e3
	Shale Marcellus e4
	Shale Marcellus e5
	Shale Marcellus e6
	Shale Marcellus e7
	Shale Marcellus e8
	Shale Marcellus e9
	Shale Marcellus e10
	Shale Marcellus e11
	Shale Marcellus e13
	Shale Marcellus e14
	Shale Marcellus e15
	Shale Marcellus e16
	Shale Marcellus e17
	Shale Marcellus e18
	Shale Marcellus e20
	Shale Marcellus e21

Nota. En la tabla 41 se encuentra la clasificación del lodo para las muestras de ambientes sedimentarios, basándonos en la clasificación dúctil y frágil de la tabla (14). Elaborado y organizado por los autores.

Tabla 27*Clasificación del lodo para muestras de ambientes geotérmicos*

Muestras geotérmicas	
Densidad de lodo	
Moderada - Alta	Baja
Toba 2V	Tobas silíceas
Toba 2H	Toba 1V
	Toba 1H
	Bloque de toba 3.8
	Bloque de toba 2.5
	Toba desvitrificada

Nota. En la tabla 42 se encuentra la clasificación del lodo para las muestras de ambientes geotérmicos, basándonos en la clasificación dúctil y frágil de la tabla (15). Elaborado y organizado por los autores.

5. Conclusiones

- En relación con el módulo de Young, se observa que estos valores en las muestras de ambientes sedimentarios son relativamente bajos en comparación con las muestras obtenidas de ambientes geotérmicos. Una observación importante es que, el módulo de Young va aumentando a medida que aumenta la presión de confinamiento, lo que indica una mayor resistencia a la compresión.
- Respecto a la comparación de la cohesión vs la temperatura en campos sedimentarios y geotérmicos se evidencia que estos valores en las muestras de rocas sedimentarias mantienen una tendencia a disminuir cuando la temperatura va en aumento, para las rocas geotérmicas, la variabilidad en la cohesión y del ángulo de fricción interno a diferentes temperaturas, los datos analizados no muestran ninguna tendencia en el gráfico. Esto podría deberse a diferencias en su composición mineralógica, lo que resalta la necesidad de una investigación a nivel experimental para establecer cuál es el comportamiento de este parámetro frente a la temperatura. En los casos sedimentarios se observa que el ángulo de fricción interno es mayor cuando la temperatura es baja y disminuye cuando se presenta una temperatura mayor.
- Para las rocas sedimentarias el índice de fragilidad tiende a disminuir a medida que aumenta la presión de confinamiento. Por otro lado, Para las muestras geotérmicas se observa un aumento en los valores de índice de fragilidad a medida que aumenta la presión de confinamiento. Este comportamiento puede deberse a las diferencias que hay en las muestras en cuanto a su composición mineralógica, propiedades mecánicas y profundidad de las muestras.

- Según los análisis realizados, las muestras de glutenita en ambientes sedimentarios con un índice de fragilidad del 48,34% son prospectos viables para el fracturamiento hidráulico. En el contexto geotérmico, las muestras de toba de 3,8 cm (53,41%), toba de 2,5 cm (52,70%), granodiorita (74,93%), toba silíceas (47,43%) y toba basáltica (64,04%) también se consideran prospectos adecuados para esta técnica, siempre y cuando el índice de fragilidad sea superior al 40%.
- El análisis del índice de fragilidad frente a la temperatura revela patrones significativos en muestras de rocas sedimentarias y geotérmicas. A temperaturas bajas, las rocas sedimentarias presentan un alto índice de fragilidad (45,30% - 52,64%), lo que las convierte en zonas prospectas para fracturamiento hidráulico. Por otro lado, a temperaturas altas (446°C – 447°C), se observa variabilidad en el índice de fragilidad, pero la tendencia general indica una disminución (25,04% - 41,77%).

Recomendaciones

1. Se recomienda estudiar a fondo las propiedades geomecánicas de las rocas bajo diversas condiciones geológicas, como temperatura, presión, composición mineralógica, y así comprender cómo estas variables afectan sus propiedades mecánicas. Analizar esta variabilidad puede proporcionar información adicional para predecir el comportamiento de las rocas en diferentes entornos.
2. Se sugiere continuar profundizando en el análisis de la influencia de la temperatura en la fragilidad de las rocas, dado que se observa una variación en el índice de fragilidad de las rocas a diferentes temperaturas, se recomienda investigar más a fondo cómo la temperatura afecta la fragilidad de las rocas en ambientes geotérmicos y sedimentarios. Esto podría ayudar a predecir el comportamiento de las rocas en condiciones de alta temperatura para la construcción de pozos geotérmicos y de hidrocarburos.
3. Es recomendable investigar la relación entre la temperatura y las propiedades geomecánicas y estimulación hidráulica, sobre todo en yacimientos geotérmicos de alta y media entalpia. Se sugiere estudiar cómo las propiedades geomecánicas de las rocas, como el módulo de Young y la relación de Poisson, influyen en la eficiencia de la estimulación hidráulica en pozos geotérmicos. Comprender esta relación puede mejorar las técnicas de fracturación hidráulica y optimizar la producción de energía geotérmica.
4. Analizar el comportamiento de rocas a temperaturas muy elevadas, para futuras investigaciones, sería interesante explorar el comportamiento de las rocas en

condiciones extremas, como alta presión y temperatura, para comprender mejor su resistencia y estabilidad en entornos geológicos desafiantes. Esto podría proporcionar información crucial para el diseño de operaciones de perforación y producción en condiciones adversas, tanto para yacimientos de hidrocarburos, como para sistemas geotérmicos.

5. Explorar más a fondo sobre las implicaciones en operaciones de campos geotérmicos y petroleros respecto a la evaluación de los recursos, para con esto proporcionar información acerca de la estimación de cantidades recuperables, también considerar factores técnicos y comerciales que afectan la factibilidad económica y la vida productiva.

Referencias Bibliográficas

- Aadnoy. (2019). *Petroleum Rock Mechanics Drilling Operations and Well Design* (Second Edition ed.). Gulf Professional Publishing.
- Aadnoy, B. (1999). *Modern well design* (1 ed. 2impr. ed.). a. a. balkerma.
- Angel, J. (2012). Metodología para identificar en tiempo real las zonas de inestabilidad geomecánica, y mitigar los riesgos durante las operaciones de perforación de pozos petroleros. (*Tesis de pregrado*). Universidad nacional de Colombia, Medellín.
- Bakshi, R., Halvaei, M., & Ghassemi., A. (2016). Experimentos de inyección en tobas basálticas en condiciones triaxiales y calentadas con monitoreo de emisiones acústicas. *Asociación Americana de Mecánica de Rocas*.
- Bazunu, Gamaliel, Rahman, Sheik, S., Zhou, Fengde, D., & Liuqi, W. (2015). Caracterización geomecánica de rocas de yacimientos de gas de esquisto para la planificación y el diseño del tratamiento de estimulación: un estudio de caso de la cuenca de Cooper. *Conferencia de tecnología de recursos no convencionales*. Obtenido de <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.15530/URTEC-2015-2152935>
- Calderón, Z. (2014). *Introducción a la mecánica de rocas y sus aplicaciones en la industria del petróleo*. Bucaramanga: Ediciones UIS.
- Evans, K. (2020). Relación de las velocidades sísmicas, la tensión horizontal mínima y la distribución natural de la fractura con la eficiencia de la estimulación durante la finalización del pozo no convencional Marcellus Shale MIP-3H, Virginia Occidental, EE. UU. (*Tesis de Maestría*). Universidad de Virginia, Virginia.
- Fam, M. A. (1998). Drilling Fluids: State of the Art. *ournal of Petroleum Science and Engineering*, 189-209. doi:10.1016/S0920-4105(98)00023-100023-1)

- Fernández, A., & Alvarellos, J. (2012). Modelos mecánicos 3D y su creciente aplicación en la industria petrolera. *Core*, 151-157.
- Fernández, L., Quintero, Y., & Calderón, Z. (2015). Análisis de la fragilidad para identificar sweet spots en formaciones de shale gas. *fuentes el reventón energético*, 103-111.
- Geologyscience. (06 de 08 de 2024). *Geologyscience*. Obtenido de <https://es.geologyscience.com/ramas-de-la-geolog%C3%ADa/geolog%C3%ADa-estructural/estr%C3%A9s-y-tensi%C3%B3n/>
- Goral, J., Deo, M., Nadimi, S., McLennan, E., & H, H. (2018). Pruebas geomecánicas a micro y macroescala de Woodford Shale. *Asociación Americana de Mecánica de Rocas* .
- Greelane. (27 de enero de 2019). *Greelane*. Obtenido de <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnolog%C3%ADa-matem%C3%A1ticas/ciencia/bulk-modulus-definition-and-examples-4175476/>
- Grieser, B., & Bray, J. (2007). Identificación del potencial productivo en yacimientos no convencionales. *SPE international*.
- Hucka, V., & Das, B. (1974). Determinación de la fragilidad de las rocas por diferentes métodos. *Revista Internacional de Mecánica de Rocas y Ciencia de la Minería y Geomecánica Resúmenes*, 389-392.
- Irausquin, M. (2014). Modelo geomecánico del yacimiento urdaneta 01 en el bloque VI para la predicción de producción de arena. (*Tesis de maestría*). Universidad de Zulia, Maracaibo.
- Kamali-Asl, A., Kc, B., Foroutan, M., Ghazanfari, E., Cladouhos, T., & Stevens, M. (2019). Respuesta a tensión-deformación y análisis de firma sísmica de rocas de reservorio de filita del campo geotérmico Blue Mountain. *Elsevier*, 204-223.

- KC, B., Foroutan, M., Kamali-Asl, A., Ghazanfari, E., & Cladouhos, T. T. (2019). Caracterización geomecánica de un espécimen de roca de granodiorita del campo geotérmico de Patua. *Asociación Americana de Mecánica de Rocas*.
- Lee, J., Maharidge, R., Franquet, J., & Dick, A. (2012). Deformaciones frágiles a dúctiles dependientes de las tensiones de tobas en pozos geotérmicos. *Asociación Americana de Mecánica de Rocas*.
- Li, Q., Li, S., Liu, J., & Hang, W. (2021). Propiedades mecánicas de la roca del reservador de gas de esquisto profundo y sus efectos en la estimulación del yacimiento. *Asociación Americana de Mecánica de Rocas*.
- Lutz, S. J., Cline, E. J., & Martin J, W. (2010). Pruebas mecánicas de rocas para el proyecto del Sistema Geotérmico Mejorado (EGS) de Desert Peak, Nevada. *Asociación Americana de Mecánica de Rocas*.
- Macia, M. E., & Rolando, A. (2013). Variación del módulo de Young de un elemento de fábrica de ladrillo . 105-116.
- Madrid, D., López, O., & Jiménez, J. (2012). Análisis de sedimentos utilizando un enfoque de la programación estructurada. *Tecnológicas*, 49-67.
- Meng, F., Wong, L. N., & Zhou, H. (2021). Índices de fragilidad de rocas y sus aplicaciones a diferentes campos de la ingeniería de rocas: una revisión. *Revista de Mecánica de Rocas e Ingeniería Geotécnica*, 221-247.
- Moos, D., Peska, P., Finkbeiner, T., & Zoback, M. (2003). Comprehensive wellbore stability analysis utilizing Quantitative Risk Assessment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 97-109.

- Oscarelena, C., & Sanabria, L. (2008). Caracterización geomecánica de yacimientos cretácicos aplicando tecnologías modernas de perfilaje. (*Tesis de maestría*). Universidad de Zulia.
- Parry. (2004). *Círculos de Mohr, trayectorias de tensión y geotecnia* (2ed ed.). R.H.G. Parada.
- Pérez, J. (2023). Efectos térmicos en los lodos de perforación base agua de naturaleza arcillosa en su comportamiento reológico tixotrópico. (*Tesis de pregrado*). Universidad nacional autónoma de México, Mexico.
- Portilla, H., Suárez, D. F., & Corzo, R. (2012). Metodología para la optimización de parámetros de perforación a partir de propiedades geomecánicas. *Fuentes, El reventón energético*. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3325>
- Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., Grieser, B., & Kundert, D. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale plays are not clones of the Barnett Shale. *SPE: 115258*.
- Shi, X., Huang, W., Lu, S., Wang, Y., Wu, S., & Yingyan, L. (2019). Las propiedades mecánicas de la roca y el comportamiento de falla de la glutenita. *ISRM*.
- Spiegato. (08 de mayo de 2024). *Spiegato*. Obtenido de <https://spiegato.com/es/que-es-el-modulo-de-rigidez>
- Vallecilla, C. (2002). *El círculo de Mohr. Fundamentos y aplicaciones*. Colombia: Universidad Santo Tomas.
- Vásquez. (2001). *Introducción a la geomecánica petrolera*. Caracas, venezuela: V.V.A. Consultores, C.A.
- Wang, D., Qin, H., Yan, X., Cheng, W., Liu, Q., Han, D., & Liu, Y. (2020). Un estudio experimental sobre la evaluación de la frabilidad de roca seca caliente: utilizando un modelo termomecánico integrado. *Fontoura, Rocca & Pavón Mendoza*, 973-980.

- Wang, J., Jung, W., & Ghassemi, A. (2012). Propiedades de deformación y falla de la toba soldada Newberry. *Asociación Americana de Mecánica de Rocas*.
- Wikipedia. (08 de mayo de 2024). *Wikipedia*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Módulo de compresibilidad](https://es.wikipedia.org/wiki/Módulo_de_compresibilidad)
- Zhang, J. (2019). *Geomecánica aplicada al petróleo*. Cambridge: Gulf Professional Publishing, un sello Elsevier.
- Zhang, Y., Zhang, Y., Zhou, L., Lei, Z., Guo, L., & Zhou, J. (2022). Reservoir stimulation design and evaluation of heat exploitation of a two-horizontal-well enhanced geothermal system (EGS) in the Zhacang geothermal field, Northwest China. *American Rock Mechanics Association*, 330-350.
- Zhi, Y., & Ahmad, G. (2018). Propagación y coalescencia de fracturas inducidas por inyección bajo carga triaxial. *Asociación Americana de Mecánica de Rocas*.
- Zoback, M. (2008). *Reservoir geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Anexos

Anexo 1

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, shale de China (C2)

Shale de China															
σ_1		111,52		152,19		169,24		193,63		215,7		226,18		246,21	
σ_3		0		15		30		45		60		75		90	
Radio		55,76		68,595		69,62		74,315		77,85		75,59		78,105	
Centro		55,76		83,595		99,62		119,315		137,85		150,59		168,105	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	0,00	0,00	15,00	0,00	30,00	0,00	45,00	0,00	60,00	0,00	75,00	0,00	90,00	0,00
10	0,17	0,85	9,68	16,04	11,91	31,06	12,09	46,13	12,90	61,18	13,52	76,15	13,13	91,19	13,56
20	0,35	3,36	19,07	19,14	23,46	34,20	23,81	49,48	25,42	64,69	26,63	79,56	25,85	94,71	26,71
30	0,52	7,47	27,88	24,19	34,30	39,33	34,81	54,96	37,16	70,43	38,93	85,13	37,80	100,46	39,05
40	0,70	13,05	35,84	31,05	44,09	46,29	44,75	62,39	47,77	78,21	50,04	92,68	48,59	108,27	50,20
50	0,87	19,92	42,71	39,50	52,55	54,87	53,33	71,55	56,93	87,81	59,64	102,00	57,91	117,90	59,83
60	1,05	27,88	48,29	49,30	59,41	64,81	60,29	82,16	64,36	98,93	67,42	112,80	65,46	129,05	67,64
70	1,22	36,69	52,40	60,13	64,46	75,81	65,42	93,90	69,83	111,22	73,16	124,74	71,03	141,39	73,39
80	1,40	46,08	54,91	71,68	67,55	87,53	68,56	106,41	73,19	124,33	76,67	137,46	74,44	154,54	76,92
90	1,57	55,76	55,76	83,60	68,60	99,62	69,62	119,32	74,32	137,85	77,85	150,59	75,59	168,11	78,11
100	1,75	65,44	54,91	95,51	67,55	111,71	68,56	132,22	73,19	151,37	76,67	163,72	74,44	181,67	76,92
110	1,92	74,83	52,40	107,06	64,46	123,43	65,42	144,73	69,83	164,48	73,16	176,44	71,03	194,82	73,39
120	2,09	83,64	48,29	117,89	59,41	134,43	60,29	156,47	64,36	176,78	67,42	188,39	65,46	207,16	67,64
130	2,27	91,60	42,71	127,69	52,55	144,37	53,33	167,08	56,93	187,89	59,64	199,18	57,91	218,31	59,83
140	2,44	98,47	35,84	136,14	44,09	152,95	44,75	176,24	47,77	197,49	50,04	208,50	48,59	227,94	50,20
150	2,62	104,05	27,88	143,00	34,30	159,91	34,81	183,67	37,16	205,27	38,93	216,05	37,80	235,75	39,05
160	2,79	108,16	19,07	148,05	23,46	165,04	23,81	189,15	25,42	211,01	26,63	221,62	25,85	241,50	26,71
170	2,97	110,67	9,68	151,15	11,91	168,18	12,09	192,50	12,90	214,52	13,52	225,03	13,13	245,02	13,56
180	3,14	111,52	0,00	152,19	0,00	169,24	0,00	193,63	0,00	215,70	0,00	226,18	0,00	246,21	0,00

Nota. En anexo 1, se encuentran los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), con base a las ecuaciones (18), (19), (20), (21). Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 2

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, shale Roseneath – Australia (C3)

Roseneath									
σ_1		69,76		87,53		105,29		123,06	
σ_3		10		20		30		40	
Radio		29,88		33,76		37,65		41,53	
Centro		39,88		53,76		67,65		81,53	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00
10	0,17	10,45	5,19	20,51	5,86	30,57	6,54	40,63	7,21
20	0,35	11,80	10,22	22,04	11,55	32,27	12,88	42,50	14,20
30	0,52	14,00	14,94	24,52	16,88	35,04	18,82	45,56	20,76
40	0,70	16,99	19,21	27,90	21,70	38,81	24,20	49,72	26,69
50	0,87	20,67	22,89	32,06	25,87	43,45	28,84	54,83	31,81
60	1,05	24,94	25,88	36,88	29,24	48,82	32,60	60,76	35,97
70	1,22	29,66	28,08	42,22	31,73	54,77	35,38	67,33	39,02
80	1,40	34,69	29,43	47,90	33,25	61,11	37,08	74,32	40,90
90	1,57	39,88	29,88	53,76	33,76	67,65	37,65	81,53	41,53
100	1,75	45,07	29,43	59,63	33,25	74,18	37,08	88,74	40,90
110	1,92	50,10	28,08	65,31	31,73	80,52	35,38	95,73	39,02
120	2,09	54,82	25,88	70,65	29,24	86,47	32,60	102,29	35,97
130	2,27	59,09	22,89	75,47	25,87	91,85	28,84	108,22	31,81
140	2,44	62,77	19,21	79,63	21,70	96,49	24,20	113,34	26,69
150	2,62	65,76	14,94	83,01	16,88	100,25	18,82	117,49	20,76
160	2,79	67,96	10,22	85,49	11,55	103,02	12,88	120,55	14,20
170	2,97	69,31	5,19	87,02	5,86	104,72	6,54	122,43	7,21
180	3,14	69,76	0,00	87,53	0,00	105,29	0,00	123,06	0,00

Nota. En el anexo2, se encuentran los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), para las muestras de shale del campo de Roseneath – Australia. Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 3

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, shale Murteree – Australia (C3)

Murteree									
σ_1		69,89		88,99		125,04		132,22	
σ_3		10		20		30		40	
Radio		29,94		34,49		47,52		46,11	
Centro		39,94		54,49		77,52		86,11	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	40,00	0,00
10	0,17	10,45	5,20	20,52	5,99	30,72	8,25	40,70	8,01
20	0,35	11,81	10,24	22,08	11,80	32,87	16,25	42,78	15,77
30	0,52	14,01	14,97	24,62	17,25	36,37	23,76	46,18	23,06
40	0,70	17,01	19,25	28,07	22,17	41,12	30,54	50,79	29,64
50	0,87	20,70	22,94	32,32	26,42	46,97	36,40	56,47	35,32
60	1,05	24,97	25,93	37,25	29,87	53,76	41,15	63,06	39,93
70	1,22	29,70	28,14	42,70	32,41	61,27	44,65	70,34	43,33
80	1,40	34,74	29,49	48,50	33,97	69,27	46,80	78,10	45,41
90	1,57	39,94	29,94	54,49	34,49	77,52	47,52	86,11	46,11
100	1,75	45,14	29,49	60,48	33,97	85,77	46,80	94,12	45,41
110	1,92	50,19	28,14	66,29	32,41	93,77	44,65	101,88	43,33
120	2,09	54,92	25,93	71,74	29,87	101,28	41,15	109,17	39,93
130	2,27	59,19	22,94	76,67	26,42	108,06	36,40	115,75	35,32
140	2,44	62,88	19,25	80,92	22,17	113,92	30,54	121,43	29,64
150	2,62	65,88	14,97	84,37	17,25	118,67	23,76	126,04	23,06
160	2,79	68,08	10,24	86,91	11,80	122,17	16,25	129,44	15,77
170	2,97	69,43	5,20	88,46	5,99	124,31	8,25	131,52	8,01
180	3,14	69,89	0,00	88,99	0,00	125,04	0,00	132,22	0,00

Nota. En el anexo 3, se encuentran los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), para las muestras de shale del campo de Murteree – Australia. Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 4

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte parte 1, Glutenita - Junggar (C4)

		Glutenita G1						Glutenita G2							
σ_1		210,27	251,02	290,23	181,39	224,57	256,89	σ_3		10	20	30	85,70	102,29	113,45
Radio		100,14	115,51	130,12	95,70	102,29	113,45	Centro		110,14	135,51	160,12	95,70	122,29	143,45
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)		
0	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00		
10	0,17	11,52	17,39	21,75	20,06	31,98	22,59	11,30	14,88	21,55	17,76	31,72	19,70		
20	0,35	16,04	34,25	26,97	39,51	37,85	44,50	15,17	29,31	26,17	34,98	36,84	38,80		
30	0,52	23,42	50,07	35,48	57,76	47,43	65,06	21,48	42,85	33,70	51,14	45,20	56,72		
40	0,70	33,43	64,37	47,02	74,25	60,44	83,64	30,05	55,08	43,93	65,75	56,54	72,92		
50	0,87	45,77	76,71	61,26	88,49	76,48	99,67	40,61	65,65	56,54	78,35	70,52	86,90		
60	1,05	60,07	86,72	77,76	100,03	95,06	112,68	52,85	74,21	71,14	88,58	86,72	98,25		
70	1,22	75,89	94,10	96,00	108,54	115,61	122,27	66,39	80,53	87,30	96,12	104,64	106,60		
80	1,40	92,75	98,61	115,45	113,76	137,52	128,14	80,81	84,39	104,52	100,73	123,75	111,72		
90	1,57	110,14	100,14	135,51	115,51	160,12	130,12	95,70	85,70	122,29	102,29	143,45	113,45		
100	1,75	127,52	98,61	155,57	113,76	182,71	128,14	110,58	84,39	140,05	100,73	163,14	111,72		
110	1,92	144,38	94,10	175,02	108,54	204,62	122,27	125,00	80,53	157,27	96,12	182,25	106,60		
120	2,09	160,20	86,72	193,27	100,03	225,17	112,68	138,54	74,21	173,43	88,58	200,17	98,25		
130	2,27	174,50	76,71	209,76	88,49	243,75	99,67	150,78	65,65	188,03	78,35	216,37	86,90		
140	2,44	186,84	64,37	224,00	74,25	259,79	83,64	161,34	55,08	200,64	65,75	230,35	72,92		
150	2,62	196,85	50,07	235,54	57,76	272,80	65,06	169,91	42,85	210,87	51,14	241,69	56,72		
160	2,79	204,23	34,25	244,05	39,51	282,38	44,50	176,22	29,31	218,40	34,98	250,05	38,80		
170	2,97	208,75	17,39	249,27	20,06	288,25	22,59	180,09	14,88	223,02	17,76	255,17	19,70		
180	3,14	210,27	0,00	251,02	0,00	290,23	0,00	181,39	0,00	224,57	0,00	256,89	0,00		

Nota. En el anexo 4, se encuentran la parte 1de los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), para las muestras de glutenita del campo de Junggar – China. Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 5

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte parte 2, Glutenita - Junggar (C4)

		Glutenita G3						Glutenita G4					
σ_1		133,41		161,52		182,20		92,61		129,21		169,61	
σ_3		10		20		30		10		20		30	
Radio		61,71		70,76		76,10		41,31		54,61		69,81	
Centro		71,71		90,76		106,10		51,31		74,61		99,81	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00	30,00	0,00
10	0,17	10,94	10,71	21,08	12,29	31,16	13,21	10,63	7,17	20,83	9,48	31,06	12,12
20	0,35	13,72	21,10	24,27	24,20	34,59	26,03	12,49	14,13	23,29	18,68	34,21	23,87
30	0,52	18,27	30,85	29,48	35,38	40,20	38,05	15,53	20,65	27,32	27,30	39,35	34,90
40	0,70	24,44	39,66	36,55	45,48	47,80	48,92	19,66	26,55	32,78	35,10	46,33	44,87
50	0,87	32,04	47,27	45,28	54,21	57,18	58,30	24,75	31,64	39,51	41,83	54,94	53,47
60	1,05	40,85	53,44	55,38	61,28	68,05	65,90	30,65	35,77	47,30	47,29	64,90	60,45
70	1,22	50,60	57,98	66,56	66,49	80,07	71,51	37,18	38,81	55,93	51,31	75,93	65,60
80	1,40	60,99	60,77	78,47	69,68	92,89	74,94	44,13	40,68	65,12	53,78	87,68	68,74
90	1,57	71,71	61,71	90,76	70,76	106,10	76,10	51,31	41,31	74,61	54,61	99,81	69,81
100	1,75	82,42	60,77	103,05	69,68	119,31	74,94	58,48	40,68	84,09	53,78	111,93	68,74
110	1,92	92,81	57,98	114,96	66,49	132,13	71,51	65,43	38,81	93,28	51,31	123,68	65,60
120	2,09	102,56	53,44	126,14	61,28	144,15	65,90	71,96	35,77	101,91	47,29	134,71	60,45
130	2,27	111,37	47,27	136,24	54,21	155,02	58,30	77,86	31,64	109,70	41,83	144,67	53,47
140	2,44	118,97	39,66	144,97	45,48	164,40	48,92	82,95	26,55	116,43	35,10	153,28	44,87
150	2,62	125,14	30,85	152,04	35,38	172,00	38,05	87,08	20,65	121,89	27,30	160,26	34,90
160	2,79	129,69	21,10	157,25	24,20	177,61	26,03	90,12	14,13	125,92	18,68	165,40	23,87
170	2,97	132,47	10,71	160,44	12,29	181,04	13,21	91,98	7,17	128,38	9,48	168,55	12,12
180	3,14	133,41	0,00	161,52	0,00	182,20	0,00	92,61	0,00	129,21	0,00	169,61	0,00

Nota. En el anexo 5, se encuentran la parte 2 de los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), para las muestras de glutenita del campo de Junggar – China. Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 6

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba 3.8 cm d, Newberry (C8)

Bloque de toba 3,8 cm							
σ_1		15,98		24,92		42,06	
σ_3		0,7		3,4		10,3	
Radio		7,64		10,76		15,88	
Centro		8,34		14,16		26,18	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	0,70	0,00	3,40	0,00	10,30	0,00
10	0,17	0,82	1,33	3,56	1,87	10,54	2,76
20	0,35	1,16	2,61	4,05	3,68	11,26	5,43
30	0,52	1,72	3,82	4,84	5,38	12,43	7,94
40	0,70	2,49	4,91	5,92	6,92	14,02	10,21
50	0,87	3,43	5,85	7,24	8,24	15,97	12,16
60	1,05	4,52	6,62	8,78	9,32	18,24	13,75
70	1,22	5,73	7,18	10,48	10,11	20,75	14,92
80	1,40	7,01	7,52	12,29	10,60	23,42	15,64
90	1,57	8,34	7,64	14,16	10,76	26,18	15,88
100	1,75	9,67	7,52	16,03	10,60	28,94	15,64
110	1,92	10,95	7,18	17,84	10,11	31,61	14,92
120	2,09	12,16	6,62	19,54	9,32	34,12	13,75
130	2,27	13,25	5,85	21,08	8,24	36,39	12,16
140	2,44	14,19	4,91	22,40	6,92	38,34	10,21
150	2,62	14,96	3,82	23,48	5,38	39,93	7,94
160	2,79	15,52	2,61	24,27	3,68	41,10	5,43
170	2,97	15,86	1,33	24,76	1,87	41,82	2,76
180	3,14	15,98	0,00	24,92	0,00	42,06	0,00

Nota. En el anexo 6, se encuentran de los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), para la muestra de bloque de toba de 3.8 cm de diámetro del campo Newberry – USA. Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 7

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba 2,5 cm d, parte 1- Newberry (C8)

Bloque de toba 2,5 cm (parte 1)									
σ_1		19,93		24,34		26,34		29,09	
σ_3		0		0		0,7		2,1	
Radio		9,97		12,17		12,82		13,50	
Centro		9,97		12,17		13,52		15,60	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	2,10	0,00
10	0,17	0,15	1,73	0,18	2,11	0,89	2,23	2,31	2,34
20	0,35	0,60	3,41	0,73	4,16	1,47	4,38	2,91	4,62
30	0,52	1,34	4,98	1,63	6,09	2,42	6,41	3,91	6,75
40	0,70	2,33	6,41	2,85	7,82	3,70	8,24	5,26	8,67
50	0,87	3,56	7,63	4,35	9,32	5,28	9,82	6,92	10,34
60	1,05	4,98	8,63	6,09	10,54	7,11	11,10	8,85	11,69
70	1,22	6,56	9,36	8,01	11,44	9,14	12,05	10,98	12,68
80	1,40	8,23	9,81	10,06	11,99	11,29	12,63	13,25	13,29
90	1,57	9,97	9,97	12,17	12,17	13,52	12,82	15,60	13,50
100	1,75	11,70	9,81	14,28	11,99	15,75	12,63	17,94	13,29
110	1,92	13,37	9,36	16,33	11,44	17,90	12,05	20,21	12,68
120	2,09	14,95	8,63	18,26	10,54	19,93	11,10	22,34	11,69
130	2,27	16,37	7,63	19,99	9,32	21,76	9,82	24,27	10,34
140	2,44	17,60	6,41	21,49	7,82	23,34	8,24	25,93	8,67
150	2,62	18,59	4,98	22,71	6,09	24,62	6,41	27,28	6,75
160	2,79	19,33	3,41	23,61	4,16	25,57	4,38	28,28	4,62
170	2,97	19,78	1,73	24,16	2,11	26,15	2,23	28,88	2,34
180	3,14	19,93	0,00	24,34	0,00	26,34	0,00	29,09	0,00

Nota. En el anexo 7, se encuentra la parte 1 de los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), de la muestra de bloque de toba de 2.5 cm de diámetro del campo Newberry – USA. Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 8

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba riolítica - Desert Peak C (10)

Toba Riolítica									
O1		52,28		55,43		78,85		105,04	
O3		1		4		10		20	
Radio		25,64		25,715		34,425		42,52	
Centro		26,64		29,715		44,425		62,52	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	1,00	0,00	4,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00
10	0,17	1,39	4,45	4,39	4,47	10,52	5,98	20,65	7,38
20	0,35	2,55	8,77	5,55	8,80	12,08	11,77	22,56	14,54
30	0,52	4,44	12,82	7,45	12,86	14,61	17,21	25,70	21,26
40	0,70	7,00	16,48	10,02	16,53	18,05	22,13	29,95	27,33
50	0,87	10,16	19,64	13,19	19,70	22,30	26,37	35,19	32,57
60	1,05	13,82	22,20	16,86	22,27	27,21	29,81	41,26	36,82
70	1,22	17,87	24,09	20,92	24,16	32,65	32,35	47,98	39,96
80	1,40	22,19	25,25	25,25	25,32	38,45	33,90	55,14	41,87
90	1,57	26,64	25,64	29,72	25,72	44,43	34,43	62,52	42,52
100	1,75	31,09	25,25	34,18	25,32	50,40	33,90	69,90	41,87
110	1,92	35,41	24,09	38,51	24,16	56,20	32,35	77,06	39,96
120	2,09	39,46	22,20	42,57	22,27	61,64	29,81	83,78	36,82
130	2,27	43,12	19,64	46,24	19,70	66,55	26,37	89,85	32,57
140	2,44	46,28	16,48	49,41	16,53	70,80	22,13	95,09	27,33
150	2,62	48,84	12,82	51,98	12,86	74,24	17,21	99,34	21,26
160	2,79	50,73	8,77	53,88	8,80	76,77	11,77	102,48	14,54
170	2,97	51,89	4,45	55,04	4,47	78,33	5,98	104,39	7,38
180	3,14	52,28	0,00	55,43	0,00	78,85	0,00	105,04	0,00

Nota. En el anexo 8, se encuentra los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), de la muestra de bloque de toba riolítica del campo Desert Peak – USA. Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 9

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba silíceo - Desert Peak C (10)

Toba Silíceo									
O1		108,17		138,15		170,83		227,29	
O3		1		4		10		20	
Radio		53,59		67,08		80,42		103,65	
Centro		54,59		71,08		90,42		123,65	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	1,00	0,00	4,00	0,00	10,00	0,00	20,00	0,00
10	0,17	1,81	9,30	5,02	11,65	11,22	13,96	21,57	18,00
20	0,35	4,23	18,33	8,05	22,94	14,85	27,50	26,25	35,45
30	0,52	8,18	26,79	12,99	33,54	20,77	40,21	33,89	51,82
40	0,70	13,54	34,44	19,69	43,11	28,81	51,69	44,25	66,62
50	0,87	20,14	41,05	27,96	51,38	38,73	61,60	57,02	79,40
60	1,05	27,79	46,41	37,54	58,09	50,21	69,64	71,82	89,76
70	1,22	36,26	50,35	48,13	63,03	62,91	75,57	88,20	97,39
80	1,40	45,28	52,77	59,43	66,06	76,45	79,19	105,65	102,07
90	1,57	54,59	53,59	71,08	67,08	90,42	80,42	123,65	103,65
100	1,75	63,89	52,77	82,72	66,06	104,38	79,19	141,64	102,07
110	1,92	72,91	50,35	94,02	63,03	117,92	75,57	159,09	97,39
120	2,09	81,38	46,41	104,61	58,09	130,62	69,64	175,47	89,76
130	2,27	89,03	41,05	114,19	51,38	142,10	61,60	190,27	79,40
140	2,44	95,63	34,44	122,46	43,11	152,02	51,69	203,04	66,62
150	2,62	100,99	26,79	129,16	33,54	160,06	40,21	213,40	51,82
160	2,79	104,94	18,33	134,10	22,94	165,98	27,50	221,04	35,45
170	2,97	107,36	9,30	137,13	11,65	169,61	13,96	225,72	18,00
180	3,14	108,17	0,00	138,15	0,00	170,83	0,00	227,29	0,00

Nota. En el anexo 9, se encuentra los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), de la muestra de bloque de toba silíceo del campo Desert Peak – USA.

Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 10

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, toba metamudita - Desert Peak C (10)

Toba Metamudita					
O1		132,31		213,68	
O3		4		20	
Radio		64,16		96,84	
Centro		68,16		116,84	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	4,00	0,00	20,00	0,00
10	0,17	4,97	11,14	21,47	16,82
20	0,35	7,87	21,94	25,84	33,12
30	0,52	12,60	32,08	32,97	48,42
40	0,70	19,01	41,24	42,66	62,25
50	0,87	26,92	49,15	54,59	74,18
60	1,05	36,08	55,56	68,42	83,87
70	1,22	46,21	60,29	83,72	91,00
80	1,40	57,01	63,18	100,02	95,37
90	1,57	68,16	64,16	116,84	96,84
100	1,75	79,30	63,18	133,66	95,37
110	1,92	90,10	60,29	149,96	91,00
120	2,09	100,23	55,56	165,26	83,87
130	2,27	109,39	49,15	179,09	74,18
140	2,44	117,30	41,24	191,02	62,25
150	2,62	123,71	32,08	200,71	48,42
160	2,79	128,44	21,94	207,84	33,12
170	2,97	131,34	11,14	212,21	16,82
180	3,14	132,31	0,00	213,68	0,00

Nota. En el anexo 10, se encuentra los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), de la muestra de bloque de toba metamudita del campo Desert Peak – USA. Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 11

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, bloque de toba muestra 1H, Newberry C (11)

Toba 1H											
O1		142,85		184,74		226,63		268,53		310,42	
O3		3,45		10,34		17,24		24,14		31,03	
Radio		69,70		87,20		104,70		122,20		139,70	
Centro		73,15		97,54		121,94		146,34		170,73	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	3,45	0,00	10,34	0,00	17,24	0,00	24,14	0,00	31,03	0,00
10	0,17	4,51	12,10	11,66	15,14	18,83	18,18	26,00	21,22	33,15	24,26
20	0,35	7,65	23,84	15,60	29,82	23,55	35,81	31,51	41,79	39,45	47,78
30	0,52	12,79	34,85	22,02	43,60	31,27	52,35	40,51	61,10	49,75	69,85
40	0,70	19,76	44,80	30,74	56,05	41,73	67,30	52,73	78,55	63,71	89,79
50	0,87	28,35	53,39	41,49	66,80	54,64	80,20	67,79	93,61	80,93	107,01
60	1,05	38,30	60,36	53,94	75,52	69,59	90,67	85,24	105,82	100,88	120,98
70	1,22	49,31	65,50	67,72	81,94	86,13	98,38	104,54	114,83	122,95	131,27
80	1,40	61,05	68,64	82,40	85,88	103,75	103,10	125,12	120,34	146,47	137,57
90	1,57	73,15	69,70	97,54	87,20	121,94	104,70	146,34	122,20	170,73	139,70
100	1,75	85,25	68,64	112,68	85,88	140,12	103,10	167,55	120,34	194,98	137,57
110	1,92	96,99	65,50	127,36	81,94	157,74	98,38	188,13	114,83	218,50	131,27
120	2,09	108,00	60,36	141,14	75,52	174,28	90,67	207,43	105,82	240,57	120,98
130	2,27	117,95	53,39	153,59	66,80	189,23	80,20	224,88	93,61	260,52	107,01
140	2,44	126,54	44,80	164,34	56,05	202,14	67,30	239,94	78,55	277,74	89,79
150	2,62	133,51	34,85	173,06	43,60	212,60	52,35	252,16	61,10	291,70	69,85
160	2,79	138,65	23,84	179,48	29,82	220,32	35,81	261,16	41,79	302,00	47,78
170	2,97	141,79	12,10	183,42	15,14	225,04	18,18	266,67	21,22	308,30	24,26
180	3,14	142,85	0,00	184,74	0,00	226,63	0,00	268,53	0,00	310,42	0,00

Nota. En el anexo 11, se encuentra los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), de la muestra de bloque de toba 1H del campo Newberry – USA.
Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 12

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, bloque de toba muestra IV, Newberry C (11)

Toba 1V											
O1		105,48		126,02		146,56		167,10		232,04	
O3		3,45		10,34		17,24		24,14		31,03	
Radio		51,02		57,84		64,66		71,48		100,51	
Centro		54,47		68,18		81,90		95,62		131,54	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	3,45	0,00	10,34	0,00	17,24	0,00	24,14	0,00	31,03	0,00
10	0,17	4,23	8,86	11,22	10,04	18,22	11,23	25,23	12,41	32,56	17,45
20	0,35	6,53	17,45	13,83	19,78	21,14	22,12	28,45	24,45	37,09	34,37
30	0,52	10,28	25,51	18,09	28,92	25,90	32,33	33,72	35,74	44,50	50,25
40	0,70	15,39	32,79	23,87	37,18	32,37	41,56	40,86	45,95	54,54	64,60
50	0,87	21,67	39,08	31,00	44,31	40,34	49,53	49,67	54,76	66,93	76,99
60	1,05	28,96	44,18	39,26	50,09	49,57	56,00	59,88	61,90	81,28	87,04
70	1,22	37,02	47,94	48,40	54,35	59,78	60,76	71,17	67,17	97,16	94,44
80	1,40	45,61	50,24	58,14	56,96	70,67	63,68	83,21	70,39	114,08	98,98
90	1,57	54,47	51,02	68,18	57,84	81,90	64,66	95,62	71,48	131,54	100,51
100	1,75	63,32	50,24	78,22	56,96	93,13	63,68	108,03	70,39	148,99	98,98
110	1,92	71,91	47,94	87,96	54,35	104,02	60,76	120,07	67,17	165,91	94,44
120	2,09	79,97	44,18	97,10	50,09	114,23	56,00	131,36	61,90	181,79	87,04
130	2,27	87,26	39,08	105,36	44,31	123,46	49,53	141,57	54,76	196,14	76,99
140	2,44	93,54	32,79	112,49	37,18	131,43	41,56	150,38	45,95	208,53	64,60
150	2,62	98,65	25,51	118,27	28,92	137,90	32,33	157,52	35,74	218,57	50,25
160	2,79	102,40	17,45	122,53	19,78	142,66	22,12	162,79	24,45	225,98	34,37
170	2,97	104,70	8,86	125,14	10,04	145,58	11,23	166,01	12,41	230,51	17,45
180	3,14	105,48	0,00	126,02	0,00	146,56	0,00	167,10	0,00	232,04	0,00

Nota. En el anexo 12, se encuentra los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), de la muestra de bloque de toba 1V del campo Newberry – USA.

Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 13

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, bloque de toba muestra 2H, Newberry C (11)

Tova 2H											
O1		96,67		104,17		111,57		126,38		141,19	
O3		10,34		13,79		17,24		24,14		31,03	
Radio		43,17		45,19		47,17		51,12		55,08	
Centro		53,51		58,98		64,41		75,26		86,11	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	10,34	0,00	13,79	0,00	17,24	0,00	24,14	0,00	31,03	0,00
10	0,17	11,00	7,50	14,48	7,85	17,96	8,19	24,92	8,88	31,87	9,56
20	0,35	12,94	14,76	16,52	15,46	20,08	16,13	27,22	17,48	34,35	18,84
30	0,52	16,12	21,58	19,84	22,60	23,56	23,58	30,99	25,56	38,41	27,54
40	0,70	20,44	27,75	24,36	29,05	28,27	30,32	36,10	32,86	43,92	35,40
50	0,87	25,76	33,07	29,93	34,62	34,09	36,13	42,40	39,16	50,71	42,19
60	1,05	31,92	37,38	36,39	39,14	40,82	40,85	49,70	44,27	58,57	47,70
70	1,22	38,74	40,56	43,52	42,46	48,27	44,32	57,78	48,04	67,27	51,76
80	1,40	46,01	42,51	51,13	44,50	56,21	46,45	66,38	50,34	76,55	54,24
90	1,57	53,51	43,17	58,98	45,19	64,41	47,17	75,26	51,12	86,11	55,08
100	1,75	61,00	42,51	66,83	44,50	72,60	46,45	84,14	50,34	95,67	54,24
110	1,92	68,27	40,56	74,44	42,46	80,54	44,32	92,74	48,04	104,95	51,76
120	2,09	75,09	37,38	81,58	39,14	87,99	40,85	100,82	44,27	113,65	47,70
130	2,27	81,25	33,07	88,03	34,62	94,72	36,13	108,12	39,16	121,51	42,19
140	2,44	86,57	27,75	93,60	29,05	100,54	30,32	114,42	32,86	128,30	35,40
150	2,62	90,89	21,58	98,12	22,60	105,25	23,58	119,53	25,56	133,81	27,54
160	2,79	94,07	14,76	101,44	15,46	108,73	16,13	123,30	17,48	137,87	18,84
170	2,97	96,01	7,50	103,48	7,85	110,85	8,19	125,60	8,88	140,35	9,56
180	3,14	96,67	0,00	104,17	0,00	111,57	0,00	126,38	0,00	141,19	0,00

Nota. En el anexo 13, se encuentra los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), de la muestra de bloque de toba 2H del campo Newberry – USA.
Elaborado y organizado por los autores.

Anexo 14

Valores calculados de esfuerzo normal y de corte, bloque de toba muestra 2V, Newberry C (11)

Toba 2V									
O1		68,58		75,43		82,28		95,97	
O3		10,34		13,79		17,24		24,14	
Radio		29,12		30,82		32,52		35,92	
Centro		39,46		44,61		49,76		60,06	
(°)	(rad)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	σ (Mpa)	τ (Mpa)
0	0,00	10,34	0,00	13,79	0,00	17,24	0,00	24,14	0,00
10	0,17	10,78	5,06	14,26	5,35	17,73	5,65	24,69	6,24
20	0,35	12,10	9,96	15,65	10,54	19,20	11,12	26,31	12,28
30	0,52	14,24	14,56	17,92	15,41	21,60	16,26	28,95	17,96
40	0,70	17,15	18,72	21,00	19,81	24,85	20,90	32,54	23,09
50	0,87	20,74	22,31	24,80	23,61	28,86	24,91	36,97	27,51
60	1,05	24,90	25,22	29,20	26,69	33,50	28,16	42,10	31,10
70	1,22	29,50	27,36	34,07	28,96	38,64	30,56	47,77	33,75
80	1,40	34,40	28,68	39,26	30,35	44,11	32,03	53,82	35,37
90	1,57	39,46	29,12	44,61	30,82	49,76	32,52	60,06	35,92
100	1,75	44,52	28,68	49,96	30,35	55,41	32,03	66,29	35,37
110	1,92	49,42	27,36	55,15	28,96	60,88	30,56	72,34	33,75
120	2,09	54,02	25,22	60,02	26,69	66,02	28,16	78,01	31,10
130	2,27	58,18	22,31	64,42	23,61	70,66	24,91	83,14	27,51
140	2,44	61,77	18,72	68,22	19,81	74,67	20,90	87,57	23,09
150	2,62	64,68	14,56	71,30	15,41	77,92	16,26	91,16	17,96
160	2,79	66,82	9,96	73,57	10,54	80,32	11,12	93,80	12,28
170	2,97	68,14	5,06	74,96	5,35	81,79	5,65	95,42	6,24
180	3,14	68,58	0,00	75,43	0,00	82,28	0,00	95,97	0,00

Nota. En anexo14, se encuentra los valores calculados de radio, centro, esfuerzo normal (σ) y esfuerzo cortante (τ), de la muestra de bloque de toba 2V del campo Newberry – USA.

Elaborado y organizado por los autores.