

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS GEOMECÁNICOS GENERADOS EN  
YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS POR CAMBIOS DE TEMPERATURA**

**LUIS ALBERTO RICO ESPINOZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2013**

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS GEOMECÁNICOS GENERADOS EN  
YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS POR CAMBIOS DE TEMPERATURA**

**LUIS ALBERTO RICO ESPINOZA**

**Proyecto de grado optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**DIRECTOR**

**Ph. D. Zuly Calderón Carrillo**

**Ing Yair Andrés Quintero**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2013**

## DEDICATORIA

*A mi padre Saúl Rico y en especial a mi madre Carmen Espinoza por su apoyo, amor, colaboración. Además por ser mi motivación para culminar una nueva etapa en mi vida.*

*A mis hermanas Sandra Rico y Milena Rico por su apoyo y colaboración.*

*A mis compañeros del grupo de investigación de estabilidad de pozo por su apoyo, colaboración y sus voces de aliento para no desistir durante el camino.*

*En general a todos y cada uno de los compañeros de la carrera que de una u otra manera me brindaron su colaboración.*

*A Carito por su colaboración, apoyo, palabras de ánimo.*

## AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Industrial de Santander por ser la institución que me brindó la oportunidad de alcanzar mi sueño y meta de ser un profesional y poder brindarle ese orgullo a mi familia.

A la Dra Zuly Calderón y el Ing Yair Quintero por su colaboración, orientación, asesorías y apoyo en el desarrollo de la tesis.

Al grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo (GIEP) por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de adquirir conocimientos de geomecánica además de desarrollar el trabajo de grado.

A los profesores de la escuela por transmitirme sus conocimientos relacionados con la cerrera y por su motivación.

**TITULO: ANÁLISIS DE LOS EFECTOS GEOMECÁNICOS GENERADOS EN YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS POR CAMBIOS DE TEMPERATURA.\***

**AUTOR: LUIS ALBERTO RICO ESPINOZA.\*\***

**PALABRAS CLAVES: Esfuerzos térmicos, propiedades mecánicas, expansión térmica, integridad sello, cambios mineralógicos.**

**RESUMEN**

El estudio del comportamiento y la respuesta térmica de las rocas sedimentarias ante procesos que impliquen una variación de la temperatura en yacimiento es muy importante para la ingeniería de petróleos en la implementación de procesos de recobro mejorado térmicos, con el objetivo de predecir el comportamiento de la roca y reducir la incertidumbre de la respuesta de esta ante variaciones de temperatura y comprender los fenómenos inducidos, además de tener en cuenta los posibles problemas que pueden desarrollarse sin conocimiento que pueden afectar el éxito del proceso de recobro implementado.

En esta investigación se presentará la recopilación de estudios de caracterización térmica de rocas y la variación de ciertas propiedades ante aumentos de temperatura como: cambios de esfuerzos, efecto sobre la presión de poro, cambios mineralógicos inducidos, integridad de la roca sello, expansión térmica de la roca, efecto sobre las propiedades petrofísicas, microfracturas inducidas, módulo elástico, resistencia de la roca. Además se presentaran análisis de datos de laboratorio de tres formaciones que se sometieron a un calentamiento por 15 días a una temperatura de 500°C para contrastar con los comportamientos de la literatura y se presentara un análisis de las propiedades que se identificaron que varían con la temperatura y su impacto en la productividad del yacimiento.

---

\* Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de petróleos, Director Zuly Himelda Calderón, Codirector Yair Quintero.

**TITLE: GEOMECHANICAL ANALYSIS OF EFFECTS OF OIL FIELDS GENERATED BY TEMPERATURE CHANGES.\***

**AUTHOR: LUIS ALBERTO RICO ESPINOZA.\*\***

**KEYWORDS:** Thermal stresses, mechanical properties, thermal expansion, caprock integrity, mineralogical changes.

**DESCRIPTION:**

The study of behavior and the thermal response of sedimentary rocks to processes involving a change of temperature is very important reservoir for petroleum engineering in implementing thermal enhanced oil recovery process, with the aim to predict the behavior of the rock and reduce the uncertainty of the answer to this to the temperature variations and understand the phenomena induced, while taking into account the possible problems that may develop without knowledge that can affect the success of implemented recovery process.

In this research present the compilation of thermal characterization studies of rocks and the variation of certain properties by temperature increases as stress changes, effect on pore pressure, induced mineralogical changes, caprock integrity, thermal expansion rock, effect on petrophysical properties, induced microfractures, elastic modulus and rock strength. In addition Analysis of laboratory data of three formations were subjected to heating for 15 days at a temperature of 500 °C to contrast with the behavior of the literature and present an analysis of the properties that were identified that vary with temperature and its impact on reservoir productivity.

---

\*Project degree.

\*\*Physicochemical School of Engineering School of Petroleum Engineering, Director Zuly Himelda Calderón, Co-director Yair Quintero.

## TABLA DE CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN. ....	15
1. GENERALIDADES. ....	17
1.1 TEMPERATURA EN EL YACIMIENTO. ....	17
1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR. ....	18
1.2.1 Mecanismos de transferencia de calor en la formación. ....	20
1.3 EXPANSIÓN TÉRMICA. ....	21
1.3.1 Expansión térmica diferencial de minerales y rocas. ....	23
1.3.2 Modelos de microfisuras por expansión térmica. ....	28
Modelo Bicristal. ....	29
Modelo de inclusión Esférica. ....	30
Modelo policristalino agregado. ....	31
1.3.3 Modelo de expansión térmica de Turner. ....	35
2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ROCAS. ....	37
2.1 RESISTENCIA Y MÓDULOS ELÁSTICOS. ....	39
2.1.1 Resistencia. ....	39
Prueba de compresión uniaxial. ....	39
Prueba de resistencia a la tensión. ....	40
2.1.2 Módulos elásticos. ....	42
Módulo de Young. ....	42
Relación de poisson. ....	42
2.1.3 Efecto de la temperatura en la resistencia y módulos elásticos. ....	42
2.2 DEFORMACIÓN. ....	54
2.3 ONDAS ELÁSTICAS. ....	57
2.4 EFECTO TÉRMICO REFLEJADO EN CRITERIOS DE FALLA. ....	60
2.4.1 Análisis de datos triaxiales. ....	60
Criterio de falla de Mohr Coulomb. ....	61
Criterio de falla de Hoek- Brown. ....	67
2.4.2 Análisis de datos uniaxiales. ....	71
3. EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LAS REACCIONES TÉRMICAS EN LAS ROCAS Y PRESIÓN DE PORO. ....	74

3.1 REACCIONES TÉRMICAS EN LAS ROCAS.....	74
3.2 MECANISMOS DE DAÑO INDUCIDO TÉRMICAMENTE. ....	77
3.3 CAMBIOS MINERALÓGICOS OBSERVADOS EN PRUEBAS DE LABORATORIO Y CAMPO POR INYECCIÓN DE VAPOR. ....	82
3.4 CAMBIOS MINERALÓGICOS OBSERVADOS EN PRUEBAS DE LABORATORIO Y CAMPO POR COMBUSTION IN SITU. ....	87
3.5 ANÁLISIS DATOS DE LABORATORIO. ....	90
3.6 PRESIÓN DE PORO.....	92
3.6.1 Método de Butler. ....	93
3.6.2 Modelo de presurización de Ghabezloo y Sulem.....	97
4. EFECTO EN LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS DEL YACIMIENTO POR CAMBIOS DE TEMPERATURA. ....	101
4.1 PERMEABILIDAD.....	101
Ecuación modificada de Kozeny-Carman. ....	102
Ecuación modificada de Vogel-Tammann-Fulcher. ....	103
4.2 POROSIDAD.....	106
4.2.1 Ecuación modificada de Kozeny-Carman. ....	106
4.2.2 Modelo del efecto termo-geomecánico sobre la porosidad. ....	107
Caso 1. Límites sin restricciones. ....	111
Caso 2. Límites totalmente restringidos. ....	112
Caso 3. Bloque interno. ....	113
4.3 COMPRESIBILIDAD. ....	114
5. CAMBIOS GEOLÓGICOS POR CAMBIOS DE TEMPERATURA MÁS COMUNES EN YACIMIENTOS CON VARIACIONES DE TEMPERATURA. ....	117
5.1 VARIACIÓN DE LOS ESFUERZOS TÉRMICOS IN SITU Y SU EFECTO SOBRE LA ROCA SELLO Y EL YACIMIENTO. ....	117
5.2 ESFUERZOS INDUCIDOS POR AUMENTOS DE TEMPERATURA Y AUMENTO DE LA PRESIÓN DE PORO EN UNA INYECCIÓN DE VAPOR. ....	123
5.3 COMPACTACIÓN TÉRMICA. ....	126
5.3.1 Compactación. ....	126
5.3.2 Ejemplo de aplicación de la compresibilidad térmica. ....	129
5.4 Cizallamiento del casing en los procesos térmicos. ....	133

6. CONSIDERACIONES DEL IMPACTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN YACIMIENTO DE HIDROCARBUROS SOMETIDOS A RECUPERACIÓN TÉRMICA. ....	135
6.1 EL MÓDULO DE YOUNG (E).....	135
6.2 LA RELACIÓN DE POISSON. ....	137
6.3 DEFORMACIÓN. ....	138
6.4 RESISTENCIA.....	140
6.5 ONDAS ELÁSTICAS. ....	140
6.6 CAMBIOS MINERALÓGICOS. ....	141
6.7 ESFUERZOS TÉRMICOS INDUCIDOS.....	141
6.8 POROSIDAD.....	142
6.9 PERMEABILIDAD.....	143
6.10 COMPACTACIÓN. ....	144
7. CONCLUSIONES.....	146
8. RECOMENDACIONES. ....	150
BIBLIOGRAFÍA. ....	151

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 1 Datos de una prueba triaxial.....	61
Tabla 2. Parámetros de la regresión para las diferentes temperaturas.....	65
Tabla 3. Parámetros para generar la envolvente de falla de Hoek Brown.....	69
Tabla 4. Datos de una prueba uniaxial antes y después del proceso, Formación A. .....	72
Tabla 5. Datos de una prueba uniaxial antes y después del proceso, Formación C. .....	73
Tabla 6. Reacción de minerales constituyentes de las rocas.....	75
Tabla 7. Reacción de minerales constituyentes de las rocas.....	76
Tabla 8. Los cambios en la composición mineral (“+” representa el rango donde mineral está presente, “o” el rango donde mineral está ausente). ....	80
Tabla 9. Cambios en la composición en las arcillas, antes y después de la prueba de inyección de vapor.....	84
Tabla 10. Contenido mineral y temperaturas de transformación mineral. ....	89
Tabla 11. Resultados antes y después del proceso térmico a nivel macroscópico. .....	90
Tabla 12. Resultados antes y después del proceso térmico de la fracción menor a 2 micras.....	90
Tabla 13. Datos para la aplicación del método de Butler. ....	95
Tabla 14. Análisis global de las variables y su influencia en producción.....	145

## LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Gradiente geotérmico.....	18
Figura 2. Expansión térmica volumétrica.....	24
Figura 3. Expansión térmica lineal. ....	25
Figura 4. Distribución de esfuerzos sobre los contactos de grano en un agregado poligranular de cuarzo.....	26
Figura 5. Curvas esfuerzo-deformación para materiales elásticos y frágiles.....	28
Figura 6. Modelos de esfuerzos y microfracturas intergranulares inducidas térmicamente.....	33
Figura 7. Expansión térmica lineal de cuarzo, microclina y plagioclasa paralelo al eje máximo y mínimo.....	33
Figura 8. Relación del módulo de Young con la temperatura para el cuarzo paralelo a los ejes cristalográficos a y c. $E_a = 78$ Gpa y $E_c = 103$ Gpa. ....	34
Figura 9. Variación del esfuerzo intergranular térmico máximo del cuarzo. ....	34
Figura 10. Alteración visual de las muestras durante el calentamiento. ....	38
Figura 11. Compresión uniaxial.....	40
Figura 12. Carga puntual y prueba brasilera. ....	41
Figura 13. Esfuerzo- deformación para una arenisca.....	44
Figura 14. . Resistencia a la tensión. ....	45
Figura 15. Resistencia a la compresión.....	46
Figura 16. Módulo de Young. ....	46
Figura 17. Módulo de Young paralelo y perpendicular al plano isotrópico. ....	47
Figura 18. Esfuerzo-deformación axial de una arenisca. ....	48
Figura 19. esfuerzo-deformación axial de una limolita. ....	48
Figura 20. Variación del pico de resistencia con la temperatura. ....	49
Figura 21. a) Variación del módulo de Young con la temperatura. Tomado de: Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. 2009. b) Relación de Poisson antes (under) y después (after) del tratamiento térmico.....	51
Figura 22. Esfuerzo axial Vs deformación axial a diferentes temperaturas. ....	52
Figura 23. Resistencia a la compresión normalizada Vs la temperatura para.....	53
Figura 24. Módulo elástico normalizado Vs la temperatura para experimentos UCS reportados en la literatura.....	54
Figura 25. Comportamiento esfuerzo-deformación para diferentes temperaturas. ....	55
Figura 26. Macrofracturas de pruebas no confinadas y confinadas. ....	56
Figura 27. Velocidad de las ondas P y S a diferentes temperaturas. ....	59
Figura 28. Diagrama del criterio de Mohr- Coulomb.....	64
Figura 29. Esfuerzo máximo Vs esfuerzo mínimo. ....	64
Figura 30. Envolvente de falla de Mohr Coulomb.....	66
Figura 31. Gráficas de esfuerzo mayor Vs el esfuerzo menor.....	69

Figura 32. . Envolventes de falla de Hoek Brown.....	70
Figura 33. Criterio de falla para datos uniaxiales, Formación A.....	72
Figura 34. Criterio de falla para datos uniaxiales, Formación C.....	73
Figura 35. Daño inducido térmicamente.....	78
Figura 36. Microfractura generada en un grano de cuarzo.....	79
Figura 37. Microfracturas desarrollada en el material cementante a 450°C.....	81
Figura 38. Diagrama de fase de las estabildades relativas de esmectita, caolinita, albita, y analcima.....	86
Figura 39. Patrones de alteración de los sedimentos expuestos a diferentes procesos de recuperación térmica. ....	88
Figura 40. Variación de la viscosidad respecto a la temperatura. ....	96
Figura 41. Variación de la temperatura en el yacimiento a partir de la cara de pozo. ....	96
Figura 42. Variación de la presión de poro desde la cara de pozo.....	96
Figura 43. Esquema sistema de una celda triaxial.....	98
Figura 44. Permeabilidad Vs temperatura para diatomitas con diferentes condiciones iniciales. Usando la correlación de Konezy-Carman. ....	105
Figura 45. Permeabilidad Vs temperatura para diatomitas con diferentes condiciones iniciales. Usando la correlación de Vogel-Tammann-Fulcher.....	105
Figura 46 Esqueleto de un medio poroso.....	110
Figura 47. Bloque poroso sin restricciones.....	111
Figura 48 Bloque poroso totalmente restringido.....	112
Figura 49 Bloque poroso dentro de un cuerpo rocoso. ....	113
Figura 50. Variación de la compresibilidad con la temperatura. ....	115
Figura 51. Efecto de la temperatura en la compresibilidad para muestras profundas y someras.....	116
Figura 52. Modelo esquemático de un yacimiento para el cálculo de esfuerzos térmicos inducidos.....	120
Figura 53. Variación esfuerzos en zonas calentadas. ....	121
Figura 54. a) Falla por tensión y b) falla por cizalla, iniciada después del proceso de calentamiento. ....	122
Figura 55. Trayectorias de esfuerzos y cizallamiento.....	123
Figura 56. Cambios en los esfuerzos y en la resistencia de la roca.....	124
Figura 57. Distribución de presión (psi) en 10 años. ....	130
Figura 58. Distribución de temperatura (°F) después de 10 años. ....	131
Figura 59. Compactación del yacimiento solo considerando la expansión térmica. ....	132
Figura 60. Compactación considerando la modificación de Settari. ....	132
Figura 61. Cizallamiento inducido en una inyección térmica. ....	133
Figura 62. Configuración general del yacimiento bajo un proceso térmico. ....	136
Figura 63. Efecto de la presión y la temperatura en la deformación. ....	139

## INTRODUCCIÓN.

En la industria del petróleo, el conocimiento de las propiedades mecánicas de las rocas es importante durante la exploración y explotación de los campos de hidrocarburo. Normalmente estas propiedades como resistencia a la tensión, resistencia a la compresión, módulo de Young, relación de Poisson y deformación y son obtenidos en el laboratorio con muestras a condiciones que no son las reales del yacimiento y aún más cuando se trata de procesos de recuperación térmica donde la temperatura del yacimiento sufre un cambio abrupto. Estas propiedades a través del desarrollo de la geomecánica han sido estudiadas fuertemente desde el punto de vista de estabilidad de pozos durante la perforación, lo cual ha generado resultados muy satisfactorios en la reducción de costos y tiempos no productivos (NPT).

Ahora a nivel mundial se está tomando conciencia de la importancia del estudio de estas propiedades durante la etapa de producción; por ejemplo, es bien conocido que la producción genera una depleción natural y normal del yacimiento que a su vez tiene como consecuencia un aumento de los esfuerzos efectivos por la reducción de la presión de poro, los cuales dependiendo de las condiciones del yacimiento pueden generar compactación. La compactación del yacimiento durante su etapa inicial, representa un beneficio puesto que actúa como un mecanismo que favorece la producción pero cuando este fenómeno alcanza una etapa crítica genera un impacto negativo pues reduce la porosidad y permeabilidad por el aplastamiento de los poros de la roca. En el capítulo cinco se puede ver el análisis del efecto térmico en yacimientos que presentan compactación, propuesto por Settari (2001), en el cual se puede observar aumento de la compactación del yacimiento.

El objetivo principal de esta investigación es hacer una revisión bibliográfica de las propiedades de las rocas que han sido estudiadas a nivel mundial en el ámbito de las propiedades del yacimiento cuando se genera un aumento de la temperatura con el objetivo de establecer y predecir cuál es la respuesta y comportamiento de

las rocas ante procesos de recobro térmico mejorado. Por tal motivo dentro de la investigación se recopiló información correspondiente no solo a propiedades mecánicas sino también a cambios mineralógicos, impacto sobre algunas propiedades petrofísicas, presión de poro y algunos problemas que suelen ser comunes en dichos procesos.

Los resultados de esta investigación permite afirmar el estudio en el campo de los procesos térmicos y su efecto sobre las propiedades de las rocas son aun materia de estudio a nivel de laboratorio amplias para determinar cuál es el comportamiento de las propiedades según la temperatura y además para diferentes litologías de interés bajo diferentes condiciones (granulometría, grado de cementación, rocas consolidadas e in consolidadas, presión de confinamiento, presión de poro, composición, etc.). En el grupo de investigación de estabilidad de pozo y el ICP (Instituto colombiano del petróleo) está iniciando la investigación a nivel de laboratorio y esta investigación se presentara los primeros resultados obtenidos, los cuales son usados para contrastar con la información recopilada de la revisión bibliográfica. Este contraste genera un mayor interés puesto que las propiedades no presentan una tendencia clara en la literatura generando confusiones en cuanto comportamiento. Además también se reafirma con la investigación que las condiciones de la muestras son importantes para determinar cómo varían propiedades como lo son los el módulo de Young, la relación de Poisson y la resistencia a la compresión.

## **1. GENERALIDADES.**

### **1.1 TEMPERATURA EN EL YACIMIENTO.**

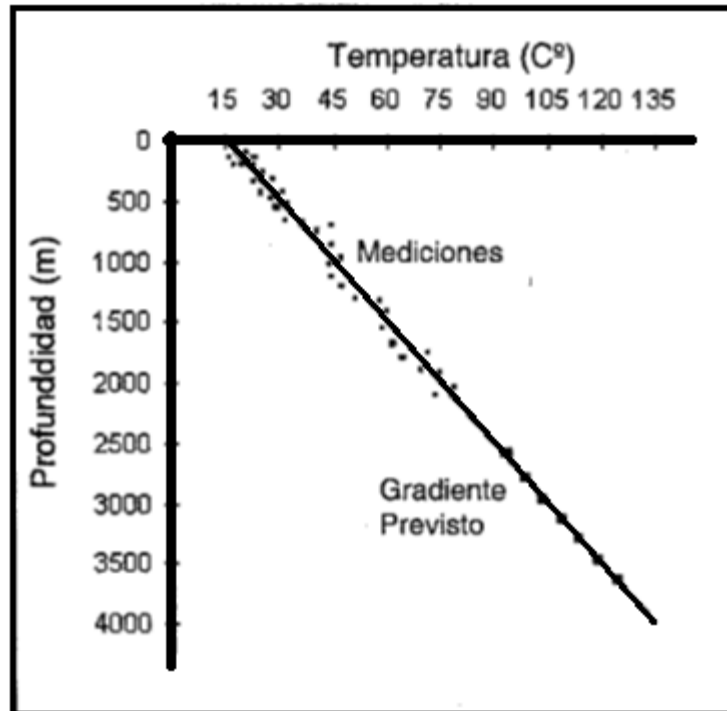
La temperatura en el yacimiento se puede determinar a través de un gradiente térmico para hacer una primera aproximación y estimar la temperatura conociendo el gradiente geotérmico. Este presenta un valor promedio de alrededor de  $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . En investigaciones se han llegado a encontrar valores extremos menores de  $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  y mucho mayores a  $6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ .

Dada la diversidad de los gradientes geotérmicos dependiendo de la zona estudiada en la tierra debido a que el gradiente no es un valor constante puesto que depende de las características físicas que presente el material en cada punto del interior del planeta, es decir, de las condiciones geológicas locales algunas de las cuales son: la relación presión-temperatura, la composición química y las reacciones que se produzcan, la existencia de material radiactivo, la presencia de movimientos convectivos. Durante la perforación el perfil de temperaturas desde la superficie hasta el yacimiento se mide con termómetros ubicados sobre las herramientas de perforación obteniendo el dato en tiempo real, cabe señalar que la perforación de los pozos y la presencia de los fluidos de perforación (lodo de perforación) pueden alterar el perfil geotérmico original por una transferencia de calor de la formación al fluido afectando la temperatura sobre la cara del pozo y los fluidos que saturan los alrededores a esta.

El gradiente geotérmico se representa en la figura 1, para una superficie coincidente con el nivel del mar de  $15^{\circ}\text{C}$ . Para este caso, la temperatura de un yacimiento a 500m de profundidad sería  $30^{\circ}\text{C}$  y a 4000m sería de  $135^{\circ}\text{C}$ . A medida que se producen fluidos, retira calor del yacimiento por convección. Ahora en el caso de la producción de fluidos las rocas suprayacentes y

subyacentes, por encima y por debajo del yacimiento, se pueden suponer como fuentes de calor de extensión infinita.

Figura 1. Gradiente geotérmico.



Tomado de: Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems.1992.

## 1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR.

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia.

La termodinámica trata sistemas en equilibrio; puede usarse para predecir la cantidad de energía requerida para llevar un sistema desde un estado de equilibrio a otro; no puede usarse, en cambio, para predecir lo rápido que será el cambio, ya que el sistema no está en equilibrio durante el proceso. La transferencia de calor complementa los principios primero y segundo de la termodinámica, al proporcionar leyes experimentales adicionales que se usan para establecer la rapidez de la transferencia de energía.

### **1.2.1 Mecanismos de transferencia de calor.**

El transporte de calor en el interior de la Tierra se lleva por medio de tres mecanismos: conducción, convección y radiación; sin embargo, los tres tienen diferente grado de importancia en las diferentes capas: en la corteza el principal medio de transporte de calor es la conducción mientras que en el manto lo es la convección y radiación. Pero antes de describir lo que sucede en la Tierra es necesario explicar cómo funciona cada uno de ese tipo de mecanismos, para después establecer cómo es que influyen en la disipación de la energía contenida en el interior de la Tierra.

**La conducción** es la forma como se transporta el calor de un cuerpo más caliente a uno más frío con el cual se encuentra en contacto. La eficiencia de ésta depende de una propiedad de los materiales que se llama conductividad térmica y que nos dice cuál será la diferencia de temperatura provocada por un flujo de calor: a mayor conductividad menor será la diferencia de temperatura a través del material.

**La convección** es un proceso un poco más complejo que se da solamente en fluidos (líquidos y gases). Al ser calentada la parte inferior de un fluido, ésta se expandirá y se volverá menos densa que la parte superior más fría, por lo cual tenderá a subir, con lo que la parte fría quedará ahora en contacto con la fuente de calor repitiéndose de esta forma el proceso y dando origen a lo que se llama

celdas de convección, en las cuales existen corrientes ascendentes y descendentes. Este mecanismo se va a generar a partir de un cierto valor de la diferencia de temperatura y depende de la viscosidad y densidad del fluido.

**La radiación** es una forma de transporte de calor que es importante a temperaturas altas; en realidad todos los cuerpos que tienen temperatura por arriba del cero absoluto (cero grados Kelvin o  $-273.15^{\circ}\text{C}$ ) emiten radiación, pero la frecuencia de la radiación emitida es proporcional a la temperatura del material. De esta forma observamos que el transporte de calor en el interior de la Tierra va a depender de la temperatura y de las características del material. La corteza se comporta como un sólido y tiene temperaturas relativamente bajas. El manto se comporta como un fluido y como la convección es mucho más eficiente en este caso, éste es el principal medio de transporte, aun cuando las temperaturas relativamente altas hacen posible que la energía también se transporte por medio de la radiación.

### **1.2.1 Mecanismos de transferencia de calor en la formación<sup>1</sup>.**

Fluidos calientes como: vapor, líquido o una mezcla de ambos, es inyectado en una formación, parte de su contenido calorífico es transferido a la matriz de la roca y a los fluidos intersticiales, así como también a las formaciones adyacentes no productoras.

A medida que el fluido inyectado desplaza parcialmente al petróleo, al agua, transporta el calor a los espacios porosos. Así, los fluidos en la formación son calentados por conducción y convección, la matriz de la roca es calentada por conducción, y los fluidos desplazados son calentados por conducción y convección. La transferencia conductiva de calor a la matriz de la roca ayuda a igualar las temperaturas del sólido y del fluido, las cuales usualmente se consideran iguales en cálculos de inyección de fluidos calientes. Sin embargo, el tipo de fluido inyectado determinará el tiempo al cual se alcanza tal equilibrio

---

<sup>1</sup>BANZER, Carlos y ALVARADO, Douglas. Recuperación térmica de petróleo. 2002

térmico. Por ejemplo, el coeficiente de transferencia de calor en el caso de vapor es mucho mayor que en el caso de agua caliente.

La transferencia de calor hacia las formaciones adyacentes es por conducción, ya que no hay flujo de fluidos. El proceso total, sin embargo, es complejo, ya que con el avance del frente de calor en la arena, las formaciones adyacentes son expuestas a cambios de temperatura con tiempo. Así, los gradientes de temperatura resultantes, dan lugar al flujo de calor en dos o tres dimensiones en las formaciones supra y sub-yacentes.

### **1.3 EXPANSIÓN TÉRMICA.**

El comportamiento mecánico de las rocas con respecto a la temperatura depende de la naturaleza mineralógica principalmente, variaciones de temperatura pueden afectar a la composición mineralógica principalmente de arcillas y la red de los granos de roca. Los cambios estructurales se relacionan principalmente con la modificación de las discontinuidades (microfracturas y poros).

Los materiales formados de cristales con fuerte anisotropía de expansión térmica (en el caso de calcita, areniscas con alto contenido de cuarzo y feldespato) o dimensiones de cristal o de naturaleza con diferente mineralogía, un aumento de la temperatura produce un cambio diferencial en el tamaño y el volumen de los minerales, así como defectos en los cristales. Estas diferencias de dilatación de los granos en la roca dan lugar a la formación de microfisuras y la intensidad de este aumenta con la temperatura. A medida que la roca se mantiene a la temperatura a la que estas microfracturas se forman.

En general, el incremento de la temperatura de cualquier material produce un aumento de su volumen. Esto se debe a que la energía térmica absorbida induce un incremento en las vibraciones de los átomos constitutivos de la materia, agrandando las distancias interatómicas. Este fenómeno se describe como

expansión volumétrica de origen térmico a presión constante, o simplemente expansión térmica, y su medida se realiza en términos del coeficiente de expansión térmica. Este coeficiente representa el incremento relativo de volumen producido al aumentar la temperatura en un grado a presión constante, y puede escribirse como:

$$\alpha = \frac{1}{V} * \frac{\partial V}{\partial T} \quad (1)$$

Las dimensiones de  $\alpha$  son  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ , y sus valores son positivos en la mayor parte de los casos ya que, como se ha indicado anteriormente, las sustancias suelen aumentar de volumen al aumentar la temperatura. No obstante, existen algunas sustancias que disminuyen su volumen al aumentar la temperatura en determinados rangos de esta última, como es el caso del cuarzo- $\beta$ .

Por lo que se refiere a los minerales cuya estructura cristalina no es cúbica, como es el caso de la mayoría de los minerales que constituyen las rocas comunes, sus coeficientes de expansión térmica dependen de la dirección cristalina en la que se mida. Así, el cuarzo- $\alpha$  se expande más perpendicularmente a su eje c (eje principal de simetría y de elongación) que paralelamente a él. Este comportamiento se denomina expansión térmica diferencial, y su medida se realiza en términos de coeficientes de expansión térmica lineal, que representan los incrementos relativos de longitud producidos al aumentar la temperatura en un grado a presión constante:

$$\lambda = \frac{1}{l} * \frac{\partial l}{\partial T} \quad (2)$$

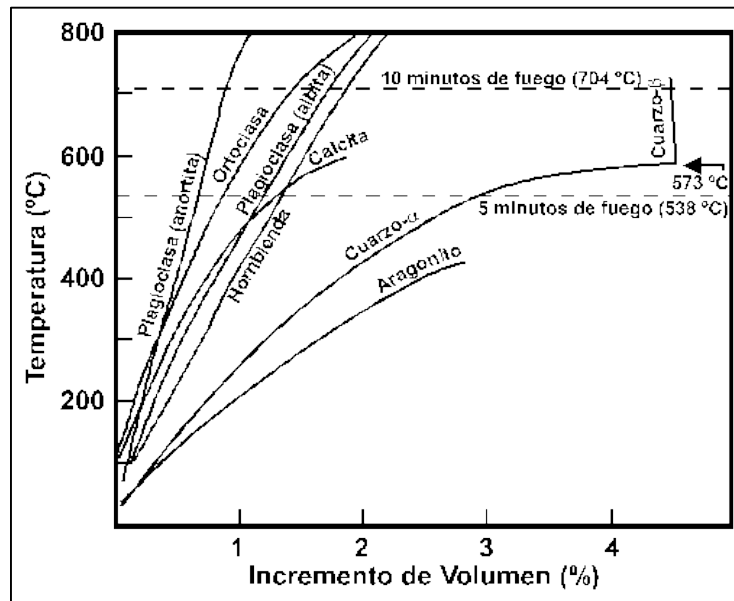
La dimensión de este coeficiente es también  $1/^{\circ}\text{C}$ . No obstante, existen algunas sustancias que disminuyen su longitud en direcciones determinadas al aumentar la

temperatura, como en el caso de la calcita, que se expande paralelamente a su eje c (eje principal de simetría) y se contrae perpendicularmente a él. No obstante, el coeficiente de expansión térmica de la calcita en términos de volumen es positivo, ya que la contracción que sufre perpendicularmente al eje c es proporcionalmente menor a la expansión que sufre paralelamente al mismo. En el caso del cuarzo- $\beta$ , el incremento de temperatura supone contracciones en todas las direcciones cristalográficas, por lo que el resultado neto es un descenso de volumen (o aumento de densidad).

### **1.3.1 Expansión térmica diferencial de minerales y rocas.**

Es conocido que el incremento de la temperatura de cualquier material conlleva, por lo general, un aumento de su volumen (Figura 2), fenómeno que se define como expansión volumétrica de origen térmico a presión constante, o simplemente expansión térmica, y su medida se realiza en términos del coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ). Este comportamiento de la materia tiene como resultado la frecuente degradación mecánica de los materiales pétreos cuando son sometidos a ciclos de calentamiento y enfriamiento continuos, ya que las consiguientes expansiones y contracciones volumétricas generan esfuerzos que pueden llegar a producir la fracturación de estos materiales por fatiga, y eventualmente llegar a su disgregación granular.

Figura 2. Expansión térmica volumétrica.

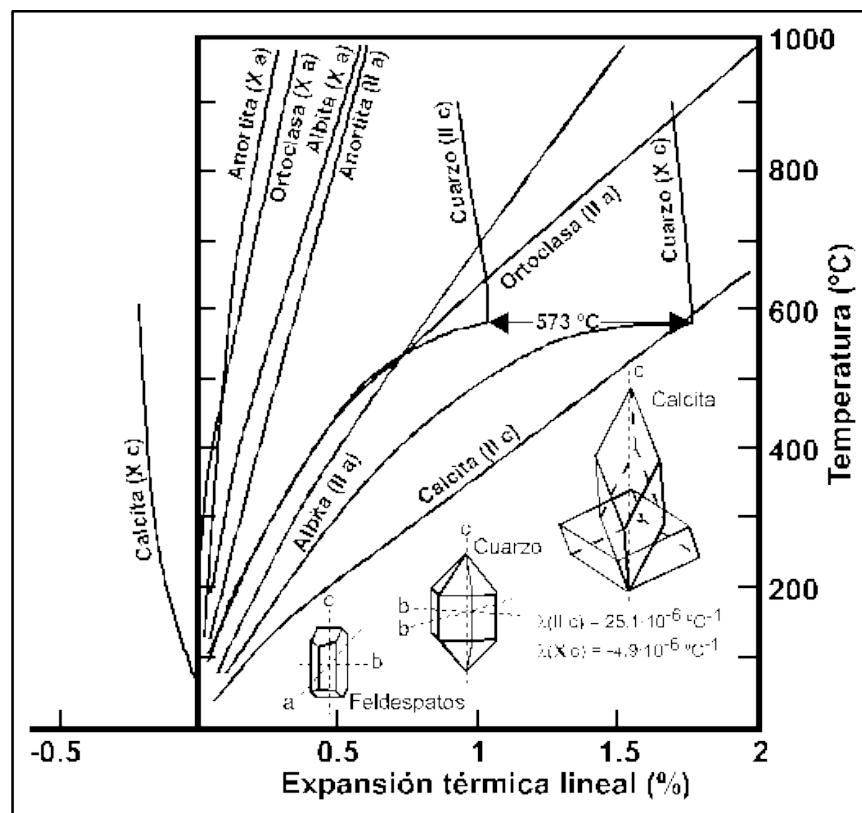


Tomado de: Winkler, 1973.

Puesto que la mayoría de los minerales que forman los materiales pétreos son anisótropos respecto de la expansión térmica, sufren cambios de dimensiones distintos según las distintas direcciones cristalinas para un incremento de temperatura dado (Figura 3). En el caso del cuarzo- $\alpha$ , se expande más perpendicularmente a su eje c que paralelamente a él. Este comportamiento, denominado expansión térmica diferencial, generará una distribución de esfuerzos heterogénea en los agregados poligranulares de rocas a escala de los contactos de grano, de forma que los mayores esfuerzos se concentran en aquellos contactos cuya traza sea aproximadamente perpendicular a direcciones cristalográficas con máximo coeficiente de expansión térmica lineal. (Un contacto entre dos granos de cuarzo cuyos ejes c se dispongan aproximadamente paralelos al mismo, Figura 4). Estos contactos de grano derivan en microfracturas preferentemente respecto de otros contactos de grano en los que las orientaciones de los minerales sea más favorable (un contacto entre dos granos de cuarzo cuyos ejes c se dispongan aproximadamente perpendicularmente al mismo).

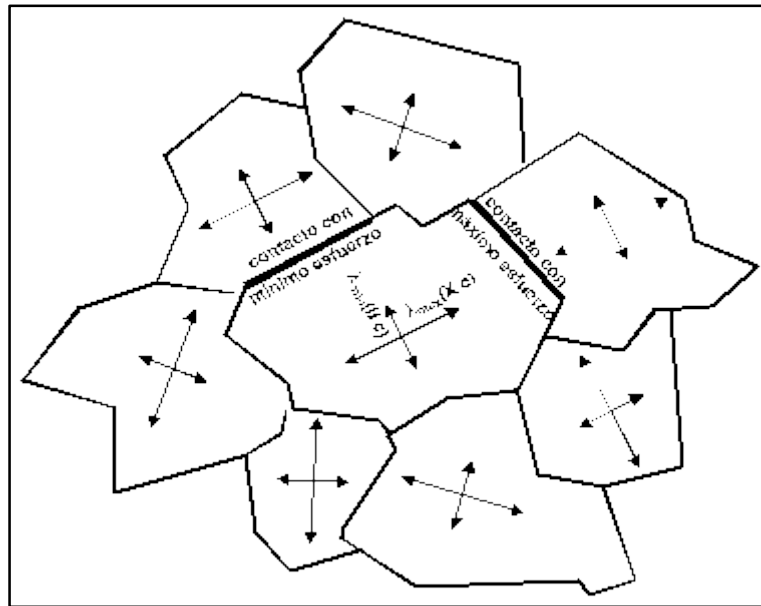
Considerando elementos constructivos discretos, cuyos granos constituyentes están distribuidos al azar, la situación global de esfuerzo tendrá un carácter isótropo a esa escala, esto es, no habrá direcciones preferentes de ruptura. En estas situaciones se generan sistemas de microfracturas irregulares que se distribuyen entre granos con coeficientes de expansión elevados.

Figura 3. Expansión térmica lineal.



Tomado de: Winkler, 1973.

Figura 4. Distribución de esfuerzos sobre los contactos de grano en un agregado poligranular de cuarzo.



Tomado de: Winkler, 1973.

Los esfuerzos generados en los materiales pétreos debidos a cambios de volumen por causas térmicas pueden evaluarse, bajo una aproximación lineal, teniendo en cuenta las relaciones entre esfuerzo compresivo lineal ( $\sigma_l$ ), deformación lineal ( $\varepsilon_l$ ), incremento de longitud ( $\Delta_l$ ), incremento de temperatura ( $\Delta_T$ ) y coeficiente de expansión térmica lineal ( $\lambda$ ). Así, en los tramos donde existe proporcionalidad lineal entre esfuerzo y deformación (tramos elásticos definidos por la ley de Hooke) se verifica la relación:

$$\sigma_l = E * \varepsilon_l \quad (3)$$

Donde E es la constante de proporcionalidad, o módulo de elasticidad o de Young:

$$E = \frac{\sigma_l}{\varepsilon_l} \quad (4)$$

Puesto que la deformación lineal se define como la razón entre el incremento de longitud y la longitud inicial:

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5)$$

Se tiene que:

$$\sigma_l = E * \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6)$$

Por otra parte, el coeficiente de expansión térmica lineal representa los incrementos relativos de longitud producidos al aumentar la temperatura en un grado a presión constante:

$$\lambda_l = \frac{1}{l_0} * \left( \frac{\Delta l}{\Delta T} \right) = \frac{1}{\Delta T} * \left( \frac{\Delta l}{l_0} \right) \quad (7)$$

De donde puede despejarse  $\frac{\Delta l}{l_0}$ :

$$\left( \frac{\Delta l}{l_0} \right) = \lambda_l * \Delta T \quad (8)$$

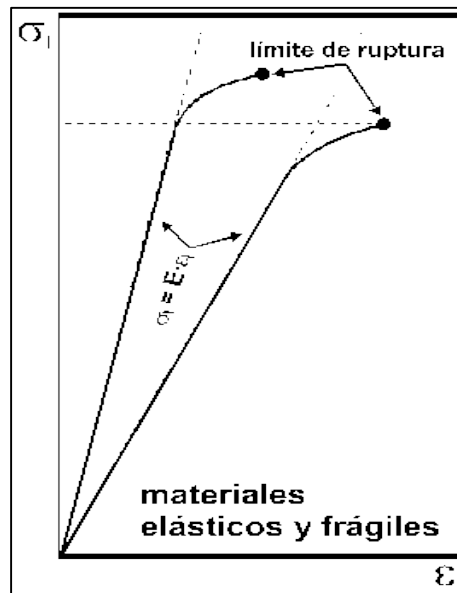
Y sustituirse en la expresión anterior que define  $\sigma_l$ :

$$\sigma_l = E * \varepsilon_l = E * \left( \frac{\Delta l}{l_0} \right) = E * (\lambda * \Delta T) \quad (9)$$

Esta expresión permite calcular el esfuerzo compresivo lineal soportado por un material con módulo de elasticidad E y coeficiente de expansión lineal  $\lambda_l$  para un incremento de temperatura dado, siempre que el material presente un comportamiento mecánico elástico o casi-elástico para la deformación inducida

por tal esfuerzo. Este es el caso de una gran parte de los materiales pétreos en condiciones de presión y temperatura atmosféricas, que son además frágiles (los límites de proporcionalidad, de elasticidad y de ruptura están muy próximos, Figura 5). Para estos materiales, el conocimiento del módulo de elasticidad y de la resistencia a la compresión permite tener una idea bastante aproximada de las curvas esfuerzo-deformación (Figura 5), lo que permite evaluar la respuesta del material ante la acción de esfuerzos compresivos, como los generados por expansiones volumétricas de origen térmico.

Figura 5. Curvas esfuerzo-deformación para materiales elásticos y frágiles.



### 1.3.2 Modelos de microfrazas por expansión térmica<sup>2</sup>.

Brann (1978) desarrollo estudios teóricos y experimentales sobre la formación de microfrazas térmicamente inducidas sobre cuarcita Sioux y granito Westerly a una tasa lenta de calentamiento ( $\leq 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ). Esfuerzos térmicos intergranulares

<sup>2</sup>BRANN, Jhonson. Thermal cracking of rock subjected to slow, uniform temperatura changes. 1978.

se desarrollan en estas rocas y surgen debido a la discrepancia de las dilataciones térmicas de los granos minerales adyacentes (vecinos). Estos esfuerzos dan lugar a microfracturas que se desarrollan preferentemente a lo largo de los bordes de grano y en segundo lugar como microfracturas intragranulares.

### **Consideraciones teóricas.**

Esfuerzos de tensión intragranulares son desarrollados en rocas sometidas a un cambio uniforme de la temperatura. Si estos esfuerzos exceden la resistencia a la fractura, microfracturas intragranulares se desarrollaran. En cualquier región dada de un agregado policristalino, la magnitud y la localización de los esfuerzos de tensión dependen de las formas de los granos y su tamaño, la orientación de los ejes cristalográficos, y el grado de desajuste en las propiedades termoelásticas (a menudo altamente anisotrópicos) de los granos vecinos en ese régimen inminente. El cálculo exacto de estos esfuerzos es tedioso, pero mediante el uso de varios modelos sencillos, se puede determinar sus características generales. Estos modelos demuestran claramente la importancia del desajuste de dilataciones térmicas de granos vecinos y permitir un cálculo de primer orden de magnitudes de los esfuerzos. Por otra parte, los modelos muestran por qué ambos de microfracturamiento (microgrietas) de límite de grano y la intragranular ocurren.

### **Modelo Bicristal.**

Considerando el caso de dos cristales isótropos de diferentes módulos elásticos y coeficientes de expansión térmica, unidos a lo largo de una frontera plana (Figura 6a). Si los dos cristales mantienen el límite común después de un aumento uniforme en la temperatura, a continuación, los esfuerzos intergranulares se desarrollan para limitar las expansiones térmicas diferentes de los dos cristales. El cristal con la mayor expansión no restringida está en compresión, mientras que, con la menor expansión está en tensión paralela a la frontera bicristal. En este

caso el esfuerzo por tensión mayor se produce inmediatamente adyacente a la frontera bicristal y actúa paralelamente a ella y viene dada por (compresión se toma como positivo):

$$\alpha = (\lambda_2 - \lambda_1) * \Delta T * \frac{E_1 * E_2}{(1 - V_2)E_1 + (1 - V_1)E_2} \quad (12)$$

Donde  $\lambda_2 > \lambda_1$ ;  $\Delta T$  es el incremento de temperatura;  $\lambda_2$  y  $\lambda_1$  coeficientes de expansión térmica;  $E_1$  y  $E_2$  módulos de Young y  $V_1$  y  $V_2$  relaciones de Poisson para dos cristales minerales.

Asociar el desarrollo de microfisuras con este desarrollo de esfuerzos de tensión, se utiliza el modelo bicristal para predecir que después del calentamiento microfracturas (grietas) intragranulares se puede desarrollar en el cristal con el menor coeficiente de expansión térmica en un ángulo mayor a la frontera bicristal. Si los dos cristales adyacentes son anisotrópicos, esta predicción sigue siendo esencialmente válida, sin embargo, la magnitud del esfuerzo de tensión depende de las orientaciones relativas de los ejes cristalográficos de los dos cristales y sus orientaciones con respecto a la frontera de grano común. El modelo bicristal da una idea del desarrollo de microfracturas (grietas) intragranulares inducidas térmicamente, pero es de aplicabilidad limitada al desarrollo de las grietas de borde de grano.

### **Modelo de inclusión Esférica.**

En este modelo los esfuerzos normales que actúan perpendicularmente a los bordes de grano pueden causar grietas de límite de grano. Esto es más fácil de demostrar para el caso de una inclusión esférica, inclusión isotrópica incrustada en una matriz infinita isotrópica (Figuras 6b y 6c). Análisis elástico revela que un aumento uniforme de la temperatura, un esfuerzo homogéneo se desarrolla en las inclusiones y es igual a

$$\bar{\sigma} = \frac{2*(\lambda_1 - \lambda_2)*\Delta T*E_1*E_2}{(1+V_2)E_1 + 2(1-2V_1)E_2} \quad (13)$$

Donde 1 y 2 se refiere a la inclusión y matriz respectivamente. Los esfuerzos inducidos en la matriz circundante son (coordenadas esféricas)

$$\sigma_{rr} = \frac{\bar{\sigma}R^3}{r^3}, \sigma_{\phi\phi} = \sigma_{\theta\theta} = \frac{\bar{\sigma}R^3}{2r^3} \quad (14)$$

Donde R es el radio de la inclusión, y r es la distancia radial desde el centro.

Si la expansión térmica sin restricciones de la inclusión es mayor que la de la matriz ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ) microfisuras radiales son propensas a formarse en la matriz adyacente (Figura 6b). En una matriz policristalina, estas grietas radiales se desarrollan preferentemente en los límites de grano orientado a altos ángulos a la interfaz de inclusión de matriz. En contraste, si  $\lambda_1 < \lambda_2$ , microfisuras inducidas térmicamente deben formarse en la interfase (Figura 6c).

### **Modelo policristalino agregado.**

Considerando un agregado monomineral y policristalino se muestra en la figura 6d. Los granos son anisotrópicos, y las direcciones de expansión térmica máxima y mínima se indica mediante las flechas en el centro de cada grano. Por simplicidad, se considera un solo grano, el eje de la expansión térmica máxima está orientada perpendicular a la de todos los granos inmediatamente adyacentes. Esta condición es análogo al modelo esférico-inclusión, pero ahora tanto de inclusión como matriz son anisotrópicos.

La figura 6e muestra expansiones térmicas sin restricciones del centro del grano y las adyacentes inmediatamente después de un aumento de la temperatura uniforme y revela donde ocurre "superposición" y "lagunas". Las limitaciones de los granos para mantener los límites comunes requieren esfuerzos de compresión

que actúan normal a esos límites donde "superposición" se producirían y los esfuerzos de tensión donde "lagunas" pueden surgir.

Probable desarrollo de microfisuras se muestra en la Figura 6f. Grietas de contorno de grano (grain-boundary) (denotado por 1) se forman de manera análoga con las grietas de contorno de grano en el modelo de inclusión para el caso de  $\lambda_1 < \lambda_2$  mientras, esas grietas indicados como (2) corresponden al caso de  $\lambda_1 > \lambda_2$ . Grietas intragranular (3) forma directa por analogía con el modelo bicristal.

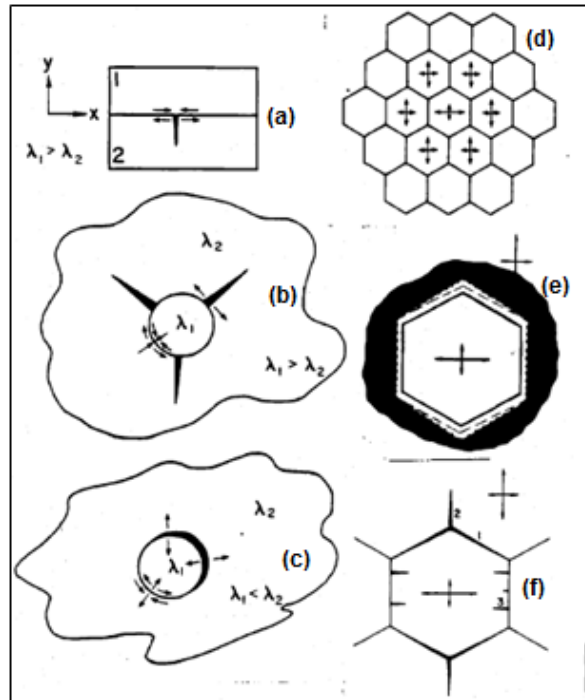
En un agregado monomineral como la Cuarcita, mayor es el desfase cristalográfico de los granos vecinos, mayores son los esfuerzos intergranulares. El máximo esfuerzo de tensión en la Cuarcita está dado aproximadamente por

$$\sigma_{max} = (\lambda_c - \lambda_a) * \Delta T * \left( \frac{E_a E_c}{E_a + E_c} \right) \quad (15)$$

Donde los superíndices a y c son los ejes cristalográficos. Para cuarzo, los coeficientes de expansión térmica (figura 7) y módulo de Young (figura 8) varían notablemente con la temperatura como resultado de la transición cuarzo- $\alpha$  a cuarzo- $\beta$  a 573 °C.

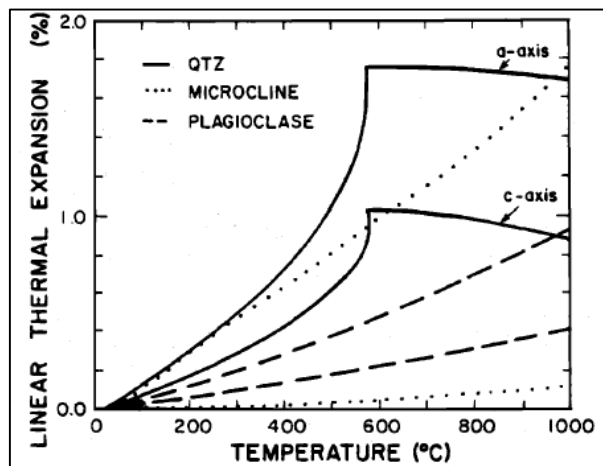
La Figura 9 es un gráfico que representa el comportamiento del modelo policristalino-agregado, la incorporación de estas dependencias de temperatura, muestra como una primera aproximación, la forma funcional del incremento del esfuerzo térmico con la temperatura creciente (se supone que fracturas no se producen).

Figura 6. Modelos de esfuerzos y microfrazuras intergranulares inducidas térmicamente.



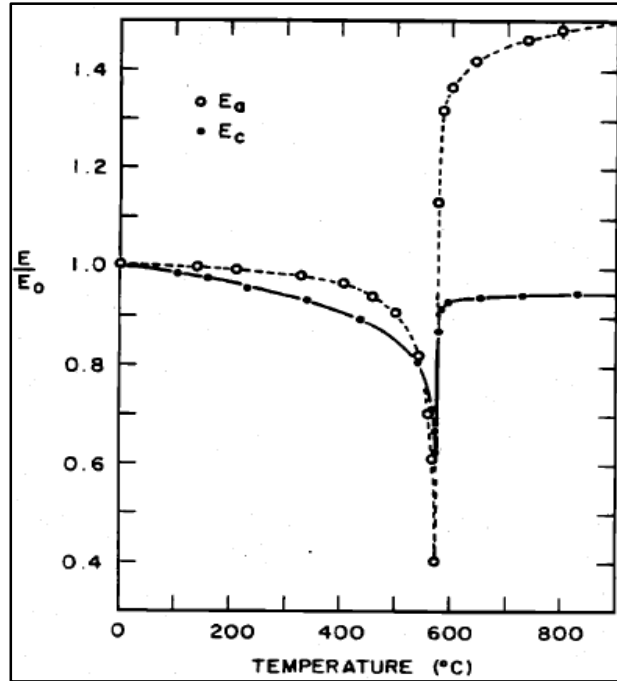
Tomado de: Thermal Cracking of Rock Subjected to Slow, Uniform Temperature Changes. Brann, 1978.

Figura 7. Expansión térmica lineal de cuarzo, microclina y plagioclasa paralelo al eje máximo y mínimo.



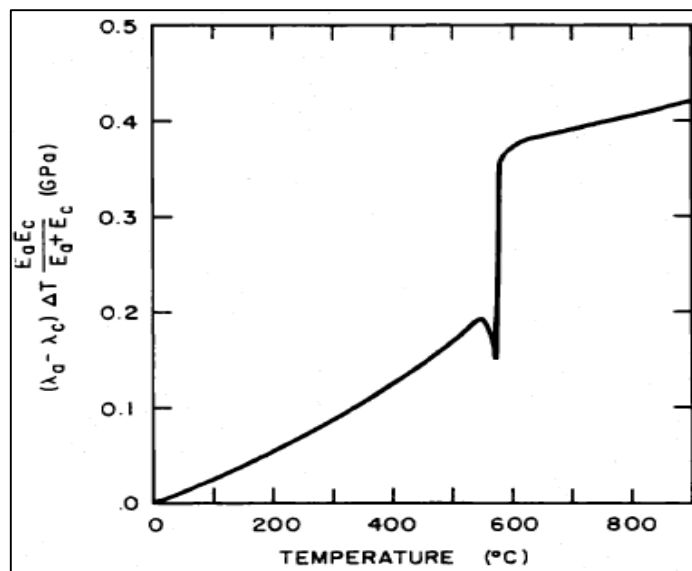
Tomado de: Thermal Cracking of Rock Subjected to Slow, Uniform Temperature Changes. Brann, 1978.

Figura 8. Relación del módulo de Young con la temperatura para el cuarzo paralelo a los ejes cristalográficos a y c.  $E_a = 78$  Gpa y  $E_c = 103$  Gpa.



Tomado de: Thermal Cracking of Rock Subjected to Slow, Uniform Temperature Changes. Brann, 1978.

Figura 9. Variación del esfuerzo intergranular térmico máximo del cuarzo.



Tomado de: Thermal Cracking of Rock Subjected to Slow, Uniform Temperature Changes. Brann, 1978.

### **1.3.3 Modelo de expansión térmica de Turner.**

#### **Efecto del gradiente térmico en la expansión térmica observada.**

La tasa a la que se calienta una muestra afecta a la expansión térmica aparente. Debido a que la muestra es de tamaño finito, un cambio de temperatura en la superficie no es instantánea en todo el volumen de la muestra. Por lo tanto, un gradiente temporal produce un gradiente espacial en la muestra que se pueden producir grietas. Las tasas de calentamiento comúnmente utilizados para las mediciones de expansión térmica de las rocas son demasiado grandes. Por ejemplo, muchos trabajos se ha usado 5 °C/min como la tasa de calentamiento-enfriamiento en sus mediciones de expansión térmica. Otros han utilizado tasas aún más altas entre 20-400 °C. Debido a que las dos tasas mayores de calentamiento generaron un daño grande micro-estructural inmediatamente irreversibles, los coeficientes de expansión térmica determina a partir de las curvas de expansión-contracción en las tres tasas son diferentes.

Todd demostró claramente que simplemente calentar un granito a una velocidad de 5 °C/min causa agrietamiento en muestras con alto contenido de cuarzo y feldespatos que son componentes que generalmente se presentan en gran proporción en las rocas areniscas.

#### **La expansión térmica de las rocas<sup>3</sup>.**

El cambio irreversible que es más probable que ocurra durante la expansión térmica de las rocas es la creación de microgrietas a lo largo de los límites de los granos. Los esfuerzos en los límites de los granos que acompañan al cambio de temperatura producen grietas si el esfuerzo local supera la resistencia local. El

---

<sup>3</sup>RICHTER, Dorothy. Thermal expansion behavior of igneous rocks. 1974.

esfuerzo es causado por la falta de equilibrio (diferencial) en la expansión térmica lineal en los límites de los granos.

El coeficiente de expansión térmica volumétrica ( $\alpha_r$ ) se deriva de los datos de expansión relativa de la expresión:

$$\alpha_r = \frac{3\Delta L}{L_0\Delta T} \quad (16)$$

Donde  $\Delta L$  es el cambio en la longitud de la longitud  $L_0$  inicial, y  $\Delta T$  es el cambio de temperatura desde la temperatura de referencia.

$$\alpha_r = \frac{\sum \alpha_i * K_i * V_i}{\sum K_i * V_i} \quad (17)$$

Donde  $\alpha_i$  es el coeficiente de volumen de la fase  $i$  y  $K_i$ ,  $V_i$  son el módulo volumétrico y fracción de volumen de la fase  $i$ .

Las suposiciones inherentes en la ecuación de Turner son las siguientes: (1) la distribución de las fases es isotrópica, (2) la expansión de las fases es independiente del tamaño y forma de los granos, (3) no se generan perturbaciones internas, y (4) los módulos volumétricos de los componentes son aproximadamente iguales.

## **2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ROCAS.**

El efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de las rocas está tomando importancia en la implementación de procesos de recuperación térmica, los implican una variación de la temperatura in situ, en procesos como inyección de vapor y combustión in situ, por lo cual es importante conocer la respuesta de la roca reservorio en cuanto a sus propiedades mecánicas y el impacto sobre algunas propiedades petrofísicas. Además de estudiar la integridad de la roca sello para evaluar, si los cambios inducidos por el campo térmico afectarán la estabilidad hidráulica, la cual es importante para mantener los fluidos dentro de la roca almacén evitando una caída de presión y un gran impacto sobre la tasa de producción.

El comportamiento mecánico de las rocas depende de su temperatura. Un aumento de la temperatura produce microfisuras en las rocas, dicho fenómeno se observó en las pruebas realizadas en el instituto colombiano del petróleo. Las microfracturas influyen la velocidad de la onda compresional (ondas P) en curvas esfuerzo-deformación y el comportamiento de falla bajo compresión uniaxial. El estudio de la influencia directa de la temperatura mediante la realización de experimentos y los resultados de ensayos de compresión simple realizados a cabo sobre muestras de roca muestran dos aspectos del proceso térmico:

- ✓ El comportamiento mecánico está ligado a las modificaciones generadas por el efecto térmico, en la estructura del material y, posiblemente, algunas de las características de sus minerales.
- ✓ Otro factor importante durante un proceso que implique un aumento de temperatura da origen a esfuerzos térmicos en la roca y son causadas básicamente por la expansión térmica diferencial de los diferentes

minerales que componen la roca (expansión térmica anisotrópica) y la contracción de las partes interiores y exteriores. Una elevación de la temperatura produce una dilatación de los cristales y, en algunos casos cambios mineralógicos. El fenómeno de la dilatación térmica se ha estudiado muy poco en las rocas y los datos publicados han sido a menudo divergentes. La expansión térmica depende de la porosidad inicial, la tasa de aumento la temperatura, la temperatura máxima alcanzada, así como la composición mineralógica y la anisotropía de la estructura de roca.

Wu (2013), Desarrolla una investigación para encontrar el efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de una arenisca como módulos elásticos (Young y Poisson), resistencia, velocidad de las ondas elásticas, cambio de volumen y densidad en un rango de 20 °C a 1200°C en la Figura 10 se presenta unas fotografías donde se evidencia el cambio físico que sufre las muestras en cuanto a volumen, color; y de igual manera para 1200°C se presenta una destrucción de las muestras.

Figura 10. Alteración visual de las muestras durante el calentamiento.



Tomado de: Laboratory Investigation of the Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Sandstone. Wu, 2013.

Dada la importancia del efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas. La literatura muestra que diferentes estudios a nivel experimental han encontrado que las principales propiedades mecánicas afectadas por la temperatura son: resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y tensión, módulos elásticos (Young y Poisson), deformación y velocidad de las ondas elásticas (ondas S y P).

## **2.1 RESISTENCIA Y MÓDULOS ELÁSTICOS.**

### **2.1.1 Resistencia<sup>4</sup>.**

El nivel de esfuerzos bajo el cual una roca falla es denominado resistencia de la roca (strength), dependiendo del tipo del esfuerzo al cual se encuentra la roca sometida se tiene resistencia a la compresión, tensión y cizalla, para tener el concepto es necesario definir primero algunos procedimientos de laboratorio para determinar los diferentes tipos de resistencia.

#### **Prueba de compresión uniaxial.**

La prueba de compresión uniaxial consiste en someter una muestra de roca a un esfuerzo axial ( $S_1$ ) sin esfuerzo radial ( $S_2 = S_3 = 0$ ) hasta que esta falle, a este valor esfuerzo se le denomina es denominado resistencia a la compresión inconfiada (UCS).

A partir de los esfuerzos axiales y las deformaciones axiales y radiales se puede determinar:

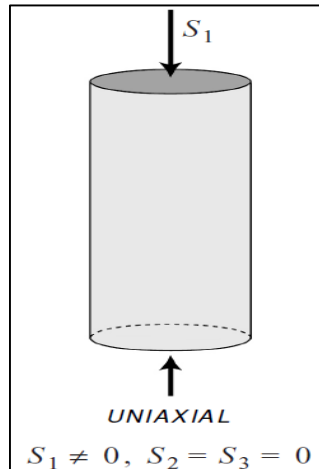
- La resistencia a la compresión inconfiada (UCS)
- Módulo de Young (E)
- Relación de Poisson ( $\nu$ )

---

<sup>4</sup>FJAER. Petroleum related rock mechanics. 2008.

- La curva esfuerzo – deformación para esta prueba es a menudo no lineal, lo cual significa que E y  $\nu$  dependen del nivel de esfuerzo axial. Es común especificar los valores de E y  $\nu$  en el valor de 50% del pico de esfuerzo.

Figura 11. Compresión uniaxial.



Fuente Zoback 2007.

### Prueba de resistencia a la tensión.

Las rocas son mucho más débiles (menos resistentes) en tensión que en compresión.

A pesar de la importancia de la resistencia a la tensión de la roca, en la práctica y su conexión con las teorías de falla, mediciones directas de la resistencia a la tensión son difíciles y por esto las pruebas triaxiales de tensión no son hechas, esto debido a los problemas asociados al agarre de la muestra. Pruebas indirectas (prueba brasilera y resistencia de carga puntual) para determinar la resistencia a la tensión de la roca son más comunes que la prueba de tensión uniaxial.

- PRUEBA BRASILEIRA: También llamada prueba de tensión indirecta, este ensayo mide el esfuerzo a la tensión de la roca y consiste en la compresión en el punto de soporte de una muestra cilíndrica. Con esta prueba se halla la resistencia a la tensión inducida ( $T_0$ ). Asumiendo que la roca es

homogénea e isotrópica y que la elasticidad lineal se mantiene, la fractura primaria empezará en tensión desde el centro de la muestra.

$$T_o = 0,636 * \frac{F_c}{D*L} \quad (18)$$

Donde,  $F_c$  es el pico de carga en N (newton), D diámetro muestra (mm) y L longitud muestra (mm).

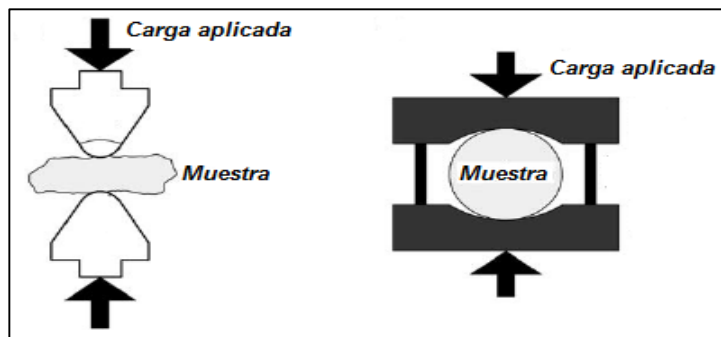
- RESISTENCIA DE CARGA PUNTUAL: Es una prueba donde se aplica carga a una muestra en sentido diametral hasta alcanzar la fractura del material. El ensayo determina el índice de resistencia  $I_s$  en muestras de roca que requieren de poca preparación y que pueden tener formas regulares o irregulares.

$$I_s = \frac{F_c}{D_e^2} \quad (19)$$

Donde  $F_c$  es la carga necesaria para causar la falla, de diámetro equivalente de la muestra. A partir del índice de resistencia puntual puede ser usado indirectamente por medio de:

$$I_s = 0,8 * T_o \quad (20)$$

Figura 12. Carga puntual y prueba brasilera.



Fuente Fjaer 2008.

### **2.1.2 Módulos elásticos<sup>5</sup>.**

La mayoría de las rocas tienen un comportamiento no lineal cuando están sujetas a grandes esfuerzos, pero su comportamiento puede ser descrito normalmente por relaciones lineales para cambios en los esfuerzos suficientemente pequeños.

#### **Módulo de Young.**

Módulo de Young es el módulo de elasticidad que representa la rigidez de una roca. Se define como la relación, para pequeñas deformaciones, de la tasa de cambio del esfuerzo con la deformación. Este módulo mide la rigidez del material y puede ser determinado experimentalmente a partir de la pendiente de una curva de esfuerzo-deformación obtenida durante las pruebas de compresión o de tensión realizados sobre una muestra de roca. Similar a la resistencia, el módulo de Young varía ampliamente con el tipo de roca.

#### **Relación de poisson.**

La relación de Poisson es la relación de deformación lateral (radial) y la deformación axial, en la región lineal-elástica. Para la mayoría de las rocas, la relación de Poisson está entre 0,15 y 0,4.

### **2.1.3 Efecto de la temperatura en la resistencia y módulos elásticos.**

El papel de la temperatura en el comportamiento mecánico de las rocas depende de su naturaleza mineralógica y estructura (textura y discontinuidades). Las variaciones de temperatura pueden afectar a la composición mineralógica y la red de los granos de la roca. Los cambios estructurales se relacionan principalmente con la modificación de las discontinuidades (microfracturas y poros).

---

<sup>5</sup>FJAER. Petroleum related rock mechanics. 2008.

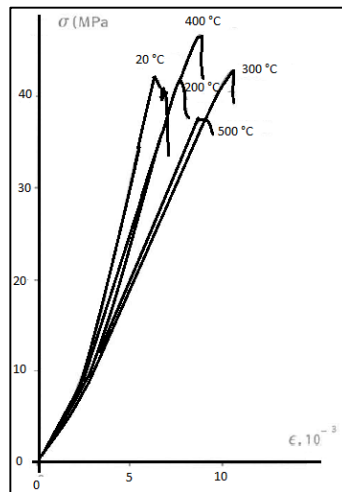
Los materiales formados de cristales con fuerte anisotropía de expansión térmica (en el caso de calcita mármol, cuarzo, feldespato en los granitos y areniscas con alto contenido de cuarzo) o dimensiones de cristal o de diferente naturaleza mineralógica (caso de las rocas textura heterogénea), un aumento de la temperatura produce un cambio diferencial en el tamaño y el volumen de los minerales, así como defectos en los cristales. Estas diferencias de dilatación de los granos en la roca dan lugar a la formación de microfisuras y la intensidad de este aumenta con la temperatura.

A continuación se presentaran unas investigaciones realizados a nivel experimental, en las cuales se estudian las propiedades mecánicas mencionadas anteriormente.

En el estudio realizado por Houpert y Homand-Etienne (1980), el comportamiento de la roca arenisca Vosges (Figura. 13) es completamente diferente de las otras rocas, en el sentido de que la resistencia última no disminuye regularmente con la temperatura, tiende a aumentar para algunas temperaturas, aunque la dispersión de la resistencia no permite evaluar con certeza el comportamiento de la resistencia de la roca por la variación del perfil esfuerzo-deformación. Este comportamiento particular puede ser explicado por la estructura de la roca. La roca arenisca es muy porosa y presenta desigual expansión térmica de los granos individuales, pero un material más compacto y por tanto más resistente.

Houpert y Homand-Etienne (1980), compararon la roca arenisca Vosges y la caliza Euville, que también tiene una alta porosidad, encuentran que la resistencia de este último disminuye con la temperatura. Sin embargo, dos posibles razones para la causa de esta diferencia de comportamiento entre arenisca y caliza. Por un lado, la calcita es más sensible a las variaciones de temperatura que el cuarzo, y en segundo lugar, el tamaño de granos de calcita es mayor que el de los granos de cuarzo, lo que conduce a diferencias en las variaciones en expansión de los granos de las rocas entre sí

Figura 13. Esfuerzo- deformación para una arenisca.



Tomado de: Comportement en fonction mécanique des roches de la température. Houpert y Homand-Etienne, 1980.

Hettema et al. (1991) realizó pruebas triaxiales sobre areniscas que contienen una gran variedad de minerales de silicato incluyendo arcillas (illita, caolinita y clorita) que son más representativas de las rocas de yacimientos que las areniscas ricas en cuarzo para investigar el efecto de la temperatura entre 150°C y 250°C y comportamiento geomecánico. Para el rango de la temperatura de estudio y diferentes esfuerzos. El estudio demostró que la deformación depende de la temperatura de igual manera del estado de esfuerzos y concluyen que para grandes esfuerzos y altas temperaturas se presentará creep (tendencia de un material sólido a moverse lentamente o deformarse permanentemente bajo la influencia de esfuerzos).

En investigaciones experimentales más recientes se han observado los siguientes comportamientos.

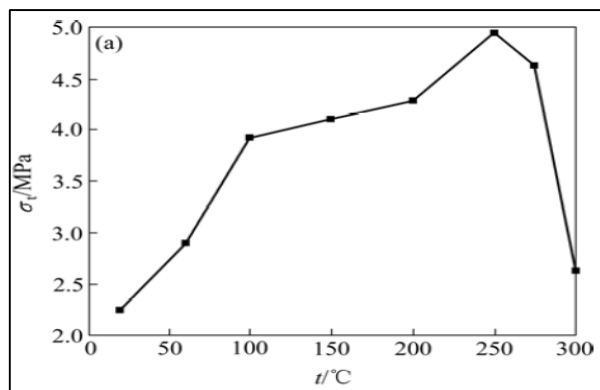
RAO Qiu-hua, WANG Zhi and et al. (2007) investigaron el efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de la roca a través de la pruebas brasilera, compresión axial para determinar la resistencia a la tensión  $\sigma_t$ , resistencia a la compresión uniaxial  $\sigma_c$ , módulo elástico E (Módulo de Young) de areniscas a altas

temperaturas. La investigación mostró una tendencia donde ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$ ,  $E$ ) incrementan linealmente con aumentos de temperatura hasta 200°C o 250°C y disminuye para temperaturas superiores.

El comportamiento de la resistencia a la tensión ( $\sigma_t$ ) observada en los resultados determinados de la prueba brasilera para temperaturas hasta los 300°C Figura 14, RAO Qiu-hua encontró para una arenisca, que  $\sigma_t$  aumenta hasta los 250°C pero para temperaturas mayores disminuye. Mediante una regresión lineal para  $T < 250^\circ\text{C}$  encontró una correlación que se ajusta al comportamiento de la roca.

$$\sigma_t = 0.0109 T + 2.322.$$

Figura 14. . Resistencia a la tensión.



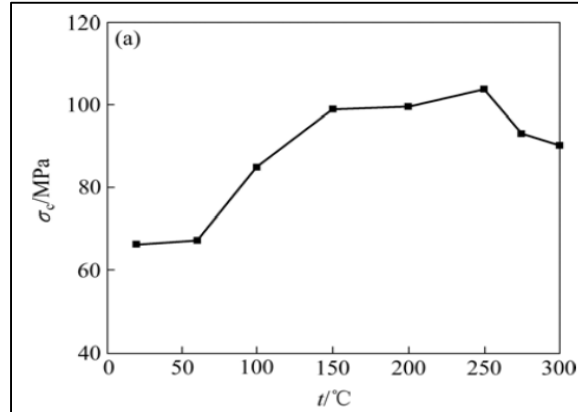
Tomado de: Experimental study of mechanical properties of sandstone at high temperature. RAO Qiu-hua, WANG Zhi, 2007.

En cuanto la resistencia a la compresión uniaxial ( $\sigma_c$ ) (Figura 15) y el módulo de Young (Figura 16) encontró la misma tendencia, en la cual las dos propiedades aumentan hasta los 250 °C y luego disminuye. La correlación que se ajusta al comportamiento de la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de Young ( $E$ ) obtenidos por este investigador son:

$$\sigma_c = 0.1819 T + 63.138,$$

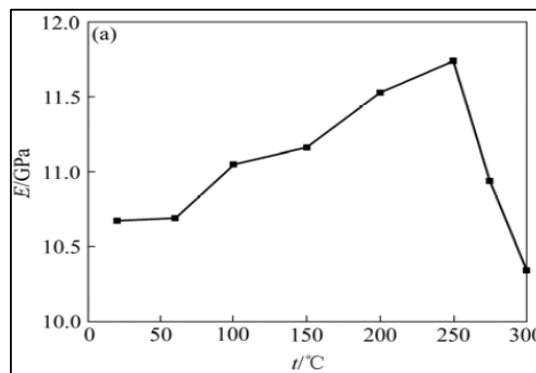
$$E = 0.0049 T + 10.498$$

Figura 15. Resistencia a la compresión.



Tomado de: Experimental study of mechanical properties of sandstone at high temperature. RAO Qiu-hua, WANG Zhi, 2007.

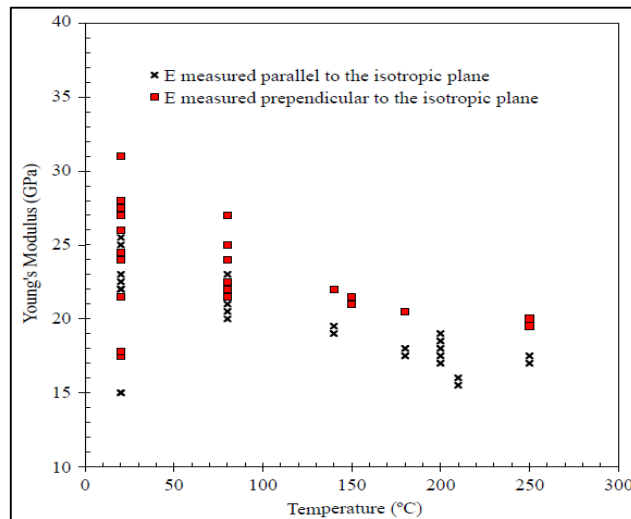
Figura 16. Módulo de Young.



Tomado de: Experimental study of mechanical properties of sandstone at high temperature. RAO Qiu-hua, WANG Zhi, 2007.

Meibner et al. (1999) investigaron el comportamiento esfuerzo-deformación y la dependencia de la temperatura, la arenisca estudiada era una roca consolidada con gran contenido de cuarzo. Las condiciones máximas trabajadas de temperatura fueron de 250°C y 60Mpa. Observaron que se presentaba una disminución en el módulo de Young significativamente para temperaturas altas (>50°C) de hasta un 50% del valor inicial a temperatura ambiente para la muestra de arenisca y granito estudiadas Figura 17.

Figura 17. Módulo de Young paralelo y perpendicular al plano isotrópico.



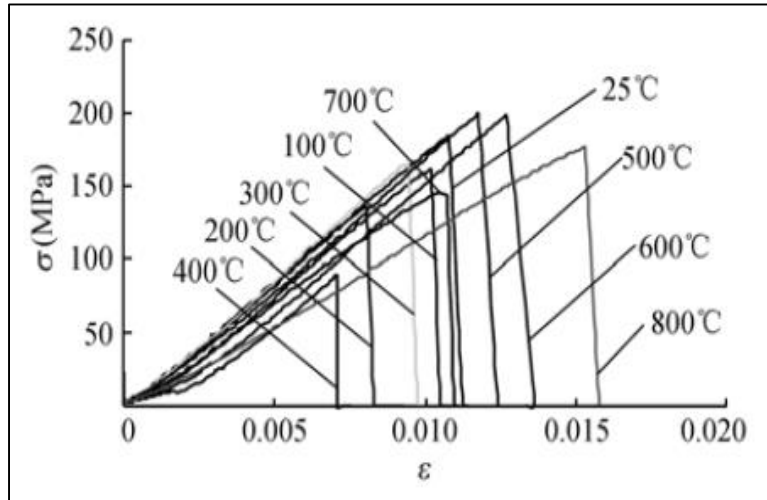
Tomado de: Geomechanics of thermal viscous oil production in sandstones. Meibner, 1999.

Zhang et al. (2009) estudió las propiedades geomecánicas de algunas rocas como las areniscas a temperaturas entre 25°C a 800°C y encontraron que el pico de resistencia y módulo elástico para el rango de temperatura no tiene una tendencia definida que se observa en la Figura 18, que hay una disminución de la resistencia en el rango de 25°C a 400°C, además para 600°C y 700°C aumenta y posteriormente vuelve a disminuir haciendo evidente que no hay un comportamiento definido de la variación de la resistencia con el aumento de temperatura. El módulo de Young tiene una tendencia constante hasta los 500 °C y a temperaturas mayores a estas disminuye.

Zhang encontró para los tipos de rocas estudiadas un comportamiento similar cuando  $T < 600^\circ\text{C}$  en el comportamiento esfuerzo-deformación observado en las gráficas, mostrando inicialmente una fase de compresión, deformación elástica y la falla se alcanza poniendo en evidencia un comportamiento frágil del material para bajas temperaturas. Para la limolita a  $T > 600^\circ\text{C}$  se presenta un comportamiento plástico figura 19, es decir la roca alcanza una deformación permanente (irreversible) y para bajas temperaturas el comportamiento es frágil (la capacidad de la muestra para soportar el esfuerzo disminuye rápidamente a medida que la deformación aumenta, alcanza la falla de forma rápida). Las

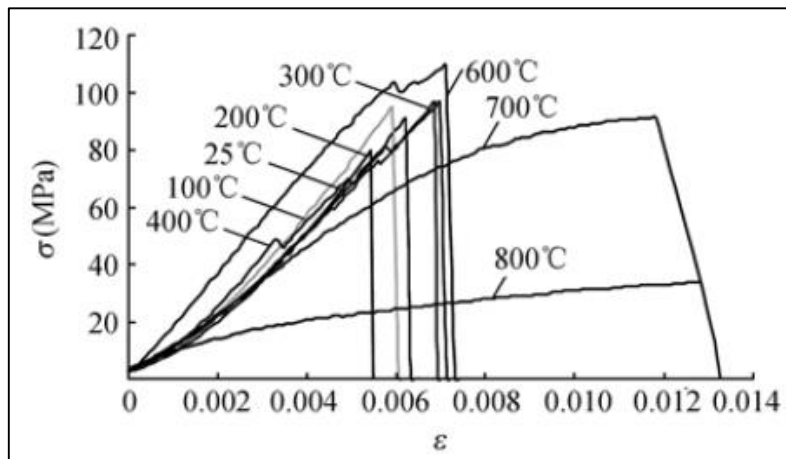
areniscas presentan una fase de compresión causando un fortalecimiento en la roca para altas temperaturas (figura 19).

Figura 18. Esfuerzo-deformación axial de una arenisca.



Tomado de: Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. Zhang, 2009.

Figura 19. esfuerzo-deformación axial de una limolita.

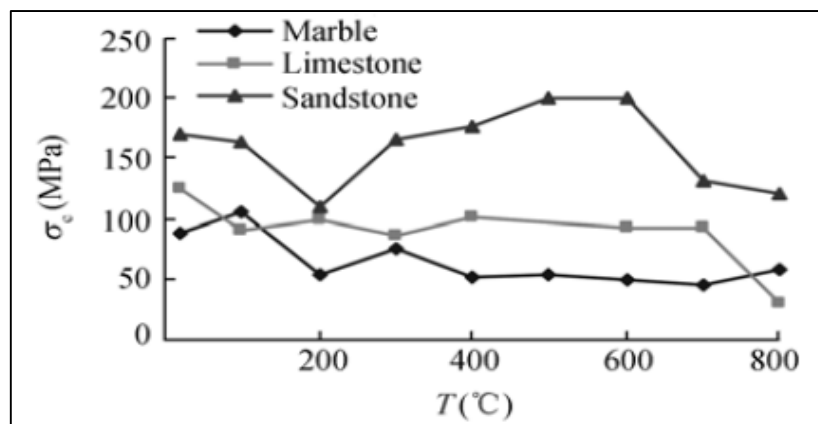


Tomado de: Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. Zhang, 2009.

El pico de resistencia de la limolita (Figura 20) muestra una tendencia de disminución de 120 MPa a 90 Mpa, evidenciando una disminución del 25% desde la temperatura ambiente a 100°C y de 100°C a 700°C el cambio es pequeño. Esto significa que para temperaturas menores a 700°C la roca se expande por el calentamiento y aparecen esfuerzos térmicos en la estructura de la roca causando una pequeña disminución de la resistencia a la compresión, como resultado de la aparición de micro-fracturas. Pero para temperaturas mayores la resistencia a la compresión disminuye debido a que los esfuerzos térmicos exceden la resistencia y el proceso de micro-fracturación es irreversible e inevitable, observándose una disminución de alrededor del 70%.

En cuanto la arenisca hay una variación de la resistencia con el aumento de la temperatura (Figura 20). Hay una disminución de la resistencia de 170 Mpa a 110 MPa debido principalmente a la deformación irregular de los minerales por la expansión térmica diferencial, a  $T > 200^\circ\text{C}$  la expansión diferencial hace que microfisuras en la muestra se cierren compactando la roca. A temperaturas superiores a  $600^\circ\text{C}$  se puede ver como la resistencia disminuye cerca del 40% y por la aparición de microfisuras por la expansión de los granos y por la pérdida del material cementante que se degrada.

Figura 20. Variación del pico de resistencia con la temperatura.

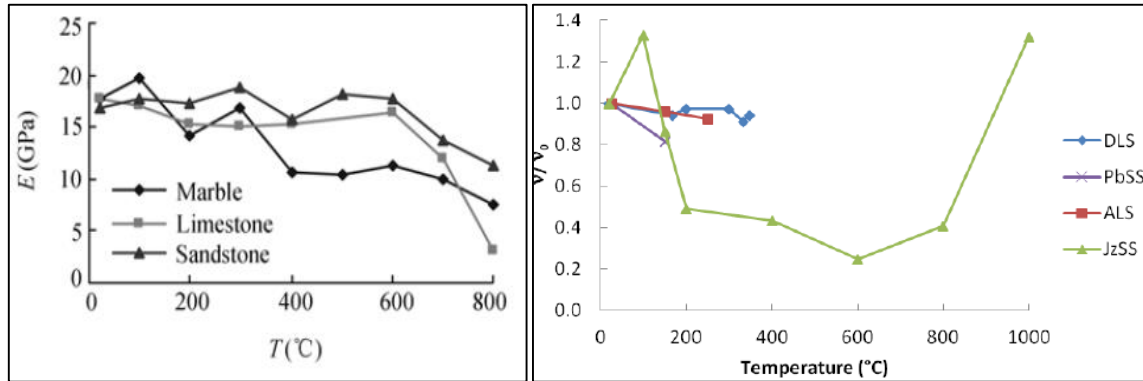


Tomado de: Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. Zhang, 2009.

El comportamiento del módulo de Young para la limolita a  $T < 600^{\circ}\text{C}$  tiende a un valor constante dejando ver una variación mínima de este, pero a temperaturas mayores la disminución es cerca del 80% presentando un comportamiento similar a la resistencia a la compresión y es porque a estas temperaturas se causa un cambio en la estructura interna de la limolita principalmente en el material cementante. En cuanto a la arenisca al igual que la resistencia tiene una variación en el módulo a  $T < 600^{\circ}\text{C}$  y al igual que la limolita para temperaturas mayores el módulo disminuye un 35%. Basado en esto Zhang propone que entre 500 y 600  $^{\circ}\text{C}$  se puede tomar como una temperatura crítica, debido a la gran variación de las propiedades por cambios internos en la estructura de la roca. Esto se puede observar en la figura 21 a).

En cuanto al estudio de la relación de Poisson no ha sido muy investigado y por tal motivo la información en la literatura es muy limitada. En la figura 21 b), se pueden observar resultado de areniscas (SS) y limolitas (LS) realizada por Hong Tian (2013), en la cual se ve que la relación de Poisson disminuye durante el calentamiento.

Figura 21. a) Variación del módulo de Young con la temperatura. Tomado de: Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. 2009. b) Relación de Poisson antes (under) y después (after) del tratamiento térmico.



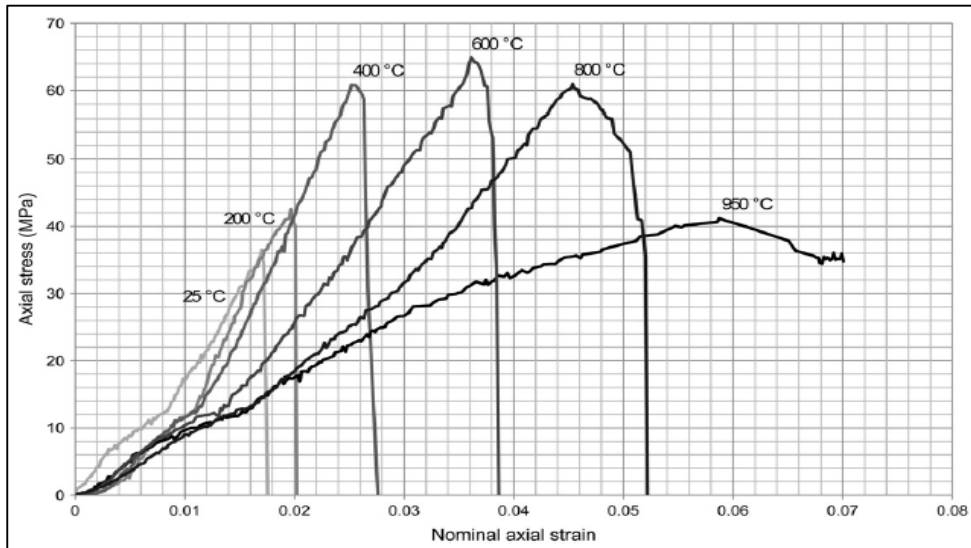
a)

b)

Tomado de: a) Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. b) Development of a Thermo-Mechanical Model for Rocks Exposed to High Temperatures during Underground Coal Gasification. Hong Tian, 2013.

Ranjit (2012) desarrollo pruebas de compresión uniaxial en areniscas en un rango de temperaturas entre 25 a 900°C para investigar la respuesta mecánica, encontrando que hasta temperaturas de 500 °C la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de Young aumentaba y disminuyen para temperaturas mayores a esta. Además encontró que ocurren cambios mineralógicos inducidos por las altas temperaturas en el material cementante. Una deshidroxilación de la caolinita en las areniscas generando un debilitamiento de la estructura de la muestra para  $T > 500^{\circ}\text{C}$ . De la figura 22 también se puede ver que la muestra presentaba un comportamiento frágil a bajas temperaturas en las cuales para el estado de esfuerzo al cual se encontraba sometida solo lograba pequeñas deformaciones antes de fallar y para temperaturas mayores se observa una mayor deformación antes de la falla, es decir ocurre un endurecimiento (fortalecimiento) de la muestra. Además se puede observar que la máxima resistencia se alcanza a los 600°C, ahora cuanto al módulo elástico (Young) presentó un aumento hasta los 400°C con un valor máximo de 3,7 GPa (3700MPa ó 536639 psi).

Figura 22. Esfuerzo axial Vs deformación axial a diferentes temperaturas.



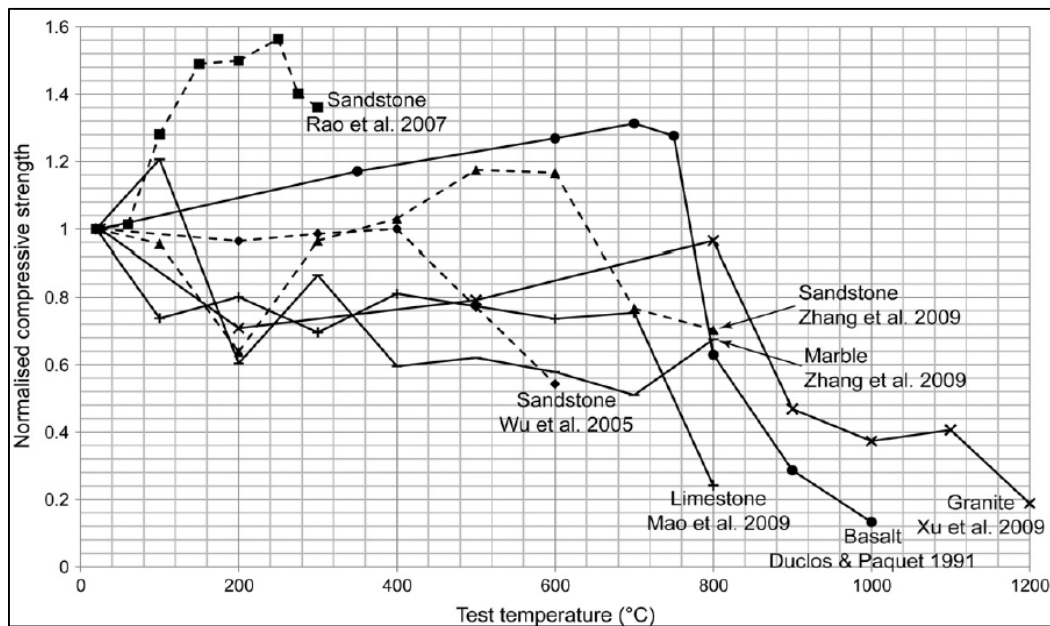
Tomado de: Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behavior of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure. Ranjit, 2012.

Para concluir con el análisis de la resistencia de la roca se pudo ver que no es claro el comportamiento de dicha propiedad mecánica de las rocas cuando son sometidas a un aumento de temperatura (Figura 23), y de igual manera cual es la causa por la cual los diferentes investigadores encuentran en sus trabajos desarrollados tendencias muy diferentes aun cuando se realizaron sobre areniscas, las posibles explicaciones se basan en la composición de las diferentes rocas y de las propiedades de sus granos como la expansión térmica.

Ahora en cuanto al módulo elástico (Young) de acuerdo a los últimas investigaciones realizadas este tiende a aumentar con el aumento de la temperatura, para algunos investigadores hasta los 250°C y otros hasta los 400°C (Figura 24), se presentará datos obtenidos por diferentes investigadores donde se ilustra la diferencia en los resultados obtenidos para areniscas. También otros factores que pueden influir en el comportamiento de las rocas de la misma litología es las características geológicas como tamaño granos, el grado de compactación, la presión de confinamiento.

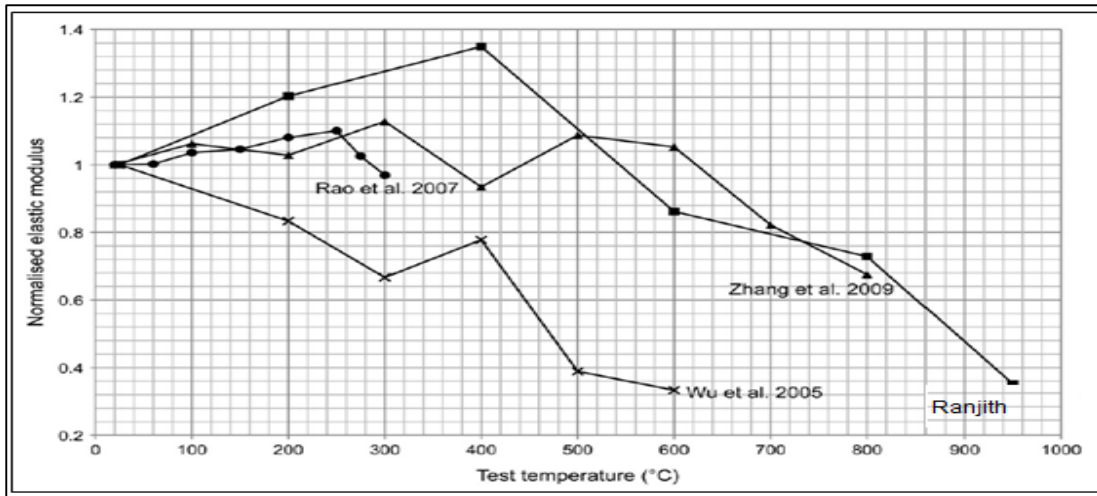
Es claro que para determinar una tendencia de comportamiento de las diferentes litologías es necesario realizar una investigación amplia a nivel experimental en la cual se haga un análisis de sensibilidad de los diferentes parametros influyen en la respuesta de la roca ante un proceso de calentamiento, como lo son temperatura inicial de la muestra, saturación, presión de sobrecarga, tamaño de grano, la compactación de la roca, grado de cementación, etc.

Figura 23. Resistencia a la compresión normalizada Vs la temperatura para experimentos UCS reportados en la literatura.



Tomado de: Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behavior of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure. Ranjit, 2012.

Figura 24. Módulo elástico normalizado Vs la temperatura para experimentos UCS reportados en la literatura.



Tomado de: Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behavior of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure. Ranjith, 2012.

## 2.2 DEFORMACIÓN.

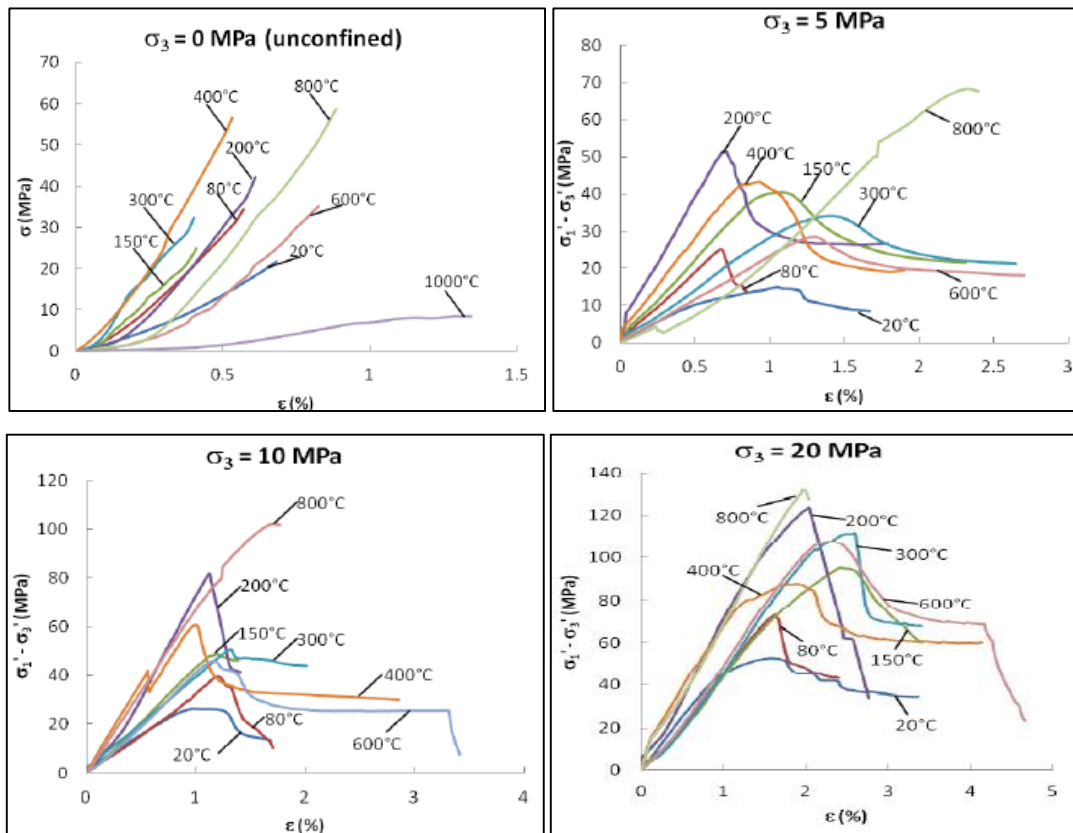
La deformación es el cambio en la forma de un cuerpo (extensión o compresión) que resulta de la aplicación de una fuerza externa, es decir hay un desplazamiento de las partículas que componen el cuerpo. Cuando el desplazamiento de todas las partículas es igual se dice que ocurre una deformación de cuerpo rígido, de lo contrario se dice que ocurre una rotación de cuerpo rígido.

Hong Tian, estudió la relación esfuerzo-deformación para muestras de rocas sedimentarias a diferentes temperaturas y presiones de confinamiento. Para las muestras estudiadas dividió el comportamiento en cuatro etapas: compresión inicial, elasticidad lineal, periodo de debilitamiento y posteriormente la falla. En la compresión inicial, las microfisuras de las muestras se cerrarán por los esfuerzos térmicos generados, los esfuerzos térmicos aumentarán lentamente mientras que la deformación en la muestra incrementará rápidamente, por lo cual las gráficas mostrarán una concavidad hacia arriba. Estas etapas solo pueden

verse para pruebas de compresión no confinada ( $\sigma_3 = 0$ ) pero no bajo condiciones de compresión confinada.

La etapa posterior es elástica lineal que termina en el pico máximo de esfuerzo. En esta etapa la relación entre esfuerzos y deformación es aproximadamente lineal, y el módulo de Young es constante. Luego se presenta el debilitamiento donde los esfuerzos disminuyen con el incremento de la deformación, mostrando el comportamiento de debilitamiento de la muestra. La última etapa de falla, dos comportamientos se observaron una falla repentina que se presentó para condiciones de 800°C y la más común el comportamiento esfuerzo residual después de la fractura. Se puede concluir que la posibilidad de fracturar las muestras disminuye con el aumento de la presión de confinamiento.

Figura 25. Comportamiento esfuerzo-deformación para diferentes temperaturas.



Tomado de: Development of a Thermo-Mechanical Model for Rocks Exposed to High Temperatures during Underground Coal Gasification. TIAN Hong,2013.

Ahora al tener en cuenta los resultados de otras investigaciones llevadas a cabo (Figura 23) se puede ver que la resistencia no presenta una tendencia clara puesto que para unos aumenta, disminuye o permanece constante incluso para la misma litología. Es claro que es necesario realizar una caracterización a nivel de laboratorio para diferentes litologías y con muestras en diferentes condiciones, con el objetivo de encontrar tendencias claras.

Para evidenciar la diferencia de la forma de presentarse la fractura macroscópica de las muestras en pruebas de compresión no confinada y una triaxial, se presenta en la figura 26, en la cual se puede ver que la muestra presenta múltiples fallas cuando el esfuerzo de confinamiento es cero, la muestra queda totalmente destruida por lo que no hay una restricción lateral a la deformación. Por el contrario en la prueba triaxial la restricción lateral hace que en la muestra se presente solo un plano de falla.

Figura 26. Macrofracturas de pruebas no confinadas y confinadas.



Tomado de: Development of a Thermo-Mechanical Model for Rocks Exposed to High Temperatures during Underground Coal Gasification. TIAN Hong, 2013.

## 2.3ONDAS ELÁSTICAS.

Las ondas elásticas son perturbaciones mecánicas que se propagan a través de un cuerpo y estas se propagan en las rocas con una velocidad que es dada por las rigideces elásticas y la densidad de la roca. Estos parámetros dependen de otros parámetros como la porosidad, la cual es afectada por las altas temperaturas.

- Las ondas P compresionales (longitudinales) son las que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio.  
Ésta es la más veloz de todas las ondas sísmicas y por lo tanto, es la primera en llegar a cualquier punto, en ser sentida y en ser registrada en los sismogramas, por lo que se llamó onda Primaria.
- ONDAS S. Las ondas de corte o de cizalla, llamadas ondas S, son aquéllas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, por lo que están asociadas con deformaciones de tipo de cizalla.

La respuesta elástica de un material poroso es afectada por la presencia de un fluido en los poros. En los sedimentos pobremente consolidados, la velocidad de la onda P para un material saturado de agua puede ser varias veces mayor de lo que es cuando el material está seco. Cualitativamente, podemos explicar esto como una consecuencia de la mayor resistencia contra la compresión proporcionada por el fluido de los poros. Para materiales más competentes, o materiales bajo alta presión de confinamiento, la rigidez es más alta y la contribución del fluido de los poros es relativamente menor, por lo tanto, el efecto de la saturación es mucho más pequeño. La saturación se supone que no afectará al módulo de cizallamiento para una roca permeable, por lo que por lo general da lugar a una pequeña disminución en la velocidad de las ondas S. Claramente, el

impacto del fluido de los poros en las velocidades está fuertemente relacionado con la porosidad de la roca. También es importante resaltar que los módulos elásticos como Young, Poisson y volumétrico pueden ser expresados en términos de las velocidades de las ondas P y S (módulos dinámicos).

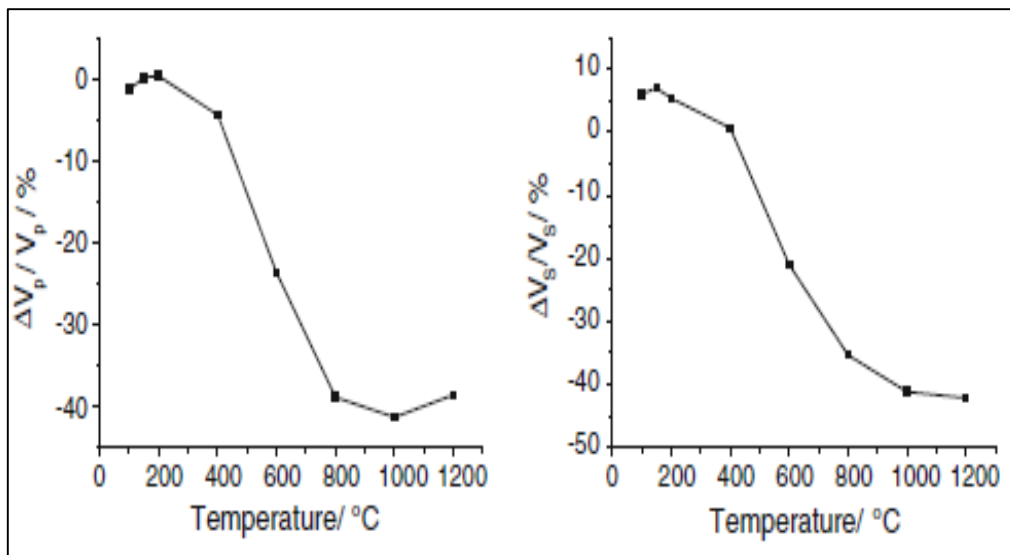
Somerton, el Shaarani y Mobarak (1974). Estudiaron el comportamiento de la compresibilidad total, de la compresibilidad de la matriz y la velocidad de las ondas de compresión (P) en muestras de areniscas de limolitas extraídas de formación imperial valley en California. Los ensayos fueron conducidos a temperaturas entre 20 y 220°C y con presión efectiva de 110 MPa y en muestras secas y saturadas con solución de KCl o aceite. Los resultados mostraron que la velocidad de las ondas P aumenta con el esfuerzo efectivo y disminuye con la temperatura y la saturación de líquido. La magnitud de efectos varía de una muestra para otra. El efecto más pronunciado de presión, temperatura y saturación de líquido sobre la velocidad de ondas P en areniscas bandera, fue justificado como una consecuencia de concentración de calcita y por tratarse de una roca de granulometría muy fina. Los efectos de temperatura fueron más notables en muestras saturadas con aceite y estaba en el intervalo del 15%. Para presiones esta variable tiene poca influencia sobre la velocidad. La arenisca boise, por tener granulometría más gruesa mostró menor efecto de las variaciones sobre la velocidad de las ondas P. Otro detalle observado fue el hecho de que esta muestra presenta los más bajos niveles de velocidad. Las muestras de prueba de imperial valley fueron tomadas de 3 profundidades distintas. Las muestras de profundidades menores a 732 m y con granulometría más fina se vieron muy afectadas por la presión y la temperatura. Las muestras de prueba obtenidos a profundidades mayores a 1543 m mostraron menor efecto de temperatura.

Un aumento de presión lleva a un aumento en la velocidad de las ondas S y P y que la elevación de la temperatura lleva a una reducción de la velocidad de estas de ondas en las rocas. Una reducción de la velocidad cerca del 12% con una

variación de la temperatura en 27°C a 200°C también fue observada por Hugles y Cross.

Wu (2013) realizó un estudio experimental sobre areniscas para investigar las propiedades físico-mecánicas a altas temperaturas, el rango de temperaturas manejadas fue de 20 a 1200°C. Analizando el cambio en la velocidad de las ondas longitudinales (P) y transversales (S) y determinar el efecto de la temperatura sobre esta. Los resultados obtenidos pone en evidencia que la velocidad de las ondas hasta los 200°C presenta pequeños cambios que no son significativos pero para temperaturas superiores la reducción de la velocidad de las ondas fue significativo. La importancia de la velocidad de las ondas radica en la relación entre deformación por compresión y la deformación por cizalla, así como la relación entre los módulos elásticos dinámicos que pueden ser determinados a través de ellas.

Figura 27. Velocidad de las ondas P y S a diferentes temperaturas.



Tomado de: "Laboratory Investigation of the Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Sandstone". Wu, 2013.

## **2.4 EFECTO TÉRMICO REFLEJADO EN CRITERIOS DE FALLA<sup>6</sup>.**

### **2.4.1 Análisis de datos triaxiales.**

La variación de las propiedades mecánicas de las rocas se reflejara en el comportamiento de los criterios de falla de las muestras cuando son sometidas a procesos de calentamiento que afecta la estructura interna por los esfuerzos térmicos que se inducen debido a la expansión térmica de los minerales que constituyen la roca, cambios mineralógicos, afectación de la resistencia de la roca, expansión térmica de los fluidos que saturan la muestra y además la generación de microfracturas.

Para verificar el comportamiento de los criterios de fallas de muestras sometidas a diferentes temperaturas en laboratorio se realizara el análisis con datos obtenidos de la búsqueda bibliográfica de una tesis de doctorado titulada “Development of a Thermo-Mechanical Model for Rocks Exposed to High Temperatures during Underground Coal Gasification” del 2013 de la universidad Rheinisch-Westfälischen de Alemania realizada por el Doctor Hong Tian.

Las variaciones de las propiedades mecánicas de las rocas y los resultados obtenidos en laboratorio muestran que el comportamiento de la roca a temperatura ambiente (20°C) difiere para altas temperaturas. Para observar el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de la roca y la distribución de los esfuerzos, es esencial disponer de un criterio de falla que modele y prediga la resistencia de la roca y su respuesta a un estado de esfuerzos y un nivel de temperatura. Un criterio de falla es una relación entre los componentes de esfuerzos, parámetros de endurecimiento y temperatura. Los criterios de falla que se revisan serán Mohr Coulomb y Hoek Bronw.

---

<sup>6</sup>Development of a Thermo-Mechanical Model for Rocks Exposed to High Temperatures during Underground Coal Gasification. TIAN Hong, 2013.

A continuación se presenta la tabla 1, la cual contiene los datos de laboratorio tomados de la tesis doctoral (TIAN Hong, 2013) los cuales se usaran para la construcción de las envolventes de falla.

Tabla 1 Datos de una prueba triaxial.

20°C		80°C		150°C		200°C	
$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_1$ (psi)	$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_1$ (psi)	$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_1$ (psi)	$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_1$ (psi)
0	2499,8	0	3234,95	0	3787,4	0	5778,25
723,55	3039,2	717,75	4574,75	725	5452	723,55	8143,2
1448,55	5778,25	1442,75	7714	1448,55	8131,6	1450	13808,35
2173,55	7845,95	2173,55	11333,2	2173,55	10432,75	2175	16167,5
2898,55	10274,7	2892,75	13790,95	2898,55	13792,4	2897,1	21507,85

300°C		400°C		600°C		800°C	
$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_1$ (psi)	$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_1$ (psi)	$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_1$ (psi)	$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_1$ (psi)
0	4558,8	0	4338,4	0	1738,55	0	8353,45
725	6126,25	723,55	6962,9	1448,55	6211,8	723,55	9910,75
1450	10396,5	1450	9606,25	1690,7	8279,5	1450	14858,15
2173,55	14399,95	2175	11153,4	1925,6	10464,7	2173,55	17095,5
2898,55	17894,45	2898,55	14858,15	2173,55	10084,8	2900	19093,6

Development of a Thermo-Mechanical Model for Rocks Exposed to High Temperatures during Underground Coal Gasification. TIAN Hong, 2013.

### **Criterio de falla de Mohr Coulomb<sup>7</sup>.**

Según la teoría de Coulomb las rocas al fallar por cizalla se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión. Este es un modelo que solo usa el esfuerzo efectivo máximo y el esfuerzo efectivo mínimo (representados en el esfuerzo normal y de corte con respecto al plano de falla) para predecir la falla. El modelo de Mohr-Coulomb muestra como la resistencia de la roca a la cizalla se incrementa en la medida que el esfuerzo compresivo efectivo aumenta.

<sup>7</sup>FJAER. Petroleum related rock mechanics. 2008.

El criterio de falla de Mohr Coulomb, se basa en la suposición que  $f(\sigma')$  es una función lineal de  $\sigma'$ . (Fjaer 2008).

$$|\tau| = S_0 + \mu\sigma' \quad (21)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción interna,  $S_0$  es la cohesión, el cual es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de la formación y se utiliza para representar la resistencia al corte producido por la cementación.

Al graficar la ecuación (21) se formará una línea de fractura, donde se define una región de estabilidad en la cual la configuración de esfuerzos en el material no permite que ocurra fallamiento. Donde  $\mu$  es la pendiente de la línea recta y es definida por  $\tan\varphi = \mu$  y  $S_0$  es el punto de corte con la ordenada  $\tau$  como se puede observar en la figura 30. Además se muestra el ángulo  $2\beta$  el cual da la posición del punto de coincidencia del círculo de Mohr y la línea de falla.

Se puede observar en la figura 30 que el esfuerzo de cizalla en el punto de contacto es:

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\text{sen}2\beta \quad (22)$$

$$\sigma_N = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\text{cos}2\beta \quad (23)$$

Los parámetros  $\beta$  y  $\varphi$  están relacionados en el punto de intersección, como:

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \quad (24)$$

La variación del ángulo  $\varphi$  está entre 0 a 90° y en la práctica normalmente está centrado alrededor de los 30°, por lo tanto el valor  $\beta$  en el cual ocurre la falla por cizalla varía entre 45 y 90° y da la orientación del plano de falla el cual está

inclinado a un ángulo menor de 45° con respecto a la dirección de  $\sigma_1$ . La figura 30 muestra las posibles variaciones de los planos de falla para una roca. (Fjaer 2008).

A partir del criterio de falla de Mohr-Coulomb, ecuación (18) y reemplazando el esfuerzo de cizalla, ecuación (19) y el esfuerzo normal, ecuación (20) al plano de falla en términos de los esfuerzos principales máximos y mínimos se tiene:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\text{sen}2\beta = S_0 + \mu \left[ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\text{cos}2\beta \right] \quad (25)$$

Reemplazando el coeficiente de fricción interna  $\mu$  por su valor  $\tan\phi$  y el valor de  $\beta$  por  $\pi/4+\phi$  se tiene:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\text{cos}\phi = S_0 + \frac{1}{2}\tan\phi(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}\tan\phi\text{sen}\phi(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (26)$$

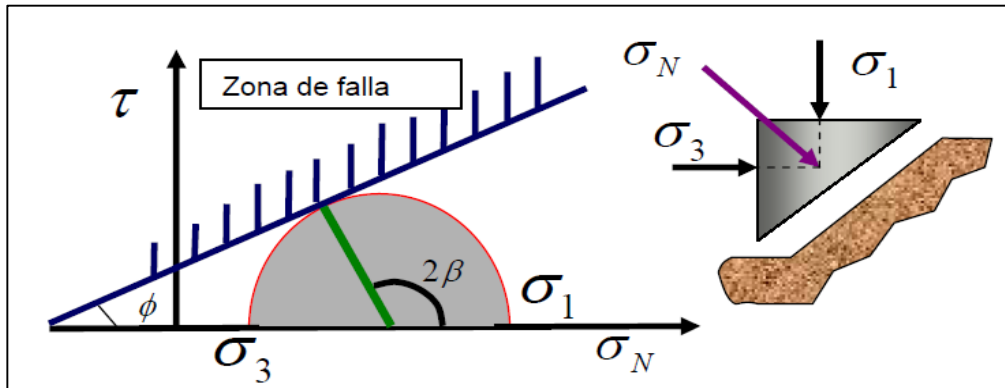
A partir de una serie de artificios matemáticos de tal forma que la relación entre los esfuerzos principales en términos de  $S_0$  y  $\phi$  es:

$$\sigma_1 = 2S_0 \frac{\text{cos}\phi}{1-\text{sen}\phi} + \sigma_3 \frac{1+\text{sen}\phi}{1-\text{sen}\phi} \quad (27)$$

Una expresión para la resistencia a la compresión uniaxial  $\sigma_c$  se obtiene haciendo  $\sigma_3=0$  en la ecuación (27).

$$C_0 = 2S_0 \frac{\text{cos}\phi}{1-\text{sen}\phi} \quad (28)$$

Figura 28. Diagrama del criterio de Mohr- Coulomb.

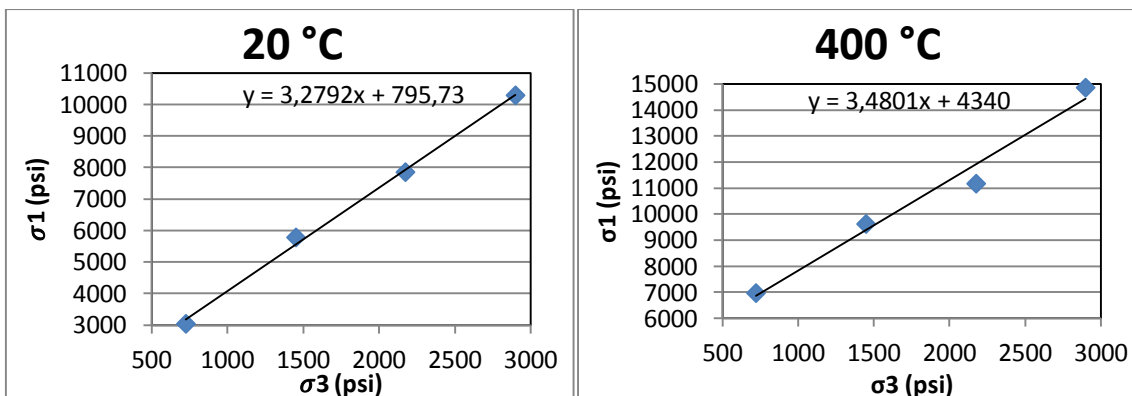


Tomado de: medición y evaluación de la magnitud y dirección de los esfuerzos in-situ en campo. Reinel 2004.

### Envolventes de falla de Mohr Coulomb.

La envolvente de falla de Mohr Coulomb se desarrolla con los datos de laboratorio de una prueba triaxial de la tabla 1. Pero es necesario determinar la cohesión ( $S_0$ ) y el ángulo de fricción interna  $\phi$ , esto se logra a través de una regresión lineal de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  y del punto de corte se obtiene la cohesión y de la pendiente el ángulo de fricción interna. Como se indican en las siguientes figuras 29.

Figura 29. Esfuerzo máximo Vs esfuerzo mínimo.



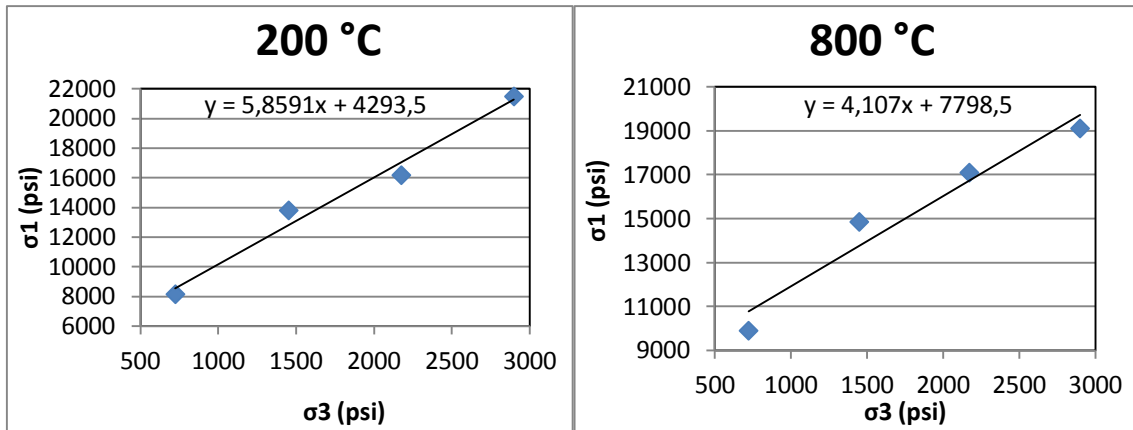
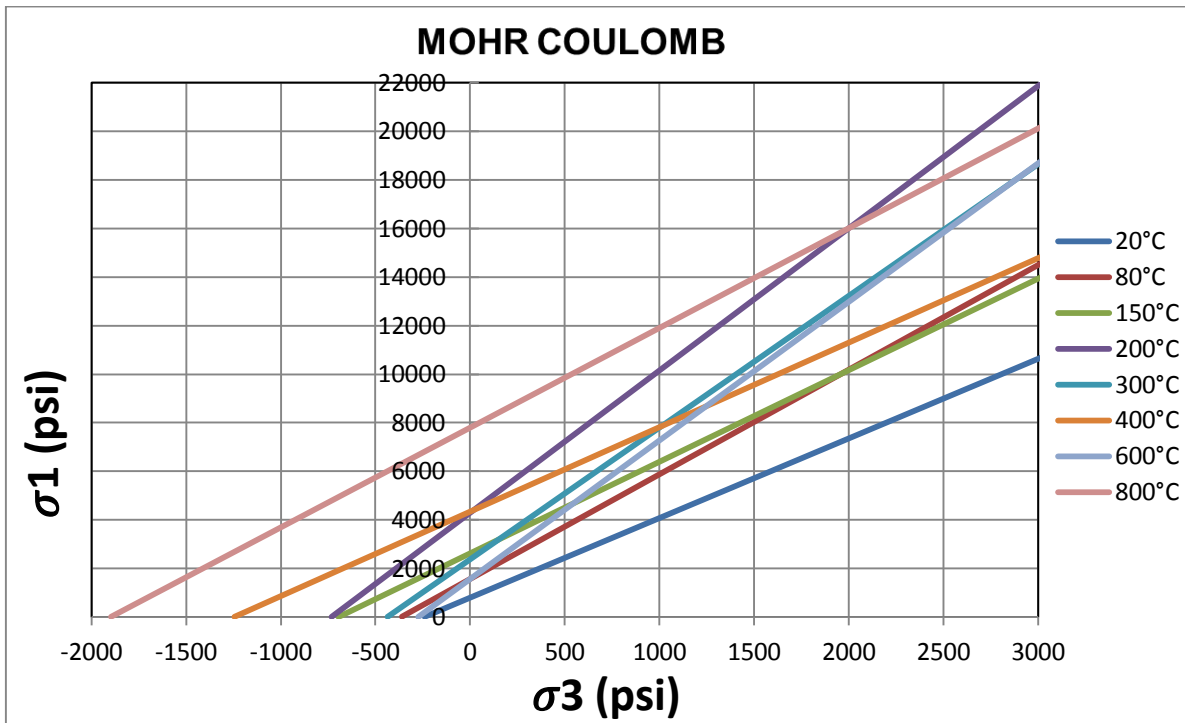


Tabla 2. Parámetros de la regresión para las diferentes temperaturas.

20°C		80°C		150°C		200°C		300°C		400°C		600°C		800°C	
b	795,73	b	1565,90	b	2621,50	b	4293,50	b	2373,40	b	4340,00	b	1565,20	b	7798,50
m	3,28	m	4,31	m	3,77	m	5,86	m	5,43	m	3,48	m	5,71	m	4,11
$\varphi$	32,18	$\varphi$	38,56	$\varphi$	35,51	$\varphi$	45,11	$\varphi$	43,53	$\varphi$	33,61	$\varphi$	44,57	$\varphi$	37,47
C	219,72	C	377,13	C	674,98	C	886,89	C	509,45	C	1163,24	C	327,62	C	1924,06

Teniendo en cuenta los parámetros de la tabla 2 y mediante la ecuación (27), es posible desarrollar el criterio de falla de Mohr Coulomb para las diferentes temperaturas y determinar el efecto de la temperatura en las muestras y cómo la variación de las propiedades mecánicas se pone en evidencia en el criterio de falla.

Figura 30. Envolvente de falla de Mohr Coulomb.



En la figura 30 se observa como la envolvente de falla para los datos experimentales varia a diferentes temperaturas y esto es debido a la variación de las propiedades mecánicas, lo cual se refleja en el comportamiento de las envolventes presentadas en la figura 30. La figura muestra que para temperaturas entre 20 a 200°C se desplaza verticalmente hacia arriba la envolvente indicando la muestra presenta una mayor resistencia a la falla por tensión y compresión. Pero para temperaturas mayores a 300°C se presenta un desplazamiento vertical hacia abajo de la envolvente y luego vuelve a subir, lo cual no tiene una explicación clara para dicho comportamiento, poniendo en evidencia la necesidad de desarrollar una investigación más amplia a nivel experimental para establecer cuál es la tendencia de las envolventes de falla.

## Criterio de falla de Hoek- Brown<sup>8</sup>.

Hoek y Brown introdujeron su criterio de falla en un intento de proporcionar los datos de partida para el análisis necesario en el diseño de excavaciones subterráneas. El criterio se dedujo a partir de los resultados de las investigaciones de Hoek de fallas frágiles de rocas intactas y de un modelo de estudio del comportamiento de macizos rocosos de Brown. El criterio partía de las propiedades de la roca intacta. Su versión original fue introducido en el 1980 desde entonces su uso se ha generalizado en el ámbito de la mecánica de rocas, traspasando los límites para los que fue propuesto. Debido a esto, y con el fin de mejorarlo, el criterio ha sufrido varias modificaciones así como la introducción de nuevos parámetros para definir el estado del material, y nuevas propuestas para obtener la caracterización del macizo rocoso, la última en 2002 (Hoek et al, 2002). A continuación se presentara el criterio de Hoek Brown generalizado para macizos rocosos en el cual se tiene en cuenta discontinuidades y la anisotropía de las rocas.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (29)$$

Donde  $m_b$  es un valor reducido de la constante del material  $m_i$  está dado por:

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (30)$$

sy  $a$  son constantes del macizo rocoso dadas por las siguientes relaciones:

$$s = \exp \left( \frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (31)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (32)$$

---

<sup>8</sup>HOEK, Evert. CARRANZA, Carlos and CORKUMBrent. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition.

$D$  es un factor que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ no alterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

Hoek y Brown en el año 2002 presentaron un criterio de falla generalizado para el manejo de rocas intacta, siendo consideradas las muestras de laboratorio usadas para las pruebas de compresión de como roca intacta por su tamaño.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad (33)$$

Donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , son los esfuerzos principales mayor y menor, en el momento de la falla  $\sigma_{ci}$  es la resistencia a la compresión uniaxial del material intacto.

Los parámetros  $m_i$  y  $s$  son constantes del material, donde  $s=1$  para roca intacta.  $\sigma_{ci}$  y  $m_i$  debe ser determinado por las pruebas de confinamiento triaxial en un rango de cero a la mitad de la UCS, considerando, al menos, cinco puntos de datos deberían incluirse en la determinación.

Para evaluar el comportamiento del criterio de falla de Hoek Brown se utilizaran los datos de la tabla 1. Además se utilizó el paquete de software libre Roclab (Rocscience Inc – [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)) para determinar los parámetros ( $m_i$  y  $\sigma_{ci}$ ) del criterio de Hoek Brown a diferentes temperaturas.

### **Envolventes de falla de Mohr Coulomb.**

Para la generación de las envolventes de falla a través de Hoek Brown, es necesario determinar los siguientes parámetros parámetros ( $m_i$  y  $\sigma_{ci}$ ) a través de un software como se mencionó anteriormente. A continuación se presentaran las gráficas para cuatro temperaturas que son generadas por Roclab cuando los datos de la prueba triaxial son ingresados en el software.

Figura 31. Gráficas de esfuerzo mayor Vs el esfuerzo menor.

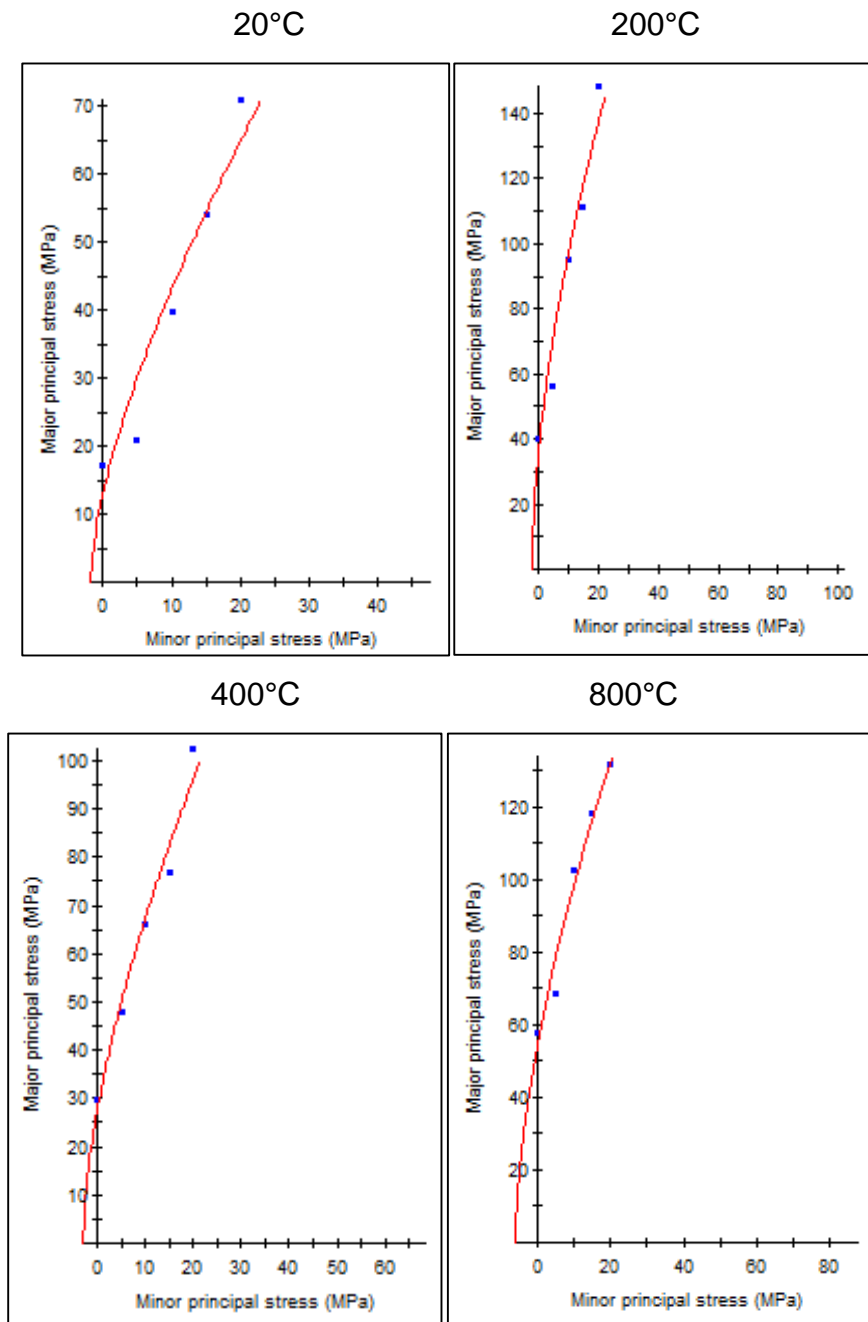
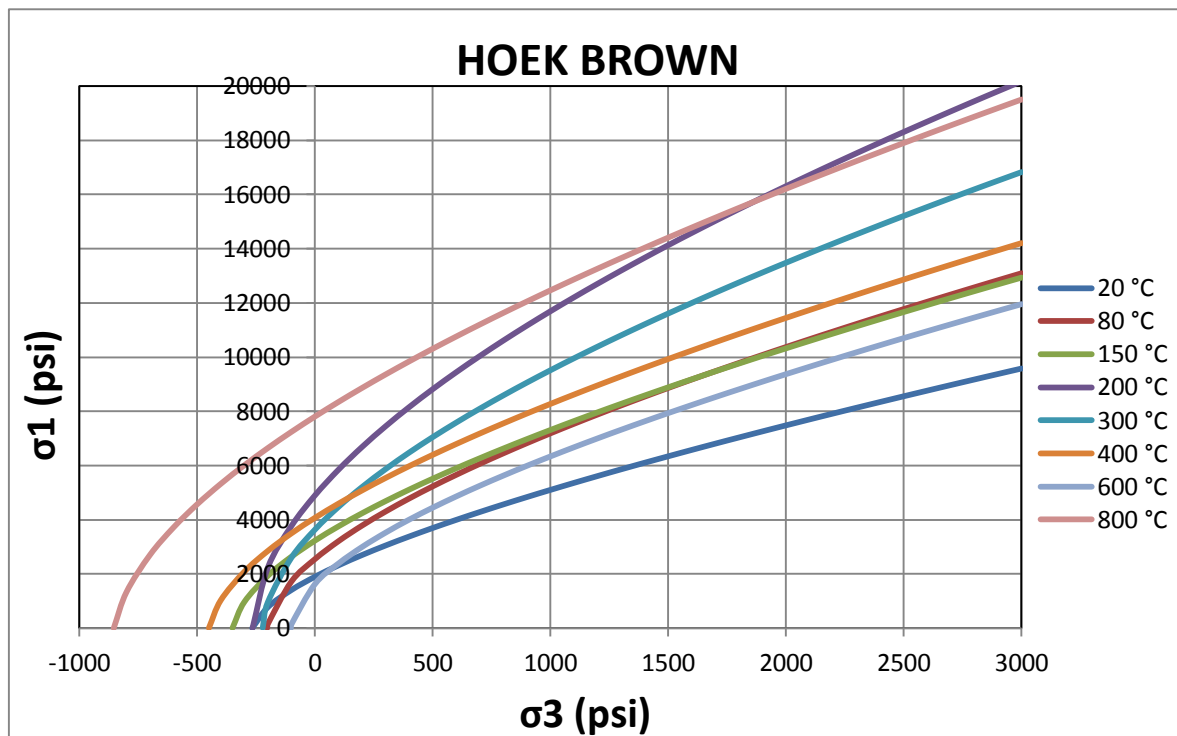


Tabla 3. Parámetros para generar la envolvente de falla de Hoek Brown.

20°C		80°C		150°C		200°C		300°C		400°C		600°C		800°C	
mi	6,981	mi	12,490	mi	9,113	mi	18,448	mi	16,326	mi	8,928	mi	15,903	mi	9,03
$\sigma_{ci}$ (psi)	1895,73	$\sigma_{ci}$	2547,07	$\sigma_{ci}$	3229,29	$\sigma_{ci}$	4898,53	$\sigma_{ci}$	3634,42	$\sigma_{ci}$	4070,87	$\sigma_{ci}$	1625,74	$\sigma_{ci}$	7807,67

Ahora para generar la envolvente de falla con los parámetros de la tabla 3 y la ecuación (33).

Figura 32. . Envoltentes de falla de Hoek Brown.



Las envolventes de falla de Mohr Coulomb y Hoek Brown presentan las mismas tendencias para todas las temperaturas a las cuales se sometieron las muestras en laboratorio. De igual manera se puede también observar el cambio en las propiedades mecánicas afecta el comportamiento y las tendencias de las envolventes. Este comportamiento permite afirmar sobre la necesidad de realizar

mayor investigación a nivel de laboratorio, para diferentes litologías y condiciones de las muestras, con el fin de conocer con mayor exactitud el comportamiento de las envolventes de falla.

#### **2.4.2 Análisis de datos uniaxiales.**

A continuación se presentaran datos de unas muestras sometidas a 500°C, las cuales son areniscas ricas en cuarzo denominadas formación A (Tabla 4) y C (tabla 5). De las muestras anteriores se observara el UCS, módulo de Young y relación de Poisson a condiciones de laboratorio (Temperatura ambiente y presión atmosférica) y después del proceso térmico. La formación A es una arenisca de grano grueso compacta de baja cementación y la formación C por lo contrario es una muestra de grano fino compacta y con mayor grado de cementación respecto a la muestra anterior.

A partir de los resultados obtenidos de las muestras y el desarrollo del análisis del criterio de falla de Mohr Coulomb, se determinó que la formación A (Figura 33), sufre un proceso de debilitamiento (softening) el cual es la respuesta de la muestra al aumento de la temperatura a 500°C, que afecto la estructura interna de la roca por expansión térmica de los granos, además también corresponde con la variación de la cohesión que es un concepto importante tener en cuenta cuando se considera la resistencia de las rocas, mientras las rocas resistentes tienen una cohesión mayor y las rocas débiles tienen una baja cohesión (Zoback 2007).

Lo anterior se pone en evidencia al observarse una reducción del 98% del UCS (resistencia a la compresión uniaxial no confinado). También se observó una reducción en el módulo de Young que representa la rigidez de los materiales (capacidad de soportar esfuerzos sin deformarse), al igual que la relación de Poisson tangente y secante. Pero la relación de Poisson promedio aumento, esto

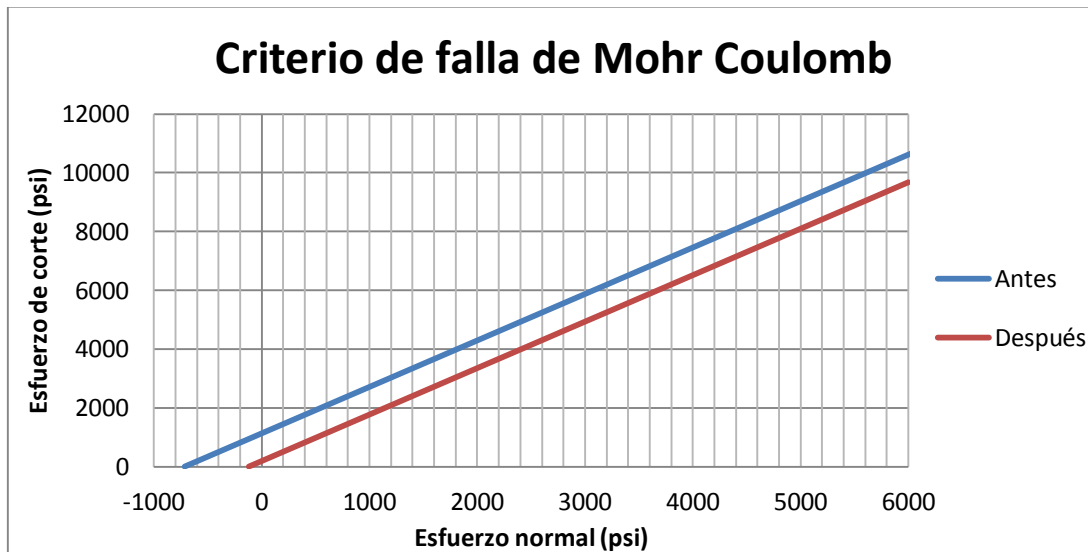
no es claro y no tiene una explicación además debido a la cantidad limitada de datos no es posible determinar la causa.

Tabla 4. Datos de una prueba uniaxial antes y después del proceso, Formación A.

FORMACIÓN A		Antes	Después	% Reducción
Young	Tangente (psi)	7,40E+05	1,33E+05	82,03
	Secante (psi)	4,60E+05	9,40E+04	79,57
	Promedio (psi)	1,38E+06	2,42E+05	82,49
Poisson	Tangente (psi)	0,222	0,102	54,05
	Secante (psi)	0,212	0,063	70,28
	Promedio (psi)	0,250	0,284	-13,60
Cohesión		1130,58	188,84	
UCS (psi)		7149,73	1194,23	98

Datos de laboratorio ICP.

Figura 33. Criterio de falla para datos uniaxiales, Formación A.



En cuanto la formación C se observa un aumento del UCS del 23,75% (tabla 5), después del proceso de calentamiento se evidencia un fenómeno de fortalecimiento (hardening) que puede darse por un reordenamiento de los granos,

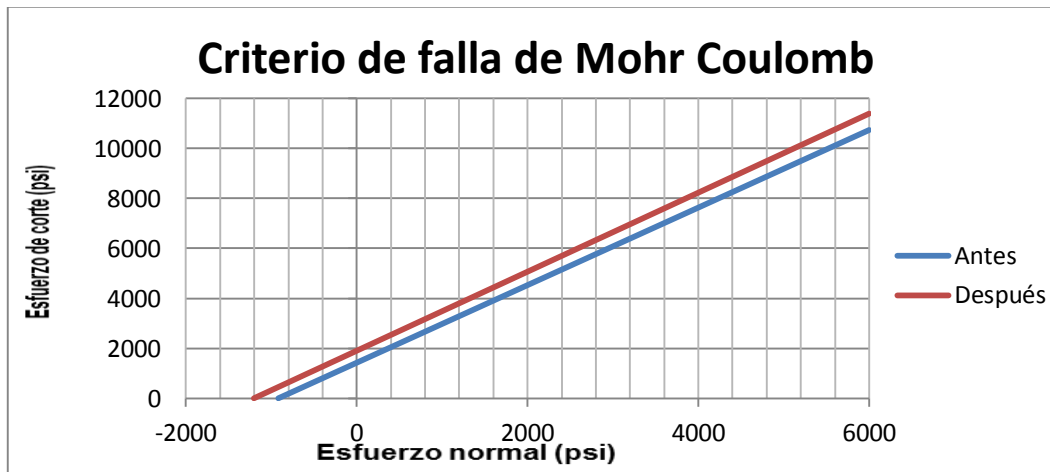
pero a pesar de este fenómeno se evidencia una reducción del módulo de Young y relación de Poisson. Analizando el criterio de falla de Mohr Coulomb para la formación C, se observa un aumento de la resistencia de la roca a la falla y por esto la envolvente de falla se desplaza sobre la envolvente antes del proceso térmico.

Tabla 5. Datos de una prueba uniaxial antes y después del proceso, Formación C.

FORMACIÓN C		Antes (psi)	Después (psi)	% Reducción	% Aumento
Young	Tangente	1,14E+06	8,73E+05	23,56	
	Secante	1,05E+06	7,69E+05	26,48	
	Promedio	1,46E+06	1,38E+06	5,43	
Poisson	Tangente	0,070	0,024	65,71	
	Secante	0,047	0,014	70,21	
	Promedio	0,204	0,122	40,20	
Cohesión		1425,45	1904,77		
UCS (psi)		9185,29	12055,7		23,75

Datos de laboratorio ICP.

Figura 34. Criterio de falla para datos uniaxiales, Formación C.



### **3. EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LAS REACCIONES TÉRMICAS EN LAS ROCAS Y PRESIÓN DE PORO.**

#### **3.1 REACCIONES TÉRMICAS EN LAS ROCAS.**

Las rocas que son sometidas a un calentamiento, además del calor requerido para elevar la temperatura, puede ser también, requerido para que ocurran ciertas reacciones de los minerales constituyentes (endotérmicas) e incluso algunas reacciones liberan calor (exotérmicas), (Somerton, 1992). Por ejemplo la cantidad de calor necesaria para generar la inversión de cuarzo de la fase  $\alpha$ - $\beta$  es de 4,825 cal/gm y se da una temperatura promedio 573°C, sin embargo la reacción la reacción anterior es reversible cuando una cantidad de calor equivalente es liberada en un proceso de enfriamiento, el cuarzo  $\beta$  es estable hasta 870 °C. Durante el proceso de inversión de cuarzo  $\alpha$  a  $\beta$ , hay una ligera rotación de los tetraedros que son la unidad estructural básica en sílice cristalina, pero no ruptura de los enlaces Si-O. Debido a esta rotación ligera, areniscas ricas en cuarzo muestran una expansión de volumen permanente o una alteración de la estructura del poro permanente después del calentamiento. A temperaturas superiores a 870 ° C, tridimita es la sílice de fase estable, sin embargo, esta conversión requiere un tiempo extremadamente largo.

Otras reacciones que pueden ocurrir en rocas fue publicadas por Barshad (1972), pero estas reacciones ocurre y requieren un mayor rango de temperatura que la inversión de cuarzo.

Tabla 6. Reacción de minerales constituyentes de las rocas.

Rango temperatura. (°C)	Mineral.	Reacción.
25 - 220	Ca-montmorillonita	Desorción
25 - 220	Mg-montmorillonita	Desorción
400 - 625	Mg-illita	Descomposición
455 - 462	Caolinita	Descomposición
554 - 723	Ca-montmorillonita	Descomposición
573	Cuarzo	Inversión $\alpha$ - $\beta$
700 - 830	Ca-carbonato (CaCO <sub>3</sub> )	Descomposición
790 - 950	Mg-illita	Descomposición
816 - 908	Ca-montmorillonita	Descomposición

Tomada de: Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems.

En Canadá se han desarrollado estudios para observar el efecto de la inyección de agua caliente y vapor sobre la permeabilidad, mojabilidad, saturación residual de aceite y composición mineralógica y estructura de areniscas con minerales arcillosos caolinita e illita de Alberta. Se ha encontrado en laboratorio que la permeabilidad de las muestras ha sufrido un daño de formación reduciendo su permeabilidad hasta un 95% debido a que la temperatura induce alteración mineralógica. Además también se adelantaron investigaciones del impacto de procesos de combustión in situ, el cual es un proceso que alcanza temperaturas entre los 700 a 800 ° C en el frente de ignición. El objetivo de realizar un estudio de las reacciones térmicas de los minerales constituyentes de las rocas y determinar las temperaturas a las cuales se presentan reacciones, para a través de esta caracterización utilizar esos rangos como indicadores de las temperaturas que se alcanzan en otros procesos. Perry y Gillott (1982), presentan la tabla 7, en la cual se puede observar los cambios mineralógicos inducidos para diferentes minerales que se dan en las rocas sometidas a procesos de aumento de temperatura en laboratorio en las muestras o en campo en los yacimientos con procesos de recuperación térmica mejorada. Ahora si se comparan con la tabla 6

se presenta unas diferencias en cuanto los rangos de temperatura para los cuales ocurren cambios en los minerales como en el caso de la caolinita, cuarzo, illita.

Tabla 7. Reacción de minerales constituyentes de las rocas.

Mineral	Transformación	Rango Temperatura °C
Cuarzo	Conversión $\alpha$ - $\beta$	573
	a tridimita	870
K-Feldespatos	Order - disorder	500 - 700
Plagioclasa	Order - disorder	850 - 1100
Calcita	Disociación	550
Dolomita	Descomposición y disociación de $MgCO_3$	550 - 800
Siderita	Descomposición	400 - 550
Pirita	Descomposición	350 - 450
Moscovita	Deshidroxilación	700 - 900
	Descomposición	900 - 1000
Biotita	Deshidroxilación	900 - 1000
	Descomposición	> 1000
Caolinita	Descomposición	450 - 600
Illita	Deshidroxilación	500 - 600
	Descomposición	750 - 950
Clorita	Deshidroxilación de brucita	250 - 600
	Deshidroxilación y descomposición	450 - 800
Esmectita	Colapso irreversible	300 - 700
	Deshidroxilación	500 - 750
	Descomposición	650 - 950
Illita degraded	Colapso irreversible	250 - 300

Tomado de: Mineralogical transformations as indicators of combustion zone temperatures during in situ combustion. Perry y Gillott, 1982.

### **3.2 MECANISMOS DE DAÑO INDUCIDO TÉRMICAMENTE.**

Estos mecanismos han sido estudiados BENNION y Thomas (1992), los cuales afectan la permeabilidad, porosidad, e incluso se puede presentar migración de finos durante un proceso térmico son:

- Transformación mineral
- Disolución/solubilización mineral

#### **La disolución térmica de minerales<sup>9</sup>.**

Este fenómeno se puede ver en la figura 35. El daño por disolución puede tener dos formas:

- Daño por re-precipitación de minerales solubilizados.  
A menudo clastos de material soluble que contienen encapsulados finos insolubles. Como la inyección de vapor o agua caliente disuelven el material soluble y los finos insolubles migran a través del flujo. Si tienen el tamaño es suficiente, estos finos pueden puentear u obstruir la garganta de poros.

#### **Las transformaciones minerales**

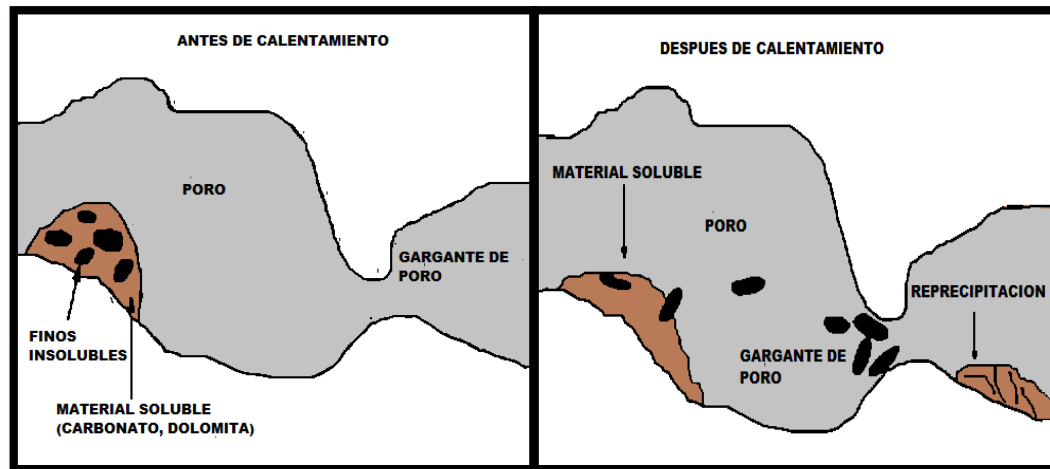
- Es un problema que tiene un potencial de presentarse en yacimientos con presencia de arcillas. Principalmente en los cuales donde la temperatura induce la formación de esmectita, debido a que esta se hinchan al entrar en contacto con el agua. Muchos yacimientos tienen arcillas que no son sensibles a hinchamiento incluye caolinita, illita y clorita.

---

<sup>9</sup>BENNION, Brant and F, Thomas. Thermally induced formation damage due to hot water and steamflooding in sandstone reservoirs. 1992.

- El potencial para la transformación mineral en operaciones térmicas a altas temperaturas ocurre cuando caolinita relativamente inerte es transformada a esmectita que es sensible al agua.

Figura 35. Daño inducido térmicamente.



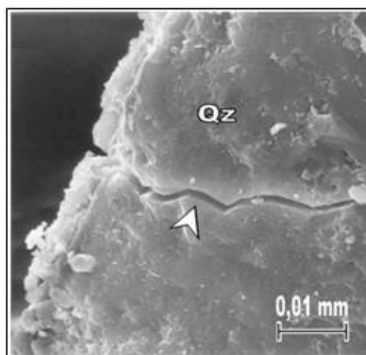
Tomado de: Thermally induced formation damage due to hot water and steam flooding in sandstone reservoirs. BENNION, Brant and F, Thomas. 1992.

Hajpal y Torok (2004), publicaron una investigación de los cambios mineralógicos y la variación del color que generan cuando rocas areniscas ricas en cuarzo son sometidas a procesos térmicos con temperaturas entre los 150 a 900 °C. Las areniscas son rocas sedimentarias detríticas que contienen partículas de menos de 2 mm de diámetro. El Cuarzo es el mineral principal en la mayoría de las areniscas, pero fragmentos de rocas como feldespatos, micas, minerales de arcilla y carbonatos también puede estar presente. Diferentes minerales y fases minerales tales como sílice, óxido de hierro, hidróxido de hierro, carbonato de calcio y arcilla.

La mineralogía de los cementos también varía y cuenta con minerales arcillosos (caolinita o mezclas caolinita-illita), cementos ferruginosos (hematita, goethita), carbonatos (calcita, dolomita) o sílice.

El cuarzo y feldespato potásico no presentan alteraciones significativas hasta 900°C. Sin embargo, se detectaron dos efectos principales. Al principio, la transformación de un cuarzo- $\alpha$ - $\beta$  cuarzo se documentó a temperaturas de 580 °C - 595 °C, que se asoció con un aumento de volumen. Un segundo cambio, más significativo en los granos de cuarzo y feldespato es el desarrollo de micro-fisuras en los límites de grano a temperaturas superiores a 600° C. Las micro-grietas dentro de los cristales aparecen sólo a temperaturas superiores por encima de 750°C, Figura 36, esta figura pone en evidencia el efecto de los esfuerzos térmicos que se inducen por el aumento de temperatura que causa una expansión térmica de los granos generando un aumento en los esfuerzos entre los contactos grano a grano que pueden superar la resistencia de los mismos, llevando a la falla de estos, es decir, generación de microfracturas de los minerales.

Figura 36. Microfractura generada en un grano de cuarzo.



Tomado de: Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. Hajpal y Torok, 2004.

Otras conclusiones de Hajpal y Torok (2004) son: minerales de arcilla y filosilicatos son más sensibles a altas temperaturas y muestran varias transformaciones a temperaturas elevadas (Tabla 8). A bajas temperaturas hasta 450°C microfracturas por contracción se pueden desarrollar en minerales arcillosos (Fig.

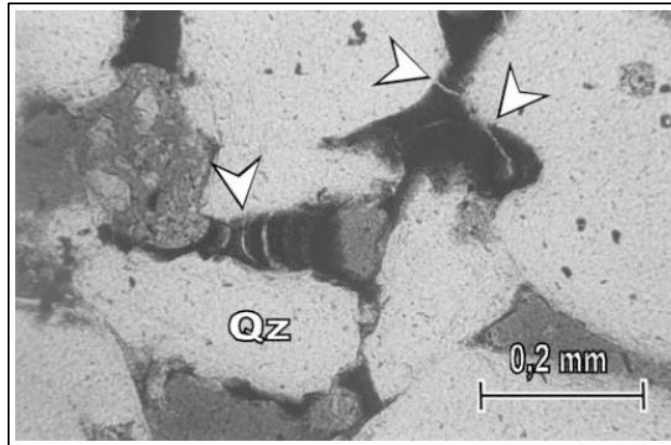
37). En 900° C, la estructura de glauconita colapsa. Estructuras illita-esmectita son más estables que caolinita.

Tabla 8. Los cambios en la composición mineral (“+” representa el rango donde mineral está presente, “o” el rango donde mineral está ausente).

Nombre	Mineral	Cambios en los minerales (°C)								
		22	150	300	450	600	750	900		
Cottaer	Caolinita			+				o		
	Glauconita				+				o	
Donzdorter	Calcita				+				o	
	Hematita					o			+	
Maulbronner	Clorita				+				o	
	Illita					+				
	Hematita					+				
Pfinztaler	Moscovita					+				
	Clorita					+			o	
Postaer	Caolinita				+				o	
Pliezhausener	Caolinita			+				o		
	Dolomita				+				o	
	Calcita				+				o	
Rohrschacher	Clorita					+				
	Glauconita						+			
	Calcita					+			o	
	Dolomita					+			o	
	CaO					o			+	
	Moscovita					+			o	
Balatonrendesi	Caolinita			+				o		
	Hematita						+			
	Goetita			+				o		
Ezusthegyi	Clorita			+				o		
	Caolinita				+				o	
Rezi	Clorita			+				o		
	Caolinita			+				o		
	Jarosita			+				o		

Tomado de Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. Hajpal y Torok, 2004.

Figura 37. Microfracturas desarrollada en el material cementante a 450°C.



Tomado de Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. Hajpal y Torok, 2004.

La estructura interna de clorita también cambia debido al calor y la estructura de la caolinita colapsa completamente alrededor de 550°C. Ahora, el cambio más destacado de minerales de hierro como goetita y jarosita se lleva a cabo a temperaturas elevadas. A 900° C, una nueva fase mineral de hematita aparece y la goetita y jarosita desaparecen. Esta reacción de oxidación ya ha sido descrita por Hajpal (2002). Como la hematita es un mineral resistente relativamente a altas temperaturas es el producto de reacción final de cualquier oxihidróxidos de hierro a temperaturas elevadas.

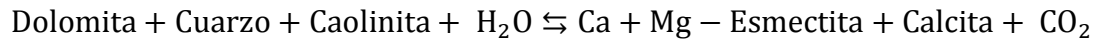
Hajpal y Torok, 2004, observaron unas variaciones en el color de las muestras muy características. La glauconita verdosa (a temperatura ambiente) se convierte en marrón a 450°C, y de color marrón-rojo oscuro a 900° C cuando se transforma a hematita. Clorita también cambia su color de verde pálido (a 22°C) a marrón (a 300°C) a amarillento (a 900°C). Tales cambios de color de los minerales individuales causan cambios de color observables solo cuando la fase mineral constituye una parte importante del cemento y otros minerales de hierro que se

puede enmascarar el cambio de color son raros. Las areniscas cementadas con minerales ferruginosos y arcilla se aclararon ligeramente, mientras que la caolinita y clorita en las rocas arenisca parece ser más oscuras debido a los efectos térmicos.

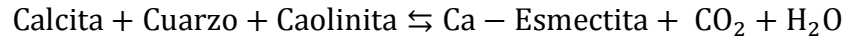
### **3.3 CAMBIOS MINERALÓGICOS OBSERVADOS EN PRUEBAS DE LABORATORIO Y CAMPO POR INYECCIÓN DE VAPOR.**

Diferentes estudios realizados sobre procesos de recuperación térmica de hidrocarburos pesados en Canadá y sus efectos sobre la mineralogía por el aumento de la temperatura como inyección de vapor y combustión in situ. Los diferentes investigadores han encontrado las mismas reacciones a nivel de laboratorio y pilotos de campo. En las operaciones de recuperación térmica, a las altas temperaturas existentes cerca de los pozos de inyección, algunos de los minerales de la matriz tales como el feldespato y algunas arcillas incluso se disuelven parcialmente en el agua condensada del vapor inyectado. Según Gunter et al., caolinita se transforma a esmectita y analcima a altas temperaturas esperadas en la recuperación mejorada con vapor. A medida que la solución que lleva los minerales disueltos se mueve más profundamente en el yacimiento, su temperatura desciende y algunos de los minerales comienzan a precipitar en el yacimiento para provocar la formación de incrustaciones y la obstrucción de los canales de flujo. A continuación se mencionaran estudios realizados por diferentes investigadores:

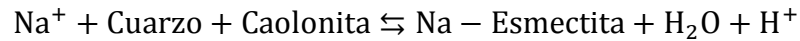
Kirk, Gordon et al. (1987) desarrolló pruebas de laboratorio para estudiar el efecto de la inyección de vapor y el aumento de temperatura en los yacimientos y encontró que se presentaron las siguientes reacciones:



La Calcita también puede reacción en lugar de la dolomita

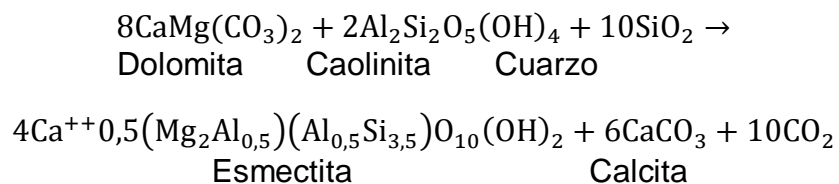


Además también se presentó la reacción propuesta por The Sedimentology Research Group (1981)



Donde  $\text{Na}^+$  es proporcionado por el fluido de inyección (vapor y agua).

Paul Nadeau (1998). Demuestra a nivel de laboratorio a temperaturas de 200°C con muestras sintéticas de areniscas compuestas de cuarzo, caolinita y dolomita, que la mayoría de la dolomita de la muestra se ha disuelto para formar calcita y esmectita apenas detectable. El producto precipitado de esmectita se compone principalmente de sílice y Mg, con cantidades menores de Al y Fe (más probablemente de impurezas dentro de la dolomita y caolinita), y Ca. Esta composición muestra la importancia de la dolomita en la reacción, que es la fuente de Mg.



La reacción está dominada por disolución dolomita, que proporciona Mg y Ca para esmectita y CO<sub>3</sub> para la calcita, así como la generación de cantidades significativas de CO<sub>2</sub> (el catión intercambiable para la esmectita, se supone que es Ca ++, también a partir de dolomita). La caolinita proporciona todo el Al y algunos de los enlaces de Si para la esmectita, y el resto de los enlaces Si se proporciona por el cuarzo (aproximadamente 70%). Por lo tanto, el cuarzo

proporciona cantidades sustanciales de Si para el crecimiento de esmectita. La reacción anterior se observa para una muestra sintética de arenisca con 5% de dolomita y 5% de caolinita, la cual no puede formar más de aproximadamente 5% en peso de esmectita.

El mecanismo de reacción observado aquí es prácticamente idéntico a los encontrados por experimentos de inyección de vapor utilizando núcleos de areniscas de Alberta (Canadá) de petróleo pesado de la formación Clearwater (Kirk et al. 1987).

Muchos yacimientos contienen lo que normalmente se clasifican como arcillas no hinchables. Estas arcillas se incluyen materiales tales como caolinita, illita y clorita. Las arcillas de este tipo generalmente presentan cargas equilibradas y por lo tanto no son susceptibles a la hinchazón. Bennion y Thomas (1992), el potencial de transformación mineral en operaciones térmica a alta temperatura se produce cuando arcilla y caolinita relativamente inerte se transforma en esmectita en agua fresca, además cambios en la concentración de arcillas (Tabla 9). Estas reacciones se producen como sigue:

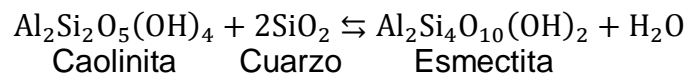
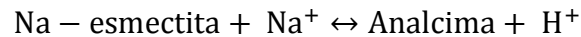
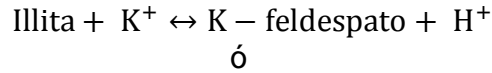


Tabla 9. Cambios en la composición en las arcillas, antes y después de la prueba de inyección de vapor.

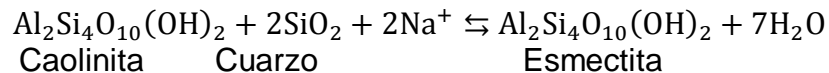
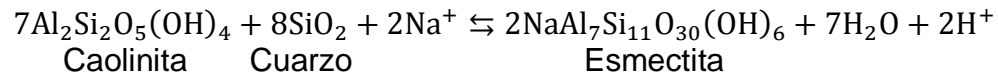
Tipo arcilla	Porcentaje de arcilla presente en la muestra			
	Muestra A		Muestra B	
	Antes	Después	Antes	Después
Caolinita	88	83	90	42
Clorita	0	6	0	0
Illita	12	8	10	25
Esmectita	0	3	0	33

Tomada de: Formation damage due to mineral alteration and wettability changes during hot water and steam injection in clay-bearing sandstone reservoirs.

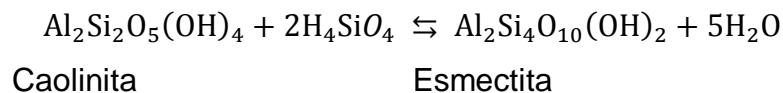
Hutcheon demostró que el CO<sub>2</sub> es producido en pilotos por la disolución de calcita.



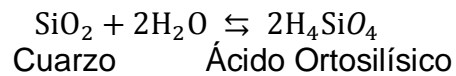
Hutcheon (1982) en su publicación “A review of artificial diagenesis during Thermally Enhanced Recovery” de una investigación realizada en un piloto en Cold Lake, el cual funcionó por dos años. Tomo muestras antes y después del proceso de inyección de vapor para estudiar el efecto sobre la mineralogía de la formación. Hutcheon propone que las reacciones para formar esmectita son las siguientes:



En la segunda reacción el componente  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  se considera que está disuelto en la fase de esmectita. Tanto en la primera y en segunda reacción es evidente que se requiere una fuente de sílice (cuarzo) para formar esmectita de caolinita. El cuarzo y esmectita pueden no ser estables juntos reescribiendo la segunda reacción usando una solución acuosa de sílice.

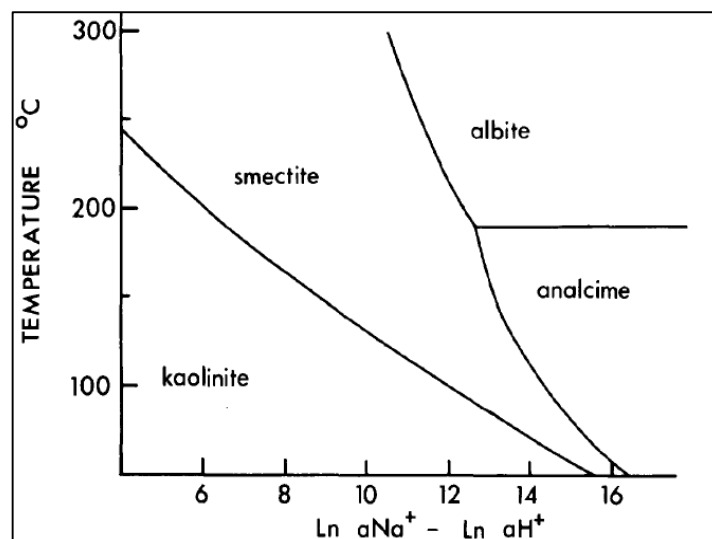


Y considerando la disolución de cuarzo dada por:



Hutcheon et al (1982) también elabora un diagrama de fase de las estabildades relativas de esmectita, caolinita, albita, y analcima (zeolita de sodio) como una función de la temperatura. Las relaciones de fase se muestran en la figura 38, explican la aparición de analcima como el mineral último en formarse. Cuando la inyección de vapor se detiene y cae la presión, la formación será invadida por el agua de formación más salina. A pH constante esto aumentará la relación de actividad de ion sodio-a-hidrogeno y estabilizar analcima a expensas de la esmectita. Sólo dos meses transcurridos entre el tiempo inyección y se detuvo cuando el núcleo se cortó, lo que implica que nucleación de analcima y el crecimiento deben ser muy rápida.

Figura 38. Diagrama de fase de las estabildades relativas de esmectita, caolinita, albita, y analcima.



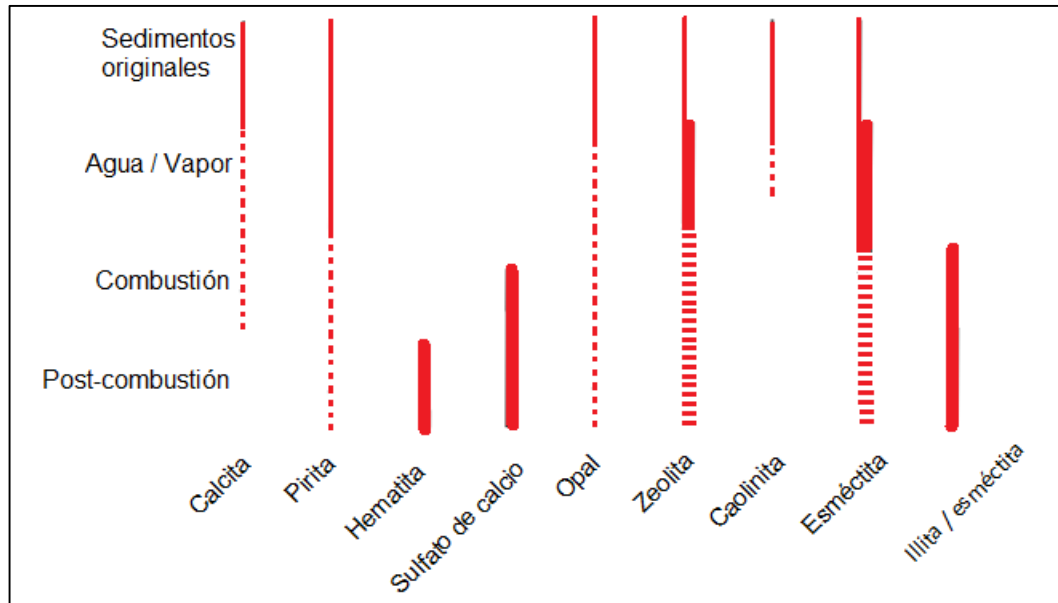
Tomado de: A Review of Artificial Diagenesis During Thermally Enhanced Recovery. Hutcheon, 1982.

### **3.4 CAMBIOS MINERALÓGICOS OBSERVADOS EN PRUEBAS DE LABORATORIO Y CAMPO POR COMBUSTION IN SITU.**

La alteración mineral asociada a la combustión in situ se presenta en la gráfica 39 (La línea gruesa es la precipitación y línea discontinua es la disolución), con temperaturas alrededor de los 500°C. Es claro que para la combustión in situ se inyecta aire al yacimiento y luego se genera la ignición. El desplazamiento del frente de combustión en las pruebas de laboratorio dejó como resultado una arena limpia y consolidada. La zona de la combustión no presentó una variación en cuanto al tamaño de los granos excepto para los granos de carbonatos (calcáreo).

Los granos de carbonato muestran varias etapas de alteración, desde una reacción de los bordes que rodean los granos hasta la disolución total de los granos. La reacción de los bordes de los granos está relacionada a la reacción de calcita y la combustión durante la ignición en el frente. La fracción de sedimentos más finos experimenta los mayores cambios mineralógicos durante la combustión in situ. Las alteraciones mineralógicas ocurren en la matriz de la arenisca (tabla 7). Una comparación de los resultados de la difracción de los rayos x de las muestras sin alterar y las muestras quemada indica que opal, zeolita, arcillas y posiblemente pirita tienen una disminución después del proceso de combustión in situ. También se observó que la pérdida de esmectita es debido a la conversión esmectita-illita. En cuanto al opal y zeolita ocurre una disolución de la matriz.

Figura 39. Patrones de alteración de los sedimentos expuestos a diferentes procesos de recuperación térmica.



Tomada de: Production induced diagenesis during thermal heavy oil recovery grain size as a predictor of reservoir alteration. Barrett, 1996.

La alteración de sedimentos temprano en las reacciones de combustión in situ es similar a las reacciones de vapor. Pero una reacción adicional durante el proceso de combustión después del frente quemado es la precipitación de óxido de hierro y hematita, dando a los sedimentos un aspecto rojizo. El producto final de un frente de combustión en movimiento a través de los sedimentos de crudo pesado es un color rojizo y una arenisca limpia ligeramente consolidada.

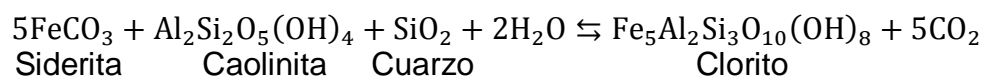
Perry y Gillott (1982), desarrollaron pruebas de laboratorio en tubos de fuego con muestras de la formación Clearwater de Canadá y presentaron las siguientes transformaciones (Tabla 10).

Tabla 10. Contenido mineral y temperaturas de transformación mineral.

Mineral	% en peso	Transformación	Temperatura (°C)
Cuarzo	52	-	-
Plagioclasa	17	-	-
K-Feldespato	2	-	-
Dolomita	15	Descomposición	550 - 600
Mica	3	-	-
Caolinita	7	Descomposición	525 - 550
Illita	2,5	Descomposición	> 700
Esmectita	1	Colapso irreversible	600 - 700
		Descomposición	> 700
Clorita	0,5	Dehidroxilación brucita	350 - 400
		Descomposición	600 - 700

Tomado de: Mineralogical transformations as indicators of combustion zone temperatures during in situ combustion. Perry y Gillott. 1982.

Hutcheon (1988) Observó en las muestras obtenidas de un pozo de Lloydminster que había sido sometido a combustión in situ. La temperatura superó 700 ° C en una arenisca compuesta principalmente de cuarzo, feldespatos. Cementos y minerales autogénicos incluyen siderita, calcita. Los núcleos recuperados de la zona de combustión son de un rojo ladrillo y muestran la reacción de la siderita y caolinita. El color probablemente es el resultado de la oxidación de hierro, como la hematita la cual no estaba presente originalmente en la roca. Hutcheon propone la reacción de siderita y caolinita para producir clorito de hierro.



### 3.5 ANÁLISIS DATOS DE LABORATORIO.

A continuación se presentaran unos datos suministrados por el Instituto colombiano del petróleo (ICP) a nivel macroscópico (Tabla 11) y para la fracción menor a 2 micras (Tabla 12).

Tabla 11. Resultados antes y después del proceso térmico a nivel macroscópico.

Concentración relativa roca total				
Formación	Antes o Después	Arcillas (% peso)	Cuarzo (% peso)	Otros (% peso)
A	Antes	Trazas	95	<5
A	Después	Trazas	95	<5
B	Antes	5	90	5
B	Después	Trazas	95	<5
C	Antes	21	74	<5
C	Después	<5	90	<5

Tabla 12. Resultados antes y después del proceso térmico de la fracción menor a 2 micras.

Concentración relativa de la fracción menor de 2 micras						
Formación	Antes o Después	Clorita (% peso)	Interestratificados (% peso)	Illita (% peso)	Caolinita (% peso)	Cuarzo (% peso)
A	Antes	<5	ND	5	66	24
A	Después	40		25	<5	30
B	Antes	6	ND	11	57	26
B	Después	18		45	<5	32
C	Antes	<5	7	12	70	6
C	Después	11	ND	18	<5	66

Analizando los resultados de laboratorio para las muestras llamadas formación A, B y C, de manera macroscópica es evidente que las rocas son muestras ricas en cuarzo y al ser sometidas al proceso de calentamiento se genera o induce

reacciones en las arcillas, causando que la concentración en peso de estas disminuya y por ende el de los demás minerales constituyentes aumente. También se inducen microfisuras en los granos de cuarzo por la expansión térmica y los esfuerzos térmicos inducidos entre los contactos grano a grano.

Ahora detallando la composición a escala microscópica para las fracciones menores a 2 micras (clorita, interestratificados, illita, caolinita y cuarzo), se puede ver cuál es de las arcillas es la que está presentando una reacción en específico los resultados de la 3 muestras, se encontró que el porcentaje de caolinita está disminuyendo después del proceso.

Una de las posibles reacciones es la estudiada por Barshad (1972) mostradas en la Tabla 7, encontró que la caolinita se descompone a temperaturas entre los 455 a 462 °C, temperaturas alcanzadas por las muestras. Hojpal y Torok (2004) encontraron que la caolinita desaparece totalmente de muestras alrededor de los 750°C.

Kirk y Gordon et al (1987) y Paul Nadeau (1998), en pruebas de laboratorio estudiaron los cambios mineralógicos, encontrando como resultado la reducción de la caolinita que reacciona con otros minerales para producir esmectita en procesos de inyección de vapor Hutcheon en una muestra obtenida de un pozo piloto encontró la disminución de caolinita por reacciones inducidas. Incluso Perry y Gillott (1982) también evidenciaron la descomposición de caolinita a temperaturas menores a 500°C, al igual que Hutcheon (1982) en un piloto en Canadá.

### **3.6 PRESIÓN DE PORO.**

La presión de formación o de poro. Es la presión que ejercen los fluidos contenidos en los poros de las rocas. La importancia de los fluidos y la presión de estos en los poros sobre las propiedades físicas de los yacimientos se estudian por el esfuerzo efectivo (diferencia entre los esfuerzos externos que actúan sobre la matriz de la roca y de la presión de poro). Además la presión de poro tiene un efecto sobre la resistencia de las rocas.

La presión de poro es igual en todas las direcciones y afectará sólo a los esfuerzos normales. Los esfuerzos de cizalla, que se deben a las diferencias en los esfuerzos principales, no se verán afectados. En un gráfico de esfuerzos de corte Vs esfuerzos principales causará que el círculo de Mohr se mueva a la izquierda y más cerca de las líneas de falla por cizalla y tensión. Por lo tanto, el aumento de la presión de poro puede desestabilizar una roca con respecto a la falla de corte y de tensión. (Fjaer 2008).

Cuando los crudos pesados y extra pesados son calentados por un proceso de térmico se genera una expansión de los fluidos y la roca lo cual incrementa la presión de poro. Entre mayor sea la presión de confinamiento mayor será el efecto. Factores que promueven el incremento de la presión de poro es la alta viscosidad, baja temperatura del yacimiento, baja permeabilidad y la alta presión de inyección en un proceso de inyección de vapor. La razón de que un mecanismo como este puede ser considerado es que el coeficiente expansión térmica volumétrica de los fluidos de los poros es mucho mayor que el de la roca.

### 3.6.1 Método de Butler<sup>10</sup>.

Butler (1986), presenta un modelo cuando el crudo pesado es calentado, la tendencia a expandirse de este es equilibrado por tres factores: 1. El alivio de la presión por el flujo; 2. La compresión del crudo pesado y 3. Expansión del espacio poroso. El último de estos factores consta de dos partes: La expansión elástica de los poros como resultado de un aumento en la presión de poro y, también la ruptura de los poros que se produce cuando la presión de poro excede la resistencia de la roca. En esta última circunstancia, hay un movimiento irreversible de los granos de arena.

A medida que el crudo pesado se calienta y se expande, su capacidad de flujo es pequeña inicialmente. Durante el calentamiento inicial hay expansión volumétrica apreciable, y las presiones de poro pueden subir a niveles altos.

A continuación se presenta el modelamiento propuesto:

Considerando el flujo de crudo pesado en el yacimiento en una dirección, que es calentado por conducción desde un plano a un punto  $x$  que es la distancia del plano, el flujo másico  $W$  (masa por unidad de tiempo) es dada por la ecuación de darcy

$$W = -\frac{k}{v} * \frac{\partial P}{\partial x} \quad (34)$$

El cambio del flujo másico con la distancia puede representarse por el cambio de la masa del fluido dentro del poro.

$$\frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial(\phi * \rho)}{\partial l} \quad (35)$$

De las ecuaciones 34 y 35 se obtiene

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{v} * \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial l} * \phi + \frac{\partial \phi}{\partial l} * \rho \quad (36)$$

---

<sup>10</sup>BUTLER, Roger. The expansion of tar sands during thermal recovery. 1986.

El primer término de la derecha de la ecuación (36) representa el cambio de la densidad, esto se logra con la combinación de la expansión térmica y la compresibilidad del crudo. El segundo término envuelve el efecto de la presión y la temperatura sobre el volumen del poro. El cambio de la densidad con el tiempo es mostrado por (37) donde  $C_o$  es la compresibilidad del crudo y  $\beta_o$  el coeficiente de expansión térmica.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho * C_o * \frac{\partial P}{\partial t} - \rho * \beta * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (37)$$

El cambio de la porosidad con el tiempo

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi * C_p * \frac{\partial P}{\partial t} \quad (38)$$

De las ecuaciones 36, 37 y 38

$$k * \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{v} * \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \phi * a_p * \frac{\partial \rho}{\partial t} - \phi * a_t * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (39)$$

Donde los coeficientes  $a_p$  y  $a_t$  están dados por

$$a_p = \rho * (C_o + C_p) \quad (40)$$

$$a_t = -\rho * \beta \quad (41)$$

$$C_o = \frac{1}{\rho} * \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \quad (42)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} * \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (43) C_p =$$

$$\frac{1}{\rho \phi} * \left( \frac{\partial \phi}{\partial P} \right) \quad (44)$$

Con el fin de obtener soluciones prácticas a la ecuación (39), es necesario conocer la variación de la temperatura con el tiempo y la distancia. Se supone que la conducción térmica es el único mecanismo que afecta a la temperatura y, para

la situación descrita en esta sección, la variación de la temperatura con el tiempo y la distancia viene dado por la solución bien conocida de la ecuación de Fourier.

$$T(x, t) = (Ts - Tr) * \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) + Tr \quad (45)$$

También es necesario conocer el comportamiento de la viscosidad cinemática como función de la temperatura. A través del método de Walter.

$$\log(\log(v + 0,8)) = -n * \log\left(\frac{T}{T_1}\right) + \log(\log(v_1 + 0,8)) \quad (46)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} = (v_1 + 0,8)^{10^{-n}} - 0,8 \quad (47)$$

Los perfiles (Figura 42, 43, 44) obtenidos del método anteriormente mencionado son los siguientes, para un crudo pesado para los siguientes datos:

Tabla 13. Datos para la aplicación del método de Butler.

Ts (°C)	220
Tr (°C)	13
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /seg)	5,56E-07
Xmax (m)	10
tiempo (seg)	4320000
ap	9,10E-01
at	0,62
k (m <sup>2</sup> )	1,00E-12
$\Theta$	0,15

Figura 40. Variación de la viscosidad respecto a la temperatura.

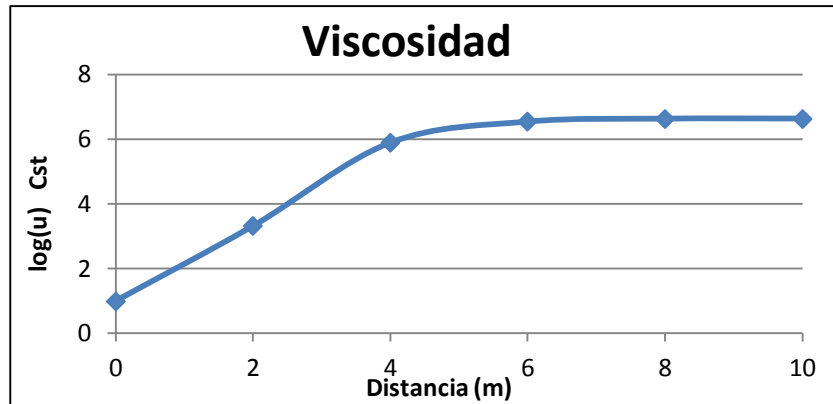


Figura 41. Variación de la temperatura en el yacimiento a partir de la cara de pozo.

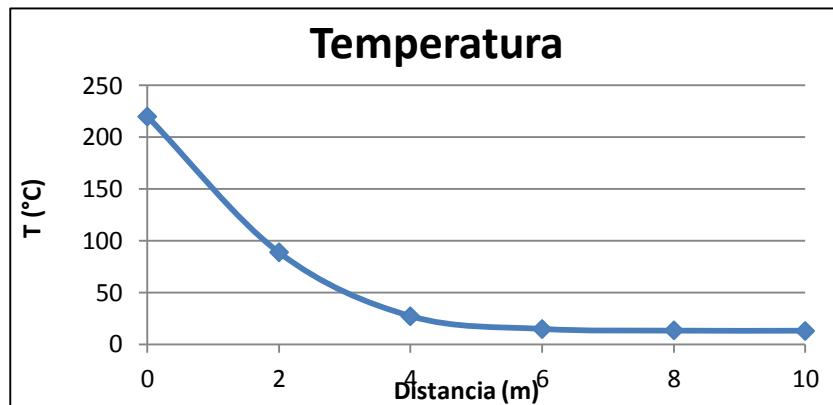
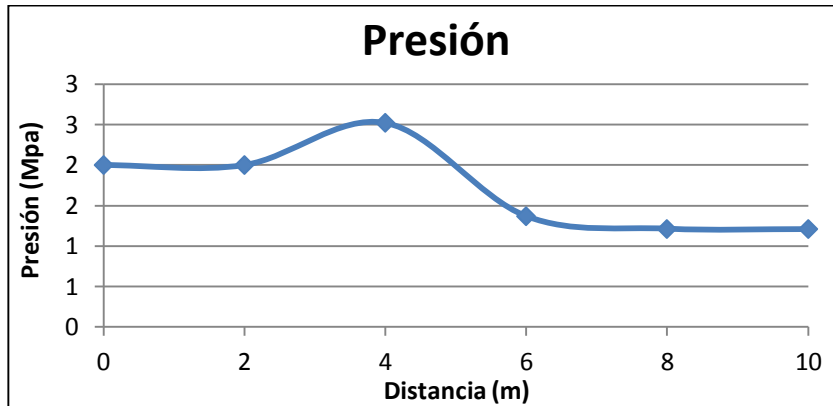


Figura 42. Variación de la presión de poro desde la cara de pozo.



### 3.6.2 Modelo de presurización de Ghabezloo y Sulem.

Ghabezloo y Sulem (2010) proponen un método para estudiar teóricamente el fenómeno de presurización térmica en rocas granulares saturadas bajo condiciones de esfuerzo isotrópico constante a nivel de laboratorio, pero inicialmente se revisará el primer modelo para el estudio de la presurización térmica Bishop and Eldin posteriormente la modificación propuesta en 2010. El fenómeno de la presurización térmica es controlado por la discrepancia entre la expansión térmica de los fluidos en los poros y la fase sólida. Este aumento en la presión del fluido de poro induce una reducción del esfuerzo efectivo y puede conducir a una falla de cizalla.

El primer modelo matemático fue propuesto por Bishop and Eldin para determinar la variación de la presión de poro debido a una carga termo-mecánica bajo condiciones no drenadas (sin flujo de fluidos a través de la muestra).

$$\Delta\mu = \beta * \Delta\sigma + \Lambda * \Delta T \quad (48)$$

Donde  $\beta$  es el coeficiente de Skempton, que representa la variación de la presión de poro por cambios en la presión de confinamiento y  $\Lambda$  es el coeficiente de presurización térmica.

$$\beta = \frac{(C_d - C_s)}{n_o * (C_f - C_s) + (C_d - C_s)} \quad (49)$$

$$\Lambda = \frac{\alpha_f - \alpha_n}{C_f + C_n} \quad (50)$$

$$C_n = \frac{1}{n_o} * [C_d - (1 + n_o) * C_s] \quad (51)$$

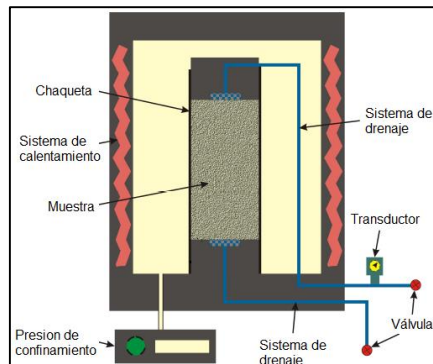
$$\alpha_n = \alpha_s \quad (52)$$

## Prueba de laboratorio

La evaluación experimental del coeficiente de presurización térmica, fue desarrollada en una prueba de calentamiento, Figura 45. En una celda triaxial, esta prueba es desarrollada en muestras totalmente saturadas bajo presiones de confinamiento constantes. Durante la prueba la temperatura es variada a tasa constante o en pasos críticos, resultando en un aumento de presión que es registrado. Por lo tanto el esfuerzo efectivo está variando constantemente. Si la compresibilidad de medio poroso es dependiente del esfuerzo, el coeficiente de presurización térmica podría ser influenciado por los cambios del esfuerzo efectivo.

Una prueba no drenada es definida teóricamente como una condición en que no hay variación de la masa del fluido en la roca. Pero esta no se logra cerrando únicamente las válvulas del sistema de drenaje. En la celda la muestra es conectada a un sistema de drenaje y también a un transductor. El sistema de drenaje experimenta cambios de volumen debido a la compresibilidad y expansión térmica. La variación del volumen del sistema drenaje y del fluido induce un flujo dentro o fuera de la muestra para alcanzar el equilibrio en la presión entre las muestras y el sistema de drenaje. La masa del fluido no cambia entre la muestra y el sistema de drenaje, se mide la presión de poro.

Figura 43. Esquema sistema de una celda triaxial.



Tomado de: Temperature induced pore fluid pressurization in geomaterials. Ghabezloo, 2010.

### Corrección del efecto del sistema de drenaje.

En las celdas triaxiales donde la prueba es realizada, la muestra es conectada a un sistema de drenaje con válvulas cerradas para alcanzar la condición de sistema no drenado, haciendo necesario un ajuste para tener en cuenta el fluido dentro de la muestra y el sistema de drenaje. Consecuentemente el modelo para determinar la variación de la presión de poro debido a un sistema termo-mecánico es:

$$\Delta\mu = Bmes * \Delta\sigma + \Lambda mes * \Delta T \quad (53)$$

$Bmes$  y  $\Lambda mes$  son el coeficiente de skemptions y el coeficiente de presurización térmica medidos.

$$Bmes = \frac{(C_d - C_s)}{n_o * (C_f - C_s) + (C_d - C_s) + \frac{V_l C_{fl} + C_l}{V_o}} \quad (54)$$

$$\beta = \frac{\Delta T_l}{\Delta T} \quad (55)$$

$$\Lambda mes = \frac{n_o * (\alpha_f - \alpha_s) + \frac{\beta (V_l \alpha_{fl} + \alpha_l)}{V_o}}{n_o * (C_f - C_s) + (C_d - C_s) + \frac{V_l C_{fl} + C_l}{V_o}} \quad (56)$$

$Bcor$  y  $\Lambda cor$  son el coeficiente de skemptions y el coeficiente de presurización térmica corregidos.

$$\Lambda cor = \frac{\Lambda mes}{1 + \frac{\beta * (V_l \alpha_{fl} - \alpha_l)}{n_o V_o * (\alpha_f - \alpha_n)} - \Lambda mes * \frac{V_l C_{fl} + C_l}{n_o V_o * (\alpha_f - \alpha_n)}} \quad (57)$$

$$B_{cor} = \frac{1}{\frac{1}{B_{mes}} \frac{V_l C_{fl} + C_l}{V_o(C_d - C_s)}} \quad (58)$$

Dónde:

C = Compresibilidad drenada del medio poroso.

$\alpha$  = Coeficiente de expansión térmica volumétrica.

n = Porosidad.

B = Coeficiente de skemptions.

$\Lambda$  = Coeficiente de presurización térmica.

VI = Volumen del fluido del sistema de drenaje.

Los subíndices de las diferentes variables son:

d = Medio poroso.

s = Fase sólida.

f = Fluido de los poros.

n = Medio poroso.

fl = Fluido del sistema de drenaje.

L = Sistema drenaje.

## **4. EFECTO EN LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS DEL YACIMIENTO POR CAMBIOS DE TEMPERATURA.**

### **4.1 PERMEABILIDAD.**

La permeabilidad es una propiedad del medio poroso que mide la habilidad o facilidad para el flujo de fluidos. La permeabilidad de la roca ( $k$ ) es una propiedad muy importante debido a que controla la dirección del movimiento de los fluidos y la tasa de flujo aportado por la formación (Tarek Ahmed 2000).

En los procesos de recuperación térmica la temperatura del fluido de los poros es diferente al de la matriz rocosa, la permeabilidad puede variar significativamente. La permeabilidad puede ser afectada por la expansión/contracción de los granos de la formación y la creación de microfracturas debido al choque térmico que causa esfuerzos térmicos.

Cuando la temperatura aumenta en un yacimiento, la roca se expande. La expansión de la roca puede afectar a la permeabilidad de dos maneras. En primer lugar, la expansión térmica de un volumen de roca será restringido lateralmente y contrarrestada por la presión de sobrecarga del yacimiento. Como resultado un esfuerzo inducido térmicamente se desarrolla dentro de la roca, la permeabilidad disminuye (Nakornthap 1986). Gray estudio el efecto del esfuerzo sobre la permeabilidad, encontrando que a mayores esfuerzos, mayor es la reducción de la permeabilidad absoluta. En segundo lugar, la expansión de los granos de la roca a temperatura elevada, puede causar un cambio en la geometría de los poros.

Somerton (1992) señala que la expansión térmica de los minerales por el aumento de la temperatura provoca la contracción de la garganta de los poros de las rocas que a su vez aumentan la tortuosidad y la formación de un factor de resistencia, por lo tanto disminuye la permeabilidad. Weinbrandt (1975) planteó la hipótesis de que el esfuerzo mecánico inducido térmicamente causado por la expansión

térmica de los granos de la roca en lugar de fuerzas interfaciales roca/fluido puede ser la fuente de los cambios observados en permeabilidades absolutas y relativas.

#### 4.1.1 Métodos matemáticos para estudiar el comportamiento de la permeabilidad con la temperatura<sup>11</sup>.

##### Ecuación modificada de Kozeny-Carman.

Este enfoque es una formulación que incorpora el efecto de la temperatura mediante la modificación de la ecuación de Kozeny-Carman en términos de variación de los parámetros por temperatura. Para esto, variaciones de porosidad, tortuosidad y superficie de los poros con la temperatura son expresados en términos de efectos de la expansión de los granos. La precisión de esta formulación está sujeta a las suposiciones inherentes a la ecuación de Kozeny-Carman. La representación idealizada de los granos de la formación porosa es de forma esférica y las trayectorias de flujo como un haz de tubos capilares cilíndricos puede no ser necesariamente la verdadera representación de las estructuras de poro complejas y los patrones de flujo encontrados en las formaciones porosas naturales.

A continuación se presenta la ecuación de Kozeny-Carman a partir de la cual se desarrolla el modelo matemático que representa el comportamiento de la permeabilidad con la temperatura.

$$\sqrt{\frac{K}{\phi}} = \frac{1}{\sum g * \sqrt{F_s \tau}} * \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right) \quad (59)$$

Donde K y  $\phi$  son la permeabilidad y la porosidad, respectivamente;  $F_s$  es el factor de forma;  $\sum g$  denota el área superficial de los granos por unidad de volumen de

---

<sup>11</sup>CIVAN, Faruk. Correlation of permeability loss by thermal induced compaction due to grain expansion, 2008.

los granos en el medio poroso y  $\tau$  es la tortuosidad del medio poroso, definido como la relación de la longitud aparente de la trayectoria de flujo y la longitud del medio poroso. A partir de la ecuación (59) Civan (2008) desarrolla el modelo matemático para describir el comportamiento de la permeabilidad con la temperatura, presentado a continuación.

$$\frac{K}{K_0} = \left( \frac{1 - (1 - \phi_0) * \exp[f(T)]}{\phi_0} \right)^{\left(3 - \frac{1}{m}\right)} * \exp\left(-\frac{4}{3}f(T)\right) \quad (60)$$

Donde  $f(T)$  es una función, dada como

$$f(T) = a(T - T_0) + \left(\frac{b}{2}\right) * (T - T_0)^2 + \left(\frac{c}{3}\right) * (T - T_0)^3 \quad (61)$$

El desconocimiento de los parámetros (a, b y c) asociados con la ecuación (61) y m, son determinados para obtener la mejor regresión de los datos experimentales.

### **Ecuación modificada de Vogel-Tammann-Fulcher.**

Enfoque que describe la dependencia de la permeabilidad de la temperatura usando las ecuaciones de Vogel-Tammann-Fulcher (VTF). Esta es una ecuación práctica produciendo información significativa acerca de la energía de activación de los efectos globales de los procesos térmicos causados por la variación de la temperatura, puede ser utilizado para la extrapolación a condiciones más allá del rango de los datos experimentales. Muchos estudios demostraron que la ecuación VTF describe con precisión el efecto de la temperatura sobre las diversas propiedades de los materiales (Civan, 2008).

$$\ln\left(\frac{K}{K_0}\right) = A * \left(\frac{1}{(T - T_c)} - \frac{1}{(T_0 - T_c)}\right) \quad (62)$$

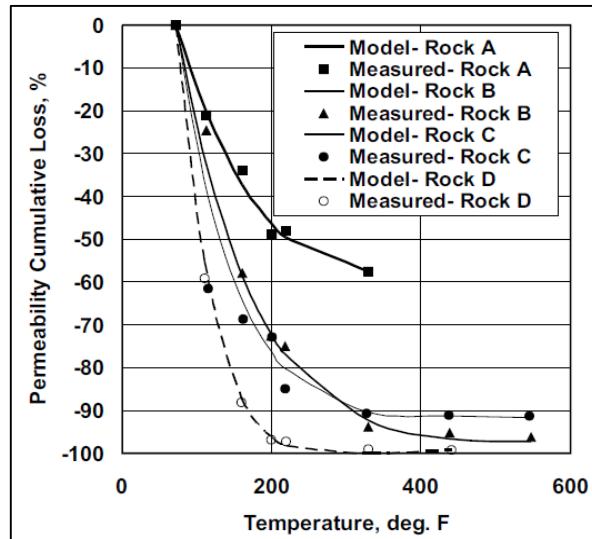
Donde  $K$  y  $K_0$  son la permeabilidad y la permeabilidad inicial respectivamente,  $T$  y  $T_c$  son la temperatura actual y la temperatura característica-limite, además  $A$  es:

$$A = -\frac{E}{R} \quad (63)$$

Donde  $E$  es la energía de activación de los parámetros de variación del proceso  $J/Kmol$  y  $R$  es la constante de los gases. Los parámetros  $E$  y  $T_c$  son determinados únicamente usando las ecuaciones método de mínimos cuadrados. En la ecuación (63) el desconocimiento de los parámetros  $A$  y  $T_c$ , son determinados para obtener la mejor grafica de una línea recta de los datos experimentales. Entonces, la energía de activación  $E$  de los procesos térmicos que causa la variación de la permeabilidad puede ser calculada a partir de (63).

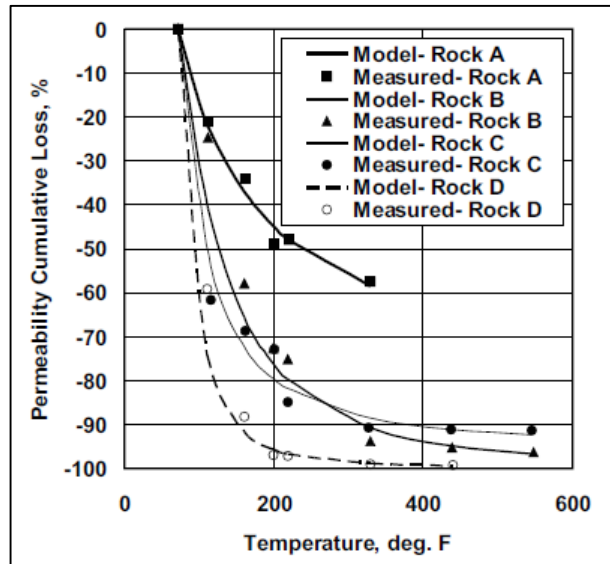
A continuación se presenta la correlación entre los datos obtenidos por Dietrich y Scott (2007) experimentalmente y los modelos de Vogel-Tammann-Fulcher (Figura 44) y Kozeny-Carman (Figura 45), los cuales se realizaron a los datos de Dietrich y Scott (2007), con el fin de demostrar la pérdida de la permeabilidad para los datos de compactación inducida térmicamente. Claramente se puede ver el ajuste de los dos métodos y por ende pueden ser usados para predecir el comportamiento de la permeabilidad con la temperatura.

Figura 44. Permeabilidad Vs temperatura para diatomitas con diferentes condiciones iniciales. Usando la correlación de Konezy-Carman.



Tomado de: Correlation of Permeability Loss by Thermally-Induced Compaction due to Grain Expansion. Civan, 2008.

Figura 45. Permeabilidad Vs temperatura para diatomitas con diferentes condiciones iniciales. Usando la correlación de Vogel-Tammann-Fulcher.



Tomado de: Correlation of Permeability Loss by Thermally-Induced Compaction due to Grain Expansion. Civan, 2008.

## **4.2 POROSIDAD.**

La porosidad de la roca es una medida de la capacidad de almacenamiento (volumen poroso) que es capaz de contener líquidos. Cuantitativamente, la porosidad es la relación del volumen poroso y el volumen total. (Tarek Amhed 2000).

Como los sedimentos fueron depositados y las rocas se formaron durante tiempos geológicos pasados, algunos espacios vacíos que se desarrollaron en la roca se aislaron del resto de los espacios por la cementación excesiva. Esto permite dos tipos distintos de porosidad.

Porosidad Absoluta: Es definida como la relación del espacio poroso total en la roca y el volumen total de la roca. Una roca puede tener una considerable porosidad absoluta y aun así no tener una conductividad de flujo por la falta de interconexión de poros. Porosidad efectiva: Es el porcentaje de poros interconectados con respecto al volumen total.

En esta sección los estudios realizados sobre el efecto de la temperatura sobre la porosidad se realizan sobre la efectiva.

### **4.2.1 Ecuación modificada de Kozeny-Carman.**

Faruk Civan (2007) partiendo de la ecuación (60) desarrollo un modelo para determinar el comportamiento de la porosidad respecto al aumento de temperatura.

Entonces a partir del coeficiente de expansión de expansión térmica volumétrica de los granos, que se puede aproximar empíricamente a través de la siguiente expresión

$$B_{gV} = a + b(T - T_0) + c(T - T_0)^2 \quad (64)$$

Y el modelo diferencial del coeficiente de expansión térmica volumétrica de los granos

$$B_{gV} = -\frac{1}{1-\phi} \left( \frac{\partial \phi}{\partial T} \right)_P + B_{bV} \quad (65)$$

Para obtener el modelo que represente la variación con la temperatura, puede ser expresada con la sustitución de la ecuación (64) en (65) e integrando respecto a la temperatura.

$$\frac{1-\phi}{1-\phi_0} = \frac{V_{b0}}{V_b} \exp[f(T)] \quad (66)$$

Donde  $V_b$  es el volumen de la roca y  $V_{b0}$  es el volumen inicial.

#### **4.2.2 Modelo del efecto termo-geomecánico sobre la porosidad.**

En los procesos de recuperación térmica (por ejemplo, la estimulación cíclica de vapor, SAGD) la temperatura del yacimiento en ciertas regiones puede aumentar considerablemente (hasta  $500 \text{ }^\circ\text{F} = 260^\circ\text{C}$ ), que a su vez induce cambios significativos en la porosidad de la roca. El tratamiento estándar de los efectos térmicos sobre la porosidad en un simulador de yacimiento térmico convencional en el que el flujo del yacimiento no está acoplado con geomecánica da lugar a una reducción de la porosidad con el aumento de temperatura. Esto se basa en las suposiciones usadas en la discretización de las ecuaciones de flujo del yacimiento a saber. (1) La compresibilidad térmica es independiente de la deformación de la

roca y (2) el volumen de roca se expande mientras que el volumen de la masa se mantiene constante. Por consiguiente, la porosidad utilizada en un simulador de yacimiento convencional no siempre da resultados correctos, como la porosidad puede no necesariamente disminuir al aumentar la temperatura. Este modelo analiza el efecto de la temperatura sobre la porosidad desde un punto de vista geomecánico. (David Tran 2008).

Esto demuestra que la llamada porosidad de yacimiento puede aumentar, disminuir o permanecer constante con el aumento de la temperatura no sólo en función del tipo de desplazamiento de las condiciones límites impuestas en el yacimiento, sino también en función de la relación de Poisson ( $\gamma$ ) y la porosidad inicial ( $\phi_0$ ), mientras que la verdadera porosidad disminuye siempre (o se mantiene constante) a medida que aumenta la temperatura en condiciones drenadas. Las ecuaciones que relacionan la porosidad se derivan del modelo termoporoelástico.

Ahora en los modelos convencionales para estudiar la porosidad asumen que normalmente disminuye cuando la temperatura aumenta. Esto es causado por la suposición de que el volumen de la masa es sin cambios, mientras que el volumen de granos sólidos aumenta con la temperatura. Por lo tanto, el volumen de poros disminuye y conduce a una reducción en la porosidad. Este argumento es correcto sólo cuando el volumen de la masa se puede mantener constante. Sin embargo, en realidad, el volumen de la masa puede también cambiar con la temperatura en función del tipo de restricciones impuestas a los límites de un bloque poroso. El caso de mayor volumen constante es sólo un caso especial en el que un bloque poroso está completamente limitado en todas las direcciones.

El modelo utilizado convencionalmente para calcular el cambio de la porosidad en el yacimiento con respecto a la temperatura en un simulador convencional es:

$$\phi^* = \phi_0 * (1 - Ct * \Delta T) \quad (67)$$

Donde  $\phi_0$  es la porosidad inicial,  $Ct$  la compresibilidad térmica y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura.

La ecuación (67) conduce a la conclusión que la porosidad del yacimiento  $\phi^*$  siempre disminuye cuando aumenta la temperatura. Sin embargo, esta conclusión no puede ser cierto cuando un simulador de yacimientos está acoplado a geomecánica que modela la variación del volumen de la masa con la temperatura. En este trabajo, las relaciones entre la porosidad y la temperatura se desarrollan dentro de un marco de geomecánica con las siguientes suposiciones:

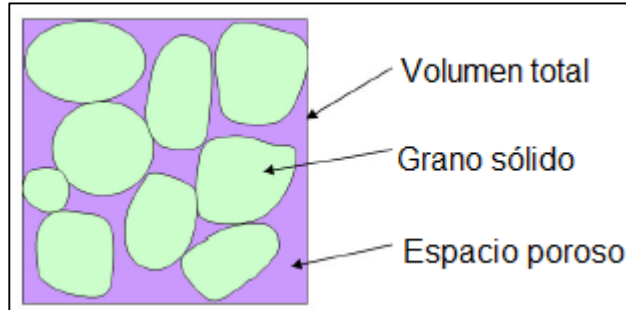
- (i) El material es lineal, isótropo y homogéneo;
- (ii) Se considera solo la matriz de la roca;
- (iii) No hay cambio en la presión de poro;
- (iv) El coeficiente de expansión térmica lineal del volumen del yacimiento y el coeficiente de expansión térmica lineal de granos son iguales ( $\beta = \beta_s$ );
- (v) Esfuerzo de tensión es positivo y el esfuerzo de compresión es negativo ( $\sigma$ );

Basado en esto, el aumento o la disminución de la porosidad se puede predecir de manera sistemática con los cambios de la relación entre la compresión térmica, coeficiente de expansión térmica y porosidad inicial puede ser establecida. El término termoporosose refiere a la influencia de los esfuerzos térmicos en la porosidad.

### **Ecuaciones constitutivas para un medio lineal termo-poroelástico.**

La figura 46, muestra un esquema de un medio poroso que incluye granos sólidos y espacio vacíos. Para un análisis simplificado se asume un tipo de medio termo-poroelástico lineal.

Figura 46 Esqueleto de un medio poroso.



Tomado de: Modelling Thermal Geomechanical Effects on Simulation Porosity. Tran, 2008.

Las relaciones constitutivas de deformación para este tipo de material pueden ser expresadas así:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} * [\sigma_{xx} - \gamma * (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})] + \frac{\Delta P}{3H} + \beta \Delta T \quad (68)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} * [\sigma_{yy} - \gamma * (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})] + \frac{\Delta P}{3H} + \beta \Delta T \quad (69)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} * [\sigma_{zz} - \gamma * (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] + \frac{\Delta P}{3H} + \beta \Delta T \quad (70)$$

Con

$$H = \frac{1}{cb - cs} = \frac{1}{\alpha cb} \quad (71)$$

$cb, cs$ ; como compresibilidad volumétrica y compresibilidad de los granos respectivamente.

Entonces para analizar el cambio de la porosidad debido a solo la temperatura tenemos la deformación volumétrica de una roca

$$\varepsilon_v = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) * \left(\frac{1-2\nu}{E}\right) + \frac{\Delta P}{H} + 3\beta\Delta T \quad (72)$$

La porosidad del yacimiento se representa por el siguiente modelo

$$\phi^* = (1 + \varepsilon_v) - (1 - \phi_0)(1 + \varepsilon_s) \quad (73)$$

Donde  $\varepsilon_s$  es la deformación de los granos

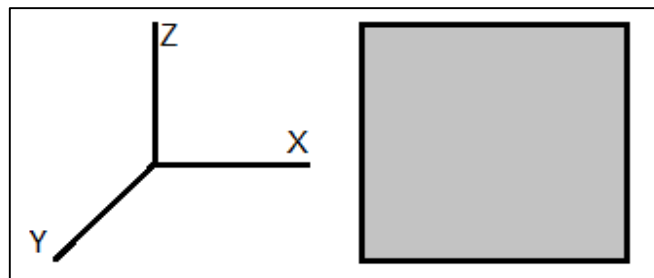
$$\varepsilon_s = 3\beta_s\Delta T \quad (74)$$

Ahora si se presentara el modelamiento del comportamiento de la porosidad para tres modelos con diferentes condiciones de fronteras que permiten estudiar el comportamiento de la porosidad con aumentos de temperatura.

### Caso 1. Límites sin restricciones.

En el caso de límites no restringidos como se muestra en la figura 49, el bloque puede expandirse libremente en todas las direcciones cuando la temperatura aumenta. Por lo tanto, los esfuerzos normales en todas las direcciones son iguales a cero.

Figura 47. Bloque poroso sin restricciones.



Tomado de: Modelling Thermal Geomechanical Effects on Simulation Porosity. Tran, 2008.

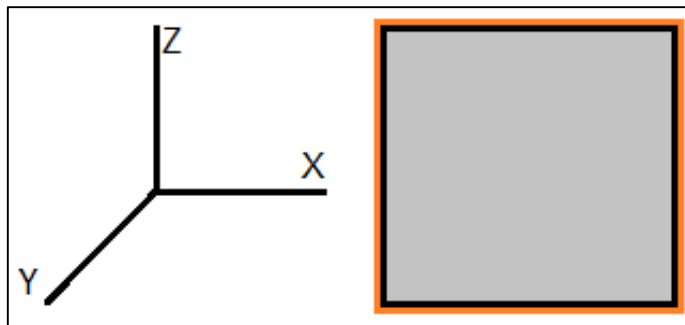
A partir de las ecuaciones (72), (73) y (74) se obtiene el siguiente modelo que representa el comportamiento de la porosidad para el bloque sin restricciones.

$$\phi^* = \phi_0 + (1 + 3\beta\Delta T) + \frac{\Delta P}{H} \quad (75)$$

### Caso 2. Límites totalmente restringidos.

En este caso, el bloque está limitado por todos lados por una pared rígida. El volumen de la masa no se puede expandir cuando la temperatura aumenta en el bloque, mientras que los granos sólidos se pueden expandir.

Figura 48. Bloque poroso totalmente restringido.



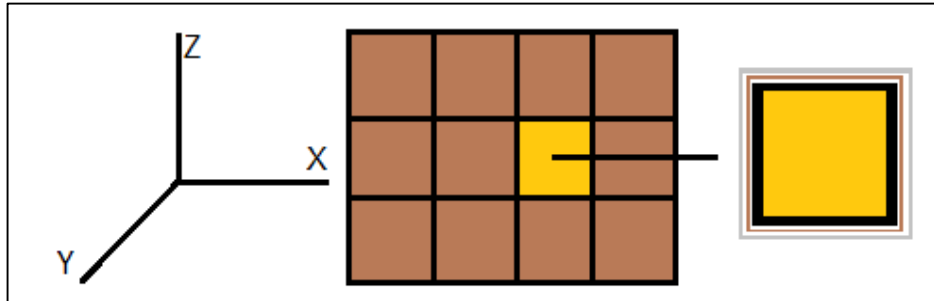
Tomado de: Modelling Thermal Geomechanical Effects on Simulation Porosity. Tran, 2008.

A partir de las ecuaciones (73) y (74) se obtiene el siguiente modelo que representa el comportamiento de la porosidad para el bloque totalmente restringido.

$$\phi^* = \phi_0 + 3\beta\Delta T(\phi_0 - 1) \quad (76)$$

### Caso 3. Bloque interno.

Figura 49 Bloque poroso dentro de un cuerpo rocoso.



Tomado de: Modelling Thermal Geomechanical Effects on Simulation Porosity. Tran, 2008.

En este caso, la deformación volumétrica del volumen de un bloque interior se puede expresar como:

$$\varepsilon_v = R(3\beta\Delta T) \quad (77)$$

Donde  $R = \frac{1}{3} * \left(\frac{1+\gamma}{1-\gamma}\right)$  es un coeficiente.

Dado que el bloque interno no está limitado por las condiciones de contorno impuestas pero limitada por sus vecinos, el bloque interno debe estar entre Caso 1 (límite sin restricciones) y Caso 2 (límite totalmente limitado). Así,  $0 < R < 1$ . Esto también significa que la deformación volumétrica del bloque interno no es totalmente fijo ni libremente expandible, pero controlada por límites.

A partir de las ecuaciones (73), (74) y (77) se obtiene el siguiente modelo que representa el comportamiento de la porosidad para el bloque interno en un cuerpo rocoso.

$$\phi^* = \phi_0 + 3\beta\Delta T(R + \phi_0 - 1) \quad (78)$$

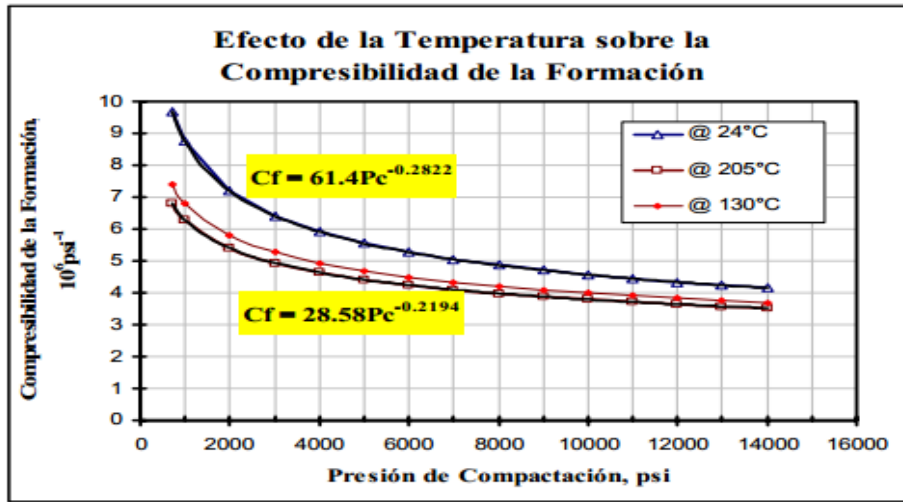
### **4.3 COMPRESIBILIDAD.**

La compresibilidad se define como el cambio de volumen con respecto a la variación de esfuerzo efectivo sobre un volumen determinado, a temperatura constante.

En un yacimiento petrolero, la compresibilidad de poro de la roca con su sistema multiporoso no es lineal y cada una de las compresibilidades es función de la presión de sobrecarga y presión de poro, además de otros parámetros como la temperatura del yacimiento y la litología. Las rocas debido a su compresibilidad tienen una deformación elástica y plástica. La primera es reversible a las condiciones iniciales mientras que la segunda es irreversible debido a que cuando se rebasa el límite de elasticidad ocurren modificaciones en la matriz de la roca.

Von Gonten y Choundhary, investigaron la influencia de la temperatura sobre la compresibilidad del volumen poroso en areniscas, encontrando un incremento de 24% en promedio cuando las mediciones eran realizadas a 205 °C comparadas con 24 °C, como se muestra en la Figura 50. Somerton también encontró que la compresibilidad aumentó con el incremento de la temperatura.

Figura 50. Variación de la compresibilidad con la temperatura.

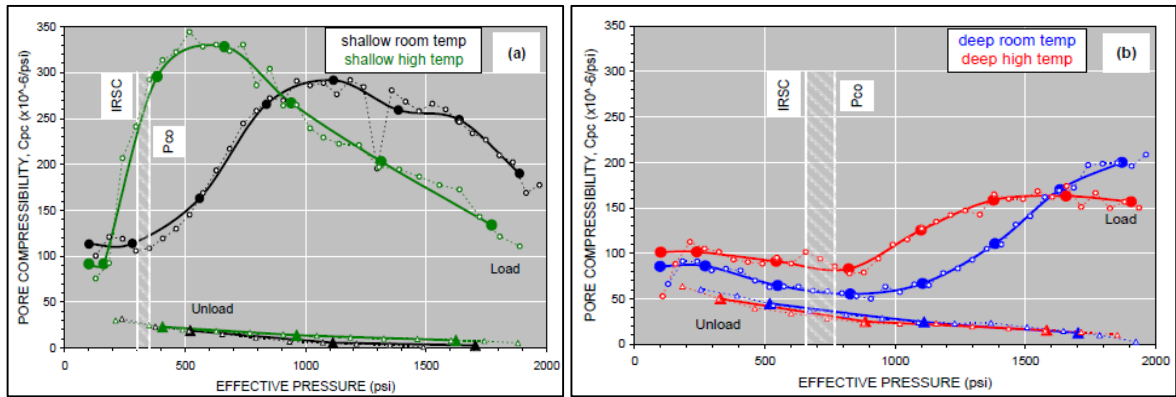


Tomado de: Geomecánica aplicada a yacimientos naturalmente fracturados para determinación de compresibilidad de la formación.

El efecto de la temperatura sobre la compresibilidad de las rocas se puede ver en las siguientes figuras en las cuales es claro que para las rocas de mayor profundidad presentan una menor compresibilidad cuando están sometidas a mayor temperatura, por consiguiente las rocas a menor profundidad al igual que las muestras profundas presentan una menor compresibilidad cuando están a temperaturas altas.

Ahora, también se puede ver el efecto del esfuerzo efectivo sobre las rocas profundas y someras. En los dos casos en los cuales a presiones efectivas bajas la compresibilidad de las rocas a mayor temperatura son mayores, pero este comportamiento cambia cuando el esfuerzo efectivo es mayor. Para el caso de la muestra somera el comportamiento cambia alrededor de unos 850 psi y para las rocas profundas alrededor de los 1600 psi.

Figura 51. Efecto de la temperatura en la compresibilidad para muestras profundas y someras.



Tomado de: Plastic Compaction in Diatomite: In Situ Stress versus Temperature Effects. Crawford, 2008.

## **5. CAMBIOS GEOLÓGICOS POR CAMBIOS DE TEMPERATURA MÁS COMUNES EN YACIMIENTOS CON VARIACIONES DE TEMPERATURA.**

### **5.1 VARIACIÓN DE LOS ESFUERZOS TÉRMICOS IN SITU Y SU EFECTO SOBRE LA ROCA SELLO Y EL YACIMIENTO.**

La roca sello se refiere a las formaciones rocosas subyacentes a los yacimientos. Normalmente es un shale, con baja permeabilidad. A veces, inmediatamente se superpone a la zona productora. En otros casos, hay una zona de amortiguación entre la roca sello y la zona productora. En la historia geológica, la roca sello, detiene la migración de los hidrocarburos y promueve su acumulación en la zona productora. Durante la explotación del petróleo, la roca sello misma juega un papel importante en la contención de los hidrocarburos. En última instancia, la integridad de la roca sello se refiere a la integridad hidráulica, es decir, los fluidos no deberían escapar a través de la roca sello. En general, la integridad hidráulica ya se ha mantenido de forma natural en la roca sello, ha impedido las migraciones de hidrocarburos hacia zonas de menor presión en la historia geológica. La deformación mecánica es inducida por las operaciones en la intervención de un campo y el potencial a fallar de la roca sello durante las operaciones térmicas que pueden introducir nuevos conductos hidráulicos y por lo tanto poner en peligro la integridad hidráulica. Por lo tanto, la integridad hidráulica se convierte en un problema de integridad mecánica. La integridad de la capa sello también está directamente relacionada con su integridad mecánica, es decir, la deformación y la falla de los estratos.

Los procesos térmicos afectan las propiedades mecánicas de las rocas y además induce un aumento en los esfuerzos in situ de la formación evidenciados en procesos que se presentan en el yacimiento como lo son el cizallamiento masivo e incluso el corte del revestimiento, además fenómenos como subsidencia o en

algunos casos de estudio de yacimientos someros colocaron en manifiesto pequeñas elevaciones de la superficie.

Dusseault (1993) propone modelos para el cálculo de los esfuerzos inducidos en los yacimientos (figura 52) por aumento de la temperatura, los cuales pueden tener un impacto importante, como se mencionó anteriormente inducir fallas de cizalla o tensión en las zonas aledañas al pozo inyector o en las zonas del yacimiento donde se encuentra el frente de desplazamiento del fluido a alta temperatura y el yacimiento a baja temperatura.

El modelo propuesto es una aproximación basada en un yacimiento de una formación de igual espesor sujeto a un calentamiento homogéneo, asumiendo que no se presenta deformación lateral. Esto es justificado de acuerdo a la ley de Hooke y el principio de esfuerzo efectivo de Terzaghi.

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} * [\Delta\sigma'_i - \gamma(\Delta\sigma'_j - \Delta\sigma'_k)] + \beta\Delta T \quad (79)$$

$$\Delta\sigma'_i = \Delta\sigma_i - \Delta p \quad (80)$$

Donde  $\varepsilon_i$  es el componente de la deformación en la dirección  $i$ , y  $E$ ,  $\gamma$ , y  $\beta$  son el módulo de Young, relación de poisson y el coeficiente de expansión lineal termoelástica, respectivamente.  $\Delta\sigma'$ ,  $\Delta p$  y  $\Delta T$  son los cambios en el esfuerzo efectivo, presión y temperatura respectivamente. A partir de los principios de las ecuaciones anteriores dedujo el siguiente modelo matemático para encontrar el aumento en los esfuerzos horizontales inducidos por aumento de la temperatura y además considera cambios en la presión de poro en el caso de una inyección de vapor.

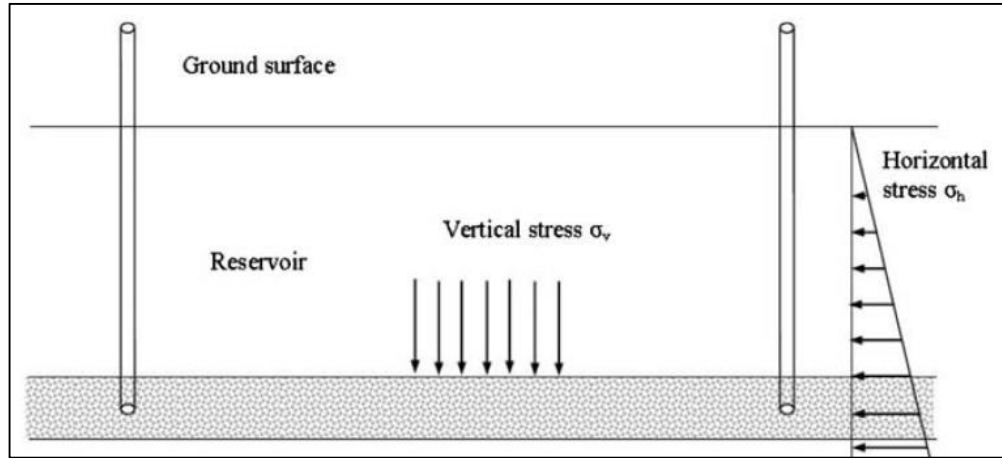
$$\Delta\sigma_h = \left(\frac{\beta E}{1-\gamma}\right) \Delta T - \left(\frac{1-2\gamma}{1-\gamma}\right) \Delta p \quad (81)$$

Por ejemplo asumiendo  $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , módulo de Young de 50 Gpa (para un carbonato), relación de Poisson de 0.25, y un coeficiente de expansión térmica de  $10 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Asumiendo que no hay cambios en la presión de poro, el esfuerzo horizontal puede incrementar 66 Mpa, suficientemente grande para permitir el cizallamiento e incluso fracturamiento de la matriz de la roca si el frente térmico puede generar deformaciones térmicas (expansión diferencial local). Las rocas sufren dilatación y cizalla en respuesta a los esfuerzos no uniformes que surgen de los cambios de temperatura que resultan en cambios en la permeabilidad y la porosidad. En procesos de inyección de vapor en yacimientos someros alrededor de los 2630 ft mostraron que el cizallamiento y la dilatación es inevitable, y cambios masivos en las propiedades toman lugar con  $\Delta T$  bajos de 60 – 80  $^{\circ}\text{C}$ .

Dusseault (2013). Presenta un ejemplo para el cual asumiendo un espesor neto de 30 m (99 ft), profundidad 500m (1640 ft) con una temperatura inicial de 25 $^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_v = \sigma_h = 12\text{ Mpa}$  (1740 psi) y presión de poro 5 Mpa (725 psi), la temperatura de equilibrio del vapor es 265  $^{\circ}\text{C}$ , así  $\Delta T = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Un coeficiente de expansión térmica con porosidad de 0,28 a 0,3 para una arenisca rica en cuarzo del orden de  $8 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  y un módulo de Young de 3 Gpa (435113 psi) y relación de Poisson de 0,25. Asumiendo un calentamiento del yacimiento homogéneo y que se calienta a 265  $^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, generaría un  $\Delta Z = 70\text{ mm}$ .

Debido a que las presiones de poro son aproximadamente constantes, hay poca dilatación relacionada por el esfuerzo térmico inducido por la restricción lateral (el efecto de compresibilidad). Por lo tanto la dilatación del yacimiento se presenta como un levantamiento, lo cual sólo puede ocurrir si se generan altos esfuerzos de cizallamiento.

Figura 52. Modelo esquemático de un yacimiento para el cálculo de esfuerzos térmicos inducidos.



Tomado de: Geomechanics of thermal viscous oil production in sandstones. Shafiei y Dusseault, 2013.

Yanguang Yuan (2011) también propone un modelo para determinar los esfuerzos inducidos térmicamente por el calentamiento de un yacimiento con un espesor neto constante e infinito lateralmente.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = - \left( \frac{\alpha E}{3(1-\gamma)} \right) * T \quad (82)$$

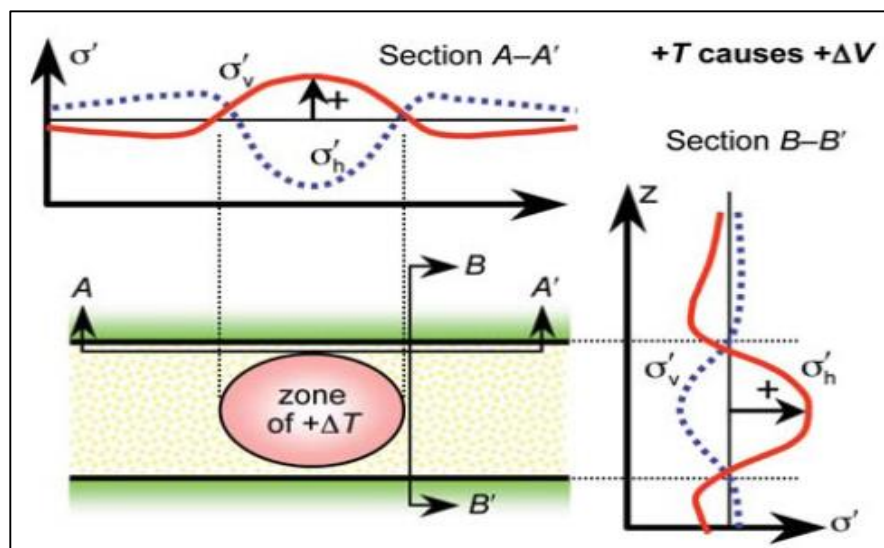
$$\Delta u_z = \left( \frac{\alpha(1+\gamma)}{1-\gamma} \right) * T h_r \quad (83)$$

Donde  $\sigma$  son los esfuerzos,  $E$  módulo de Young,  $\alpha$  coeficiente de expansión térmica,  $\gamma$  relación de Poisson,  $T$  temperatura,  $h_r$  espesor neto y  $T$  la temperatura.

Incrementos en la presión de poro junto con esfuerzos térmicos pueden causar variaciones en los esfuerzos horizontales y en la parte superior del yacimiento y un incremento del esfuerzo de sobrecarga como se puede apreciar en la figura 53 (Dusseault et al 2007). En esta figura se puede apreciar, que en el tope de la

cámara formada en un proceso de vapor (línea A-A'), el esfuerzo vertical aumento debido a la expansión vertical; mientras que el esfuerzo mínimo horizontal disminuyo debido a una deformación extensional. Ahora los lugares adyacentes (línea B-B'), el esfuerzo vertical disminuye; mientras el esfuerzo horizontal mínimo efectivo aumenta.

Figura 53. Variación esfuerzos en zonas calentadas.



Tomado de: Seismic monitoring and geomechanics simulation. Dusseault, Yin al et, 2007.

Así la anisotropía de esfuerzos es inducida alrededor de la zona calentada. Esta anisotropía de esfuerzos se puede visualizar con mayor facilidad en un diagrama de esfuerzos 2D usando trayectorias de esfuerzos y flechas para los esfuerzos principales Figura 55. Esto también puede explicarse imaginando que la zona calentada es un globo que se expande dentro de un material frágil. Todos los esfuerzos en la dirección de expansión (compresión) aumentan, pero los esfuerzos paralelos al globo deben disminuir debido a que la roca se dilata o expande. Esta deformación extensional no significa que necesariamente los

esfuerzos de cizalla son generados, pero si indica que una anisotropía de esfuerzos se desarrolló.

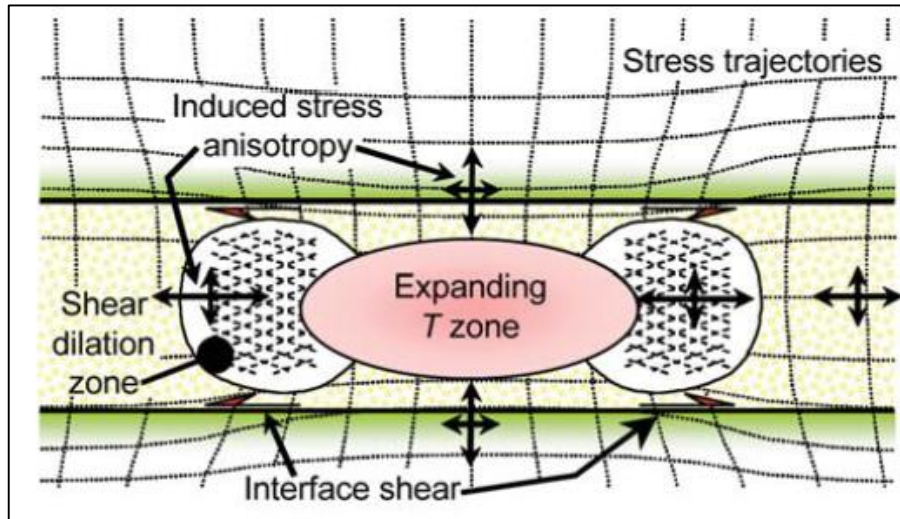
Figura 54. a) Falla por tensión y b) falla por cizalla, iniciada después del proceso de calentamiento.



Tomado de: Impact to thermal pore pressure on the caprock integrity during the SAGD operation. Yang and Xu, 2013.

El incremento de la anisotropía de esfuerzos significa que el cizallamiento y la dilatación pueden generarse. El cizallamiento se produce en areniscas de alta porosidad ( $\phi > 0,25$ ) y para relaciones de esfuerzos efectivos  $\sigma_1/\sigma_3$  entre 3,5 a 4,5 o más, pero algunas simulaciones sugieren que un  $\Delta T$  de 40-60°C puede generar cizallamiento en areniscas no consolidadas (baja cementación). Ahora en los procesos de inyección de vapor el cambio de temperatura en el yacimiento es mayor al rango estipulado por Dusseault (2007) y bajo este parámetro en estos procesos puede generarse un cizallamiento masivo del yacimiento. Esto también puede causar pérdidas de casing por corte, pero esto también puede ser beneficioso desde el punto de vista que puede fracturar capas de areniscas que se encuentran intercaladas dentro de la zona productora permitiendo drenaje vertical mayor, lo cual mejora las tasas de producción.

Figura 55. Trayectorias de esfuerzos y cizallamiento



Tomado de: Seismic monitoring and geomechanics simulation. Dusseault, Yin et al, 2007.

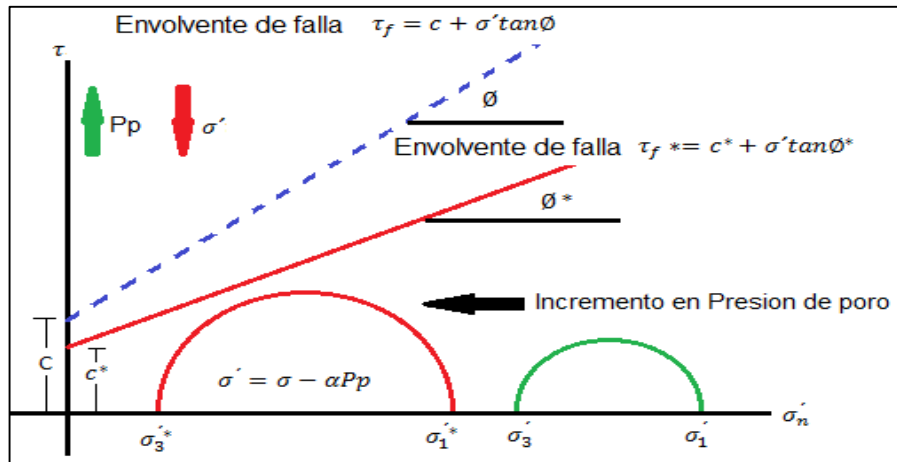
En la figura 55, la localización de los esfuerzos de cizalla máximos están localizados sobre la interface y están indicados por los símbolos de cizalla y las regiones sombreadas (achuradas) son las zonas de cizallamiento y dilatación generada en frente de la zona térmica adyacente. Ahora si se genera una disminución de la temperatura de forma abrupta esto permitiría cambios en los esfuerzos y fallas por tensión debido a la contracción de la roca por la disminución de temperatura.

## 5.2 ESFUERZOS INDUCIDOS POR AUMENTOS DE TEMPERATURA Y AUMENTO DE LA PRESIÓN DE PORO EN UNA INYECCIÓN DE VAPOR.

El impacto del cambio de los esfuerzos puede ser representado a través del criterio de falla de Mohr Coulomb, en la figura 56. En este caso se realizará el análisis para un proceso de inyección de vapor, en el cual se encuentran relacionado el aumento de la presión de poro por el vapor inyectado a su vez el

incremento de la temperatura en el yacimiento y como se observara en la roca sello. En la figura 56, tenemos que  $\sigma'$  es el esfuerzo efectivo,  $P_p$  la presión de poro,  $C$  cohesión del material,  $\alpha$  coeficiente poroelástico de Biot y  $\phi$  ángulo de fricción interna. Las variables con \*, son aquellas que son afectas por el aumento de temperatura.

Figura 56. Cambios en los esfuerzos y en la resistencia de la roca.



Tomado de: Caprock Integrity Analysis in Thermal Operations: An Integrated Geomechanics Approach. Khan, Hun et al, 2011.

La línea azul representa la envolvente lineal de falla por cizalla de Mohr Coulomb, es decir, la resistencia del material. Típicamente determinada de pruebas triaxiales en corazones. La figura 56, muestra el uso del criterio de falla de Mohr Coulomb para entender el efecto del incremento de la presión de poro y la temperatura en las operaciones de recuperación térmica.

El círculo verde representa el estado virgen de los esfuerzos in situ antes de la inyección y está lejos de la envolvente de falla. Cuando la inyección empieza el yacimiento sufre ciertas alteraciones que serán analizadas a continuación:

1. Un aumento en la presión de poro causa una disminución en el esfuerzo efectivo mínimo, moviendo el círculo a la izquierda, acercándose a la envolvente de falla, aumentando el riesgo de la falla por cizalla. (En este caso el círculo se desplaza con el mismo radio)

2. Un incremento en la presión de poro causa un aumento en los esfuerzos totales. En un yacimiento normal, ya que el material está confinado por el material adyacente lateralmente, la deformación en la dirección lateral puede llevar a un aumento en los esfuerzos laterales. Mientras deformación en la dirección vertical puede ser compensada en la forma de un levantamiento en la superficie. Estas condiciones causan un aumento en el esfuerzo total en la dirección lateral considerablemente, mientras que en la vertical solo un pequeño cambio por el vapor inyectado. Esto causa que el círculo de Mohr se haga más grande y que se mueva hacia la izquierda e incluso puede llegar a tocar la envolvente de falla.

3. Como se describió previamente, un incremento en la temperatura crea esfuerzos térmicos que cambian el esfuerzo total. Este efecto cuando es combinado con los cambios en los esfuerzos causa que el círculo de Mohr se haga más grande y se desplace a la izquierda como se ve en la figura 56, donde los esfuerzos efectivo máximo y mínimo son alterados debido a la inyección de vapor.

4. El vapor genera el crecimiento de un frente de vapor, primero el frente a altas temperaturas cuando toca la capa shale ocurre una deshidratación. Esto puede crear microfracturas en la capa, aumentando la permeabilidad y deteriorando la integridad hidráulica del sello. Si el vapor alcanza el shaley entra en la microfracturas e incrementa el contenido de agua en él, esto causa una disminución de la cohesión y del ángulo de fricción interna (Khan 2011). Este fenómeno puede reducir la resistencia de cizalla como muestra la figura 56. La

línea roja representa la envolvente de falla alterada, además es evidente la reducción de la resistencia de cizalla.

## **5.3 COMPACTACIÓN TÉRMICA.**

### **5.3.1 Compactación.**

Un medio poroso, tal como una formación productora que contiene fluidos dentro de su estructura sólida. Pero conforme se acumula más sedimentos, la capa inicial debe soportar el peso de nuevo material suprayacente compactando la formación y haciendo que la formación expulse fluidos, además reduciendo la porosidad de la misma. Este fenómeno se observa durante todo el proceso geológico de depositación de una zona, dando lugar a la compactación normal de una columna estratigráfica.

El resultado de tener un fluido presurizado en un ambiente sólido en el cual tanto como el material como el fluido soportan los esfuerzos. Cuando se produce fluido desde un yacimiento, el peso de sobrecarga de los estratos suprayacentes no se reduce pero la presión de poro si de reduce, lo que incrementa el esfuerzo efectivo vertical que actúa sobre la matriz sólida. El grado de la compactación resultante de la compresibilidad de la roca y condiciones de las formaciones adyacentes.

La compresibilidad relaciona los cambios de volumen con los cambios del esfuerzo aplicado, es decir, la compresibilidad del volumen de poros es una medida del cambio del volumen poroso, causado por un esfuerzo aplicado. La compresibilidad de una arenisca granular competente es aproximadamente de  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Mpa}^{-1}$  ( $3 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ ).

Es difícil detectar la compactación de un yacimiento de hidrocarburos, pero como consecuencia de esta se presenta subsidencia en la superficie, siendo el indicador

principal de la compactación del yacimiento. La compactación también ha sido reconocida como un importante mecanismo de accionamiento en Alberta y Venezuela en yacimientos de aceites pesados. En este caso, el problema se complica aún más por los aspectos térmicos y por la naturaleza no consolidada de los medios porosos. Las consecuencias de la compactación se hacen presentes tanto dentro como fuera del yacimiento, la más evidente es la deformación de la superficie, cizallamiento de casing, reactivación de fallas, reducción de porosidad, permeabilidad y por consiguiente pérdida de productividad.

Los Problemas de compactación/subsistencia se puede esperar en las formaciones "blandas" o no consolidado y los yacimientos de caliza, que estén sobrepresionadas o serán severamente depletadas y de un gran espesor. Debido a que la mayoría de las deformaciones son irreversibles, es difícil de corregir el efecto negativo se produce después de la compactación.

### **Modelamiento matemático de la compactación térmica.**

Los modelos constitutivos presentados hasta ahora han dejado de lado los efectos térmicos sobre el comportamiento de esfuerzo/deformación. En determinados materiales del yacimiento, esto puede no es válido. Coussy ha presentado una breve descripción de la incorporación de los efectos térmicos en el dominio de elasticidad para una formulación termoporoelastoplástica general. En resumen, la ecuación que gobierna la energía libre de un sistema se modificó para incluir los efectos térmicos en el parámetro de endurecimiento que rigen la evolución del dominio elástico. Por lo tanto, los cambios de temperatura se incorporan en una función de carga en general, lo que puede causar el endurecimiento térmico y deformación plástica (dependiendo de la dirección del cambio de temperatura). Esta formulación rigurosa se simplificó y se aplica al modelo elástico no lineal descrito anteriormente. Las modificaciones a la formulación elástica no lineal se describen a continuación.

La formulación modificada termoporoelástica (compresión es negativo).

$$\sigma_{ij} = 2G \left[ \varepsilon_{ij} + \frac{\gamma}{1-2\gamma} * \left( \varepsilon_v - \frac{1+\gamma}{\gamma} \alpha_L T \right) \delta_{ij} \right] - \alpha p \delta_{ij} \quad (84)$$

Donde  $\sigma_{ij}$  y  $\varepsilon_{ij}$  = esfuerzo total y componentes de la deformación,  $p$  y  $T$  = presión de poro, y temperatura y  $\alpha$  = constante de biot.

La ecuación 84 se modificó para incluir los términos asociados con la compactación y el endurecimiento térmico (Settari 2001). El siguiente modelo se utiliza para representar la deformación para un incremento en la temperatura.

$$\alpha_{comp} = K_a \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{na} \quad (85)$$

Aquí,  $K_a$  y  $n_a$  describen la forma de la curva de compactación térmica (como una función de la temperatura), y  $T_{ref}$  una temperatura de referencia (por lo general la temperatura inicial del yacimiento o ambiente). La variable  $\alpha_{comp}$  representa esencialmente el mismo comportamiento del material como el coeficiente de expansión térmica lineal, a pesar de que  $\alpha_{comp}$  puede tener un signo diferente y es una función no lineal de la temperatura. La formulación termoporoelástica (ecuación 84) se modifica de modo que  $\alpha_L$  se sustituye con la suma de la expansión térmica y los efectos de compactación del material.

$$\alpha_{comp} = \alpha_L + \alpha_{comp} \quad (86)$$

Se espera que ocurra cualquier compactación térmica (una compresión plástica no recuperable de la matriz) podría inducir el endurecimiento de los módulos de Young y volumétrico del material.

$$E_i = K_e p_a \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{ne} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{me} \quad (87)$$

$$B_m = K_b p_a \left( \frac{\sigma_m}{p_a} \right)^{nb} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{mb} \quad (88)$$

Una modificación de los módulos se producirá sólo cuando el yacimiento se calienta o se enfría desde la temperatura de referencia inicial. Los exponentes  $nb$  y  $mb$  describen la forma del módulo multiplicador.

El cambio en el espesor del yacimiento,  $\Delta h$ , es dado por la deformación vertical  $\varepsilon_v$  y el espesor del yacimiento ecuación 89. Ahora suponiendo que la variación del espesor refleje en superficie el mismo cambio suponiendo que todas las capas suprayacentes al yacimiento sufren el mismo desplazamiento verticalmente manteniendo su espesor.

$$\Delta h = -\varepsilon_v * h \quad (89)$$

También es posible determinar la variación del yacimiento a través de la ecuación 90, en la que se involucran otros parámetros como el módulo de Young  $E$ , relación de Poisson ( $\gamma$ ), la presión de depleción del yacimiento ( $\Delta P_f$ ) y el coeficiente de biot ( $\alpha$ ).

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{E} * \frac{(1+\gamma)(1-2\gamma)}{1-\gamma} \alpha * \Delta P_f \quad (90)$$

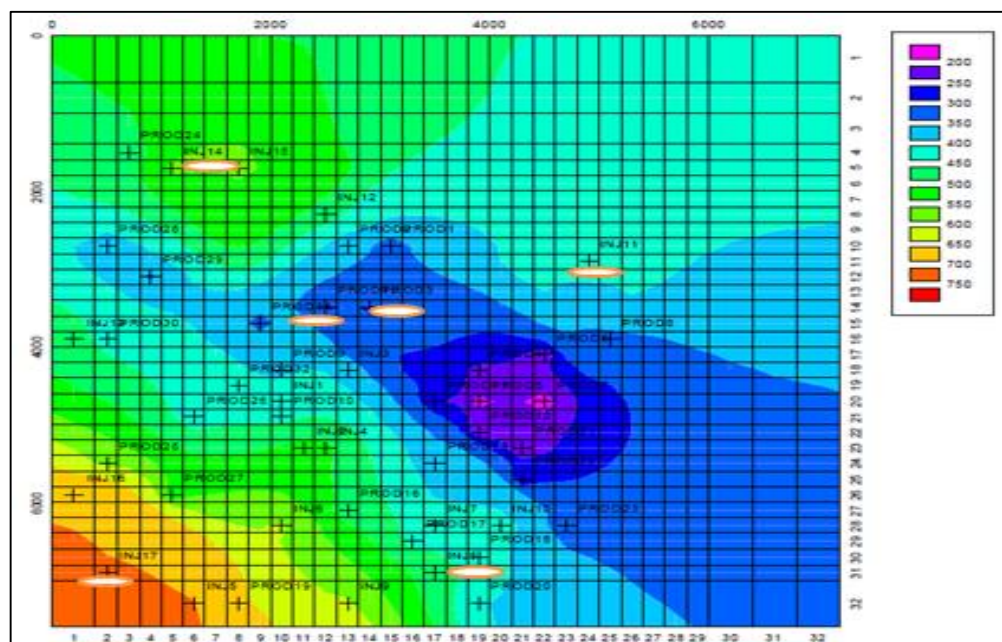
### 5.3.2 Ejemplo de aplicación de la compresibilidad térmica.

La sensibilidad térmica en campo de crudo pesado. El siguiente ejemplo ilustra los efectos térmicos causados por inyección de vapor en un yacimiento de crudo pesado, desarrollado por Settari y Walter (1999). El campo consiste de un plano, en un sistema de cinco capas con 32 pozos de producción intercalados con 17 agua y los inyectores de vapor.

La simulación completa del campo consistió en un período de producción/inyección de 10 años. Todos los pozos se restringieron con tasa constantes para el período de simulación completo. Los pozos de producción se establecieron para producir 450 barriles al día, con una presión de fondo mínima (BHP) de 15 psi. Los inyectores de agua se establecieron a 650 BWPD (en Tinyección =Tyacimiento= 123 °F), y los inyectores de vapor se establecieron a 1000 BWPD (0,8 calidad del vapor en Tiny = 550 °F).

A continuación se presentan las gráficas en las cuales se podrá observar la variación de la presión y la temperatura del yacimiento. De los resultados obtenidos en la figura 57, se puede ver claramente como las zonas de color fucsia se tienen las menores presiones del yacimiento, puesto que allí se encuentran ubicados varios pozos de producción cercanos generando el perfil de presiones.

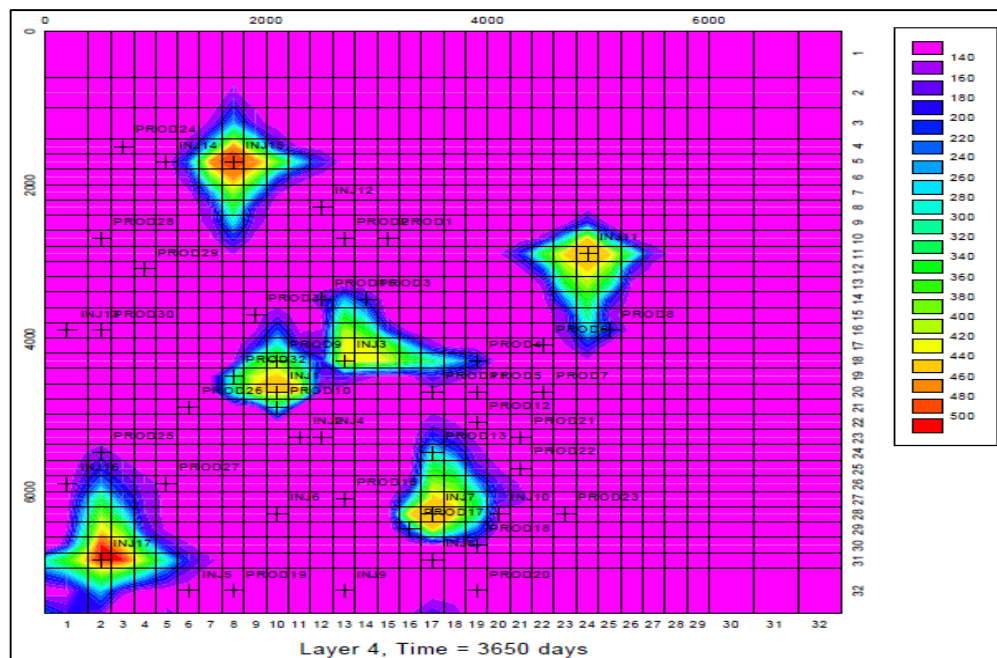
Figura 57. Distribución de presión (psi) en 10 años.



Tomado de: Advances in Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling with Applications to Reservoir Compaction. Settari y Walter (1999).

Ahora como era de esperar las zonas con mayor temperatura en yacimiento es precisamente el sector en el cual se encuentran los pozos inyectores.

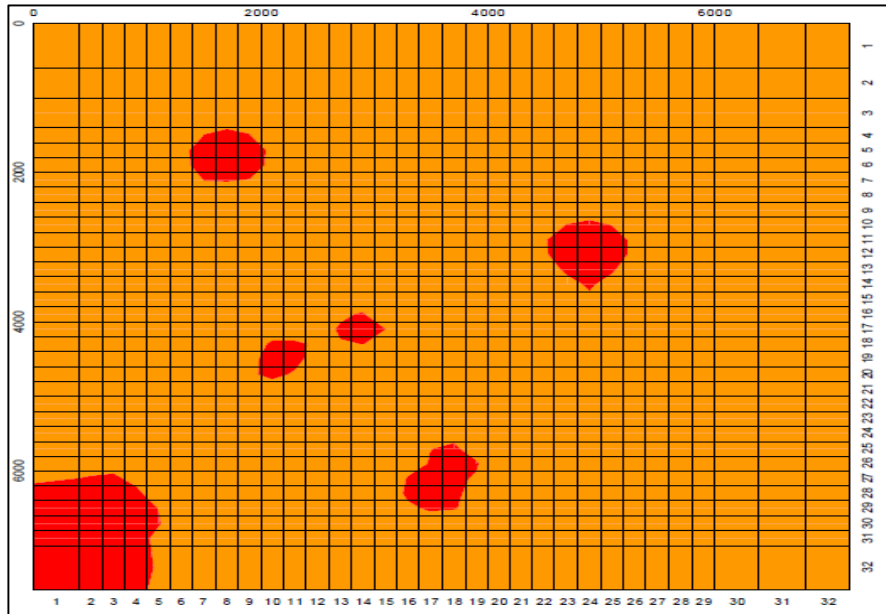
Figura 58. Distribución de temperatura (°F) después de 10 años.



Tomado de: Advances in Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling with Applications to Reservoir Compaction. Settari y Walter (1999).

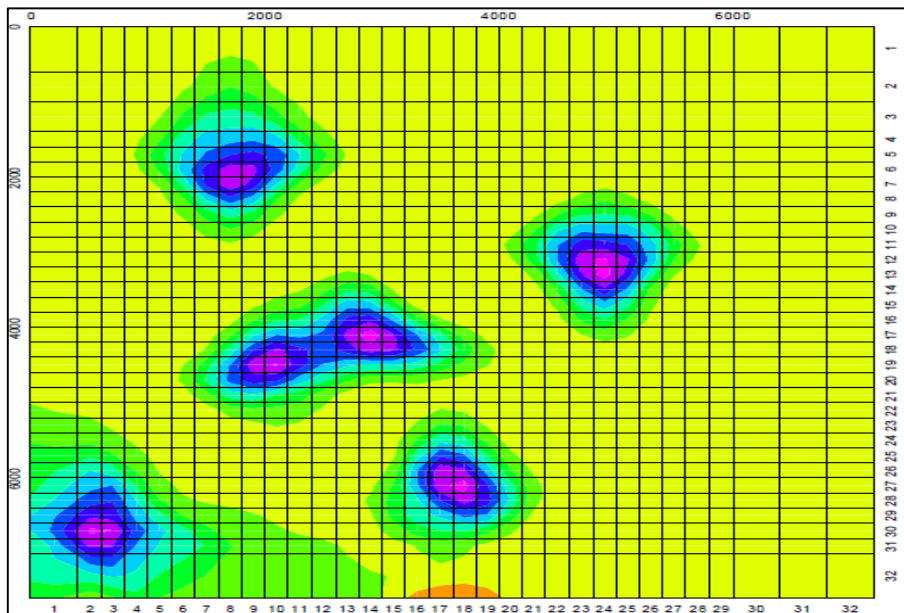
Finalmente se presentan los resultados del modelo incluyendo el efecto  $\alpha_{comp}$  que es la suma de la expansión térmica y los efectos de compactación del material. Los modelos convencionales solo tienen en cuenta la expansión térmica de la formación. A continuación se presenta los resultados de un modelo teniendo en cuenta solo la expansión térmica de la formación figura 59, con una compactación total de 66 centímetros. El segundo modelo teniendo en cuenta los efectos de la compactación y el la expansión térmica, ecuación 86 que incluye la modificación de propuesta por (Settari 1999) con una compactación total de 1,12 metros (figura 60).

Figura 59. Compactación del yacimiento solo considerando la expansión térmica.



Tomado de: Advances in Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling with Applications to Reservoir Compaction. Settari y Walter (1999).

Figura 60. Compactación considerando la modificación de Settari.



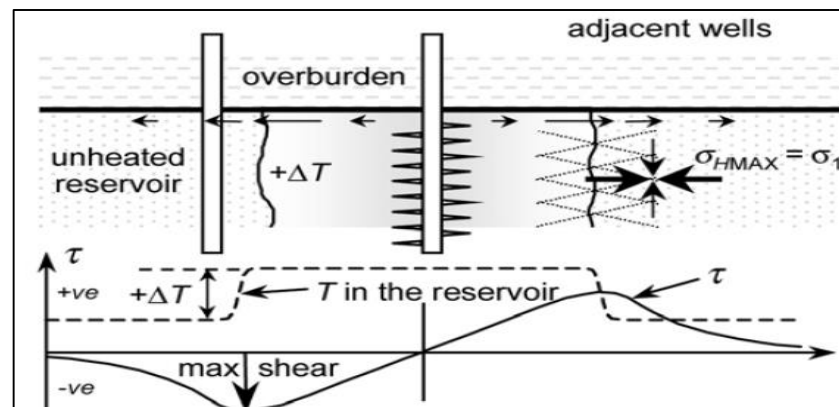
Tomado de: Advances in Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling with Applications to Reservoir Compaction. Settari y Walter (1999).

#### 5.4 Cizallamiento del casing en los procesos térmicos.

Procesos térmicos como inyección de vapor puede implicar valores de temperatura tan grandes como 250°C; cambios de temperatura más altos están asociados con combustión in situ. El coeficiente de expansión térmica típico de una arenisca de alta porosidad es  $6-8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; por lo tanto, una expansión de 0,2% en volumen es razonable. Debido a que los geomateriales in situ son rígidos con  $E > 5 \cdot 10^6 \text{ GPa}$  ( $7,25 \cdot 10^5$ ) generalmente (Dusseault y Bruno 2001), las expansiones incluso son mucho más pequeñas y pueden llevar a grandes cambios de esfuerzo y cizallamiento (shear slip).

Considerando un caso de calefacción por convección masiva de una zona en un yacimiento de arenisca como se muestra en la figura 61. La expansión de la roca genera mayores esfuerzos en algunas direcciones, disminuyendo los esfuerzos en otros. El esfuerzo dirigido lateralmente, aumenta a medida que la zona de expansión se ve limitada por la roca circundante. La condición  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$  se genera, y una falla de empuje de ángulo bajo (thrust fault), estas condiciones se puede alcanzar en la roca sin calefacción en el avance del frente térmico.

Figura 61. Cizallamiento inducido en una inyección térmica.



Tomado de: Casing Shear: Causes, Cases, Cures. Dusseault y Bruno, 2001.

Por otra parte, la incompatibilidad de deformación y cizallamiento se desarrollan en las interfaces superiores e inferiores. El yacimiento se calienta rápidamente a causa de la transferencia de calor por convección y los estratos de baja permeabilidad se calientan muy lentamente a través de la conducción. Concentraciones del esfuerzo de cizalla surgen a través de la interfase entre las dos formaciones, y el deslizamiento se produce cuando se supera la resistencia del material. La zona de cizalla/deslizamiento es más intensa en la parte frontal del frente térmico con un gradiente de temperatura alto, y en el caso de un pozo vertical simétrico, la concentración del esfuerzo de cizalla inducido a lo largo de la interfaz en el pozo de inyección será pequeño (figura 61). El peor de los casos para el cizallamiento de los pozos vecinos en un proyecto térmico probablemente surge en la inyección de vapor continua, ya que toda la deformación es forzada hacia el exterior a lo largo del frente. En estimulación cíclica de vapor en pozos individuales conduce a menores concentraciones del esfuerzo de cizalla en los flancos y propagación más lenta debido a los efectos de la difusión radial.

Si un proyecto térmico también implica la inyección de alta presión, y con la excepción de un proceso SAGD, hay una mayor posibilidad de cizallamiento del casing. Los efectos de expansión térmica generan grandes esfuerzos de cizalla (corte), mientras que las altas presiones de poros reducen los esfuerzos efectivos a través de los posibles planos de falla. Dado que el diferencial de deformación térmica asociada con los frentes de avance de temperatura también tiende a generar fallas de grano a grano afectando la cohesión mineral, el potencial de deslizamiento de cizallamiento es aún mayor. La inyección de vapor también implica altas presiones que pueden migrar a lo largo de la interfase cemento/roca de los pozos a mayor altitud, ayudando al deslizamiento (slip) en las zonas menos profundas a lo largo de planos de debilidad (por lo general los planos de estratificación). La falla del casing combinada con los esfuerzos térmicos y la corrosión es común en los proyectos térmicos, haciendo que las pérdidas de alta presión en elevaciones más altas incluso más común.

## **6. CONSIDERACIONES DEL IMPACTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN YACIMIENTO DE HIDROCARBUROS SOMETIDOS A RECUPERACIÓN TÉRMICA.**

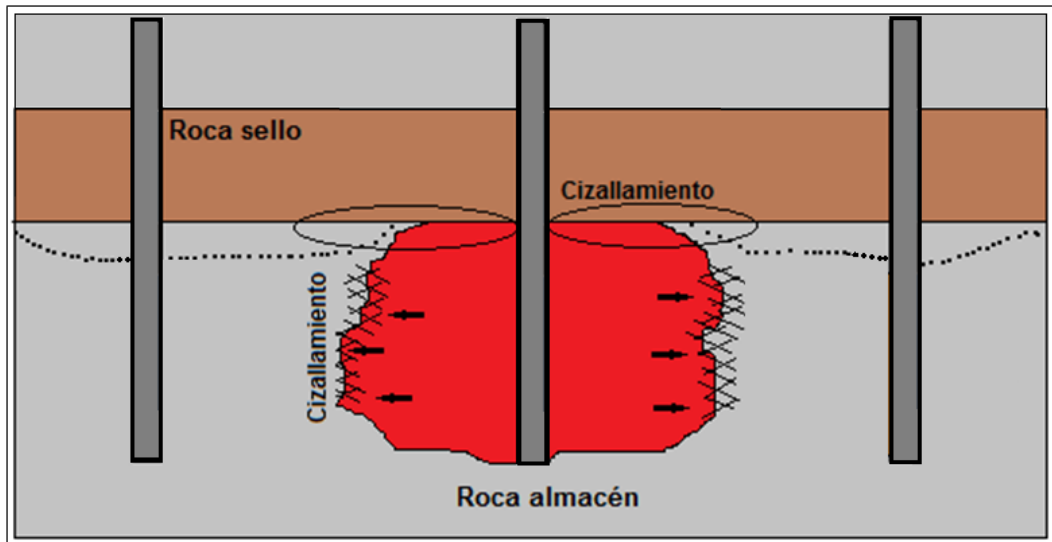
### **6.1 EL MÓDULO DE YOUNG (E).**

Es una medida de la rigidez de la roca. A mayor valor de E, mayor es la rigidez de la roca. Esta constante afecta directamente a la propagación de la fractura, a valores bajos se induce una fractura ancha, corta y de altura limitada; mientras que a valores grandes resultan en una fractura angosta, alta y de gran penetración horizontal.

La importancia radica en los procesos térmicos en la zona del frente de mayor temperatura, debido a que en este sector es donde está en contacto la parte caliente y fría del yacimiento, debido a la expansión térmica de la roca y de los fluidos se inducen los mayores esfuerzos de cizalla, si estos superan la resistencia de la roca se generará una falla de corte. Entonces si la falla se produce en el límite de contacto entre la roca sello y la roca almacén con un módulo de Young alto la fractura tendrá un crecimiento incontrolado que afectará la roca sello y por ende afectará la estabilidad hidráulica y el mantenimiento de presión del yacimiento que afectara la productividad del yacimiento.

Otra cosa que debe considerarse es que si el módulo de Young aumenta, la fragilidad de la roca también, es decir, la facilidad para que la roca se fracture es mayor por el aumento del módulo elástico.

Figura 62. Configuración general del yacimiento bajo un proceso térmico.



Considerando que para los estudios más recientes en los cuales consideran el efecto de esta propiedad no es claro el comportamiento de la misma, por ejemplo para Ranjit hasta 500 °C y Rao ( $T \leq 250^{\circ}\text{C}$ ) el módulo aumentó con incrementos en la temperatura para areniscas (figura 26), en este caso las fracturas que se generen en el yacimiento para un régimen de esfuerzos rumbo deslizante e inverso se generaría en dirección del esfuerzo horizontal pero el crecimiento en altura de la fractura es en la vertical, si estas se generan cerca del contacto entre la roca sello y almacén, podría generarse una afectación de la roca sello induciendo pequeñas microfracturas o fracturas en la roca sello pero posiblemente esta no afectaría el espesor total de la roca sello y por tanto la integridad hidráulica del yacimiento tampoco. Ahora en el caso que el régimen sea normal la fractura se propagaría verticalmente, puesto que en esta dirección se encontraría el esfuerzo máximo y por ende la integridad hidráulica del yacimiento se afectaría causando una migración de fluidos a través de esta, por lo tal la presión disminuiría teniendo un efecto negativo sobre la productividad. Pero también autores como Meibner, Rao ( $T > 250^{\circ}\text{C}$ ) y Wu encontraron que el módulo de Young disminuye con la

temperatura y para este caso en específico teniendo en cuenta que para módulos de Young bajos la fracturas generadas son anchas, angosta y de poca penetración no afectarían la integridad hidráulica del yacimiento.

Los procesos de generación de fracturas y microfracturas cuando se presenta dentro del yacimiento son beneficiosos, desde el punto de vista de productividad puesto que aumenta la permeabilidad y porosidad, facilitando el flujo de fluido a través de la roca.

Ahora considerando los resultados obtenidos para dos areniscas en laboratorio se observó la reducción del módulo elástico en ambas muestras. En el caso específico de la formación A, la reducción del módulo de Young (promedio) para la muestra sometida a un proceso de calentamiento durante 15 días a una temperatura de 500°C fue del 82,5% (Tabla 4) y para la formación C una disminución del 5,42 (Tabla 5). La diferencia puede justificarse por la diferencia en la composición. Por ejemplo para la formación A el contenido de cuarzo es del 90% y arcillas del 5%, en cuanto la formación C el contenido de cuarzo es del 74% y arcillas del 21%.

## **6.2 LA RELACIÓN DE POISSON.**

Relación de Poisson representa la maleabilidad de los materiales geológicos a deformarse. Para un material isotrópico elástico perfectamente incompresible, este es igual a 0,5. Una medida de la resistencia de una roca es coeficiente de Poisson. La relación de Poisson baja (0,1 a 0,3), es para la mayoría de areniscas y carbonatos. Estas rocas se fracturan con relativa facilidad. Coeficientes de Poisson altos (de 0,35 a 0,45) para shale y rocas areniscas muy arcillosas. Estas rocas son más elásticas y difíciles para fracturar. Una disminución en la relación de Poisson de una roca se refleja en un aumento en la fragilidad de la roca que representa la facilidad para que esta falle.

Dado que el comportamiento de esa propiedad mecánica no ha sido muy estudiada y no es posible determinar cómo esta propiedad puede o no afectar un yacimiento durante un proceso térmico, puesto que la información es limitada y no es concluyente, sin embargo en la figura 23b, se puede observar la variación de la relación de Poisson, de la cual se puede observar que de forma general esta relación disminuye para cuatro muestras con el aumento de temperatura para areniscas y lodolitas, pero para una arenisca se observa un incremento hasta 200°C y luego disminuye.

Analizando los datos obtenidos en laboratorio para dos muestras se pudo observar lo siguiente: la relación de Poisson para la formación A, presentó un aumento del 12% y para la formación C se observó una disminución de 41%. Lo anterior se justifica por la diferencia en la composición de las muestras como se mencionó para el análisis del módulo de Young y granulometría.

El comportamiento de la relación de Poisson con la temperatura no es claro, haciendo necesario realizar una mayor investigación para determinar el comportamiento de esta propiedad para formaciones con diferentes condiciones en cuanto al tamaño de grano, composición, cementación, presión de confinamiento y presión de poro para determinar cuál sería su impacto sobre la producción dependiendo de las condiciones de la roca estudiada. Aunque es claro que las rocas con relaciones de Poisson se fracturan con mayor facilidad.

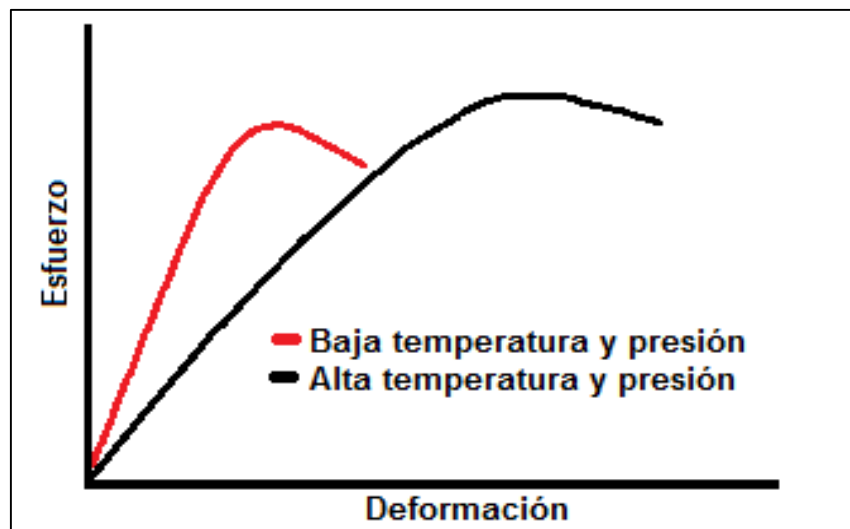
### **6.3 DEFORMACIÓN.**

La deformación es la reacción de la roca a un esfuerzo externo que se representa en un cambio de forma, además esta se encuentra muy relacionada con el módulo de Young debido a que este módulo representa la pendiente de la gráfica de

esfuerzo vs deformación (Figura 15). La deformación es el producto de los esfuerzos térmicos inducidos en la roca por la expansión térmica y la depleción del yacimiento, además las rocas someras poseen una mayor porosidad y en estas particularmente se presenta una menor deformación antes de fallar, es decir, presentan una un comportamiento frágil. Además a medida que la temperatura aumenta, las rocas tienden a ser más dúctiles, es decir, ocurre un proceso de fortalecimiento de la roca antes de alcanzar la falla.

El efecto de la deformación en la productividad del yacimiento se presenta por la variación de la forma del cuerpo, la cual se da por un reordenamiento de granos generando una disminución de la porosidad y la permeabilidad, por lo tanto afectará el potencial de producción del yacimiento pero la reducción de la viscosidad compensa este efecto. Desde el punto geomecánico las rocas con mayor esfuerzo de sobrecarga (confinamiento) soportan una mayor deformación antes de fallar y con el aumento de temperatura la resistencia de la roca se hace mayor, por lo tanto la roca soporta mayores esfuerzos antes de fallar.

Figura 63. Efecto de la presión y la temperatura en la deformación.



#### **6.4 RESISTENCIA.**

La resistencia de las rocas al igual que los módulos elásticos presenta una variación en muestras que son sometidas a procesos que impliquen un aumento de temperatura, afectando la capacidad de soportar carga antes de fallar. El comportamiento del esfuerzo máximo que una roca soporta antes de fallar para diferentes temperaturas puede observarse en las figuras 10, 15, 20, 21, 22, 24, 25. De las gráficas anteriores se ve claramente que la resistencia de la roca a la compresión uniaxial presenta una variación para la misma litología, sin que se presente una tendencia clara. Además en la figura 27, se observa cómo afecta el comportamiento de la resistencia con la presión de confinamiento y como varia esta con el aumento de temperatura. Además se puede concluir por los resultados experimentales obtenidos por Hong Tian (2013) que las rocas sometidas a mayores esfuerzos de confinamiento tienden a deformarse más antes de alcanzar el punto de falla. Estos resultados reflejan que los procesos térmicos son más críticos para yacimientos someros, los cuales pueden fallar en condiciones de esfuerzos menores. Como se mencionó para los módulos elásticos esto favorece la producción cuando el proceso de microfracturas o fracturas se da dentro del yacimiento.

#### **6.5 ONDAS ELÁSTICAS.**

La variación de las ondas elásticas se refleja como resultado de los cambios inducidos en la matriz de la roca a raíz de los procesos térmicos causados por la expansión térmica y los esfuerzos térmicos inducidos. Según Mobarack (1971) y Wu (2013), el aumento de la temperatura causa una disminución de la velocidad de las ondas y se da por la expansión térmica de los fluidos y además por la expansión térmica de los granos que puede inducir la presencia de

microfracturas. Analizando la figura 29, se puede ver que el efecto de la temperatura sobre la velocidad de las ondas empieza a ser evidente a partir de los 200 °C, a partir de esta temperatura la velocidad disminuye. Es importante resaltar que la variación de la velocidad de las ondas es el reflejo de otros procesos y por lo cual no afecta directamente la producción.

## **6.6 CAMBIOS MINERALÓGICOS.**

Las variaciones mineralógicas presentadas en las muestras a nivel de laboratorio y los pilotos implementados en Canadá ponen en evidencia que la reacción más común presente en los procesos térmicos es la disminución de la caolinita, lo cual es debido a una reacción generalmente con cuarzo y otros minerales para formar esmectita. Además minerales como caolinita, illita, clorita, esmectita, se descomponen a temperaturas inferiores a 600°C. El problema con la formación de esmectita es en los procesos de inyección de vapor puesto que esta arcilla se hincha al contacto con el agua disminuyendo la porosidad y generando obstrucción de los canales de flujo afectando directamente la productividad. En procesos de combustión in situ se presenta deshidroxilación de los minerales o la descomposición de los mismos y formación de sustancias ferrosas haciendo las rocas más consolidadas.

## **6.7 ESFUERZOS TÉRMICOS INDUCIDOS.**

El frente térmico afecta las propiedades mecánicas de la roca sello, las cuales generalmente son shale que al entrar en contacto con dicho frente se genera una deshidratación creando microfracturas en el sello y cuando el vapor llegue a estas

aumentará el contenido de agua disminuyendo la cohesión y la resistencia del sello (Figura 56). La expansión térmica de los yacimientos induce esfuerzos en la roca que son responsables de la falla de la roca sello afectando la integridad del yacimiento, es decir, se afectará la integridad hidráulica causando una migración de fluidos por la falla de la roca sello y por ende depleción del yacimiento. La concentración de esfuerzos entre el contacto de la roca almacén y la roca sello, es el punto de mayor debilidad y por esto allí es donde se presenta con mayor frecuencia el cizallamiento del revestimiento (Dusseault 2001) y es más crítico cuando la presión de confinamiento es menor puesto que la resistencia al corte se reduce significativamente, haciendo más susceptibles los yacimientos someros. Un incremento de temperatura induce un esfuerzo térmico instantáneo pero debido a la restricción lateral y el incremento de los esfuerzos horizontal, genera un contraste que crea microfracturas de cizalla dentro de yacimiento que incrementa la permeabilidad, sin embargo estas microfracturas se pueden extender verticalmente y afectar la roca sello. Ahora cuando la diferencia de temperaturas es de 80 a 100°C o más, es posible que la roca alcance las condiciones de falla por cizalla (criterio de falla de Mohr Coulomb) incluso en materiales menos rígidos y no consolidados que las rocas altamente competentes así como los carbonatos. En rocas blandas (softer rock), los cambios de esfuerzos son menores que en las rocas rígidas, pero los esfuerzos necesarios para alcanzar las condiciones de falla son menores debido a las rocas blandas como areniscas no consolidadas son mucho más débiles que las rocas rígidas. (Dusseault 2001).

## **6.8 POROSIDAD.**

El efecto de la temperatura sobre la porosidad pueden ser dos. El primero es en el caso de las rocas en las cuales el calentamiento ocurre y los esfuerzos térmicos inducidos no superan la resistencia de la roca, es decir, no se inducen

microfracturas. Es este caso la porosidad de la roca con el incremento de la temperatura disminuye. Esto es causado debido a que el volumen de la masa de la roca no cambia, mientras que el volumen de granos sólidos aumenta con la temperatura. Por lo tanto, el volumen de poro disminuye y conduce a una reducción en la porosidad. El impacto de esta reducción sobre la producción no es importante puesto que esa reducción es contrarrestada con la disminución de la viscosidad del fluido y por lo tanto este fluye con mayor facilidad por los poros.

El segundo caso es aquel en el cual los esfuerzos inducidos por la expansión térmica de la matriz rocosa superan la resistencia de la roca (Dusseault 2001) y por tal motivo se inducen microfracturas en el yacimiento lo cual aumenta la porosidad y por ende la permeabilidad favoreciendo el flujo de fluidos a través del medio poroso.

## **6.9 PERMEABILIDAD.**







En el caso en el que la temperatura del fluido inyectado es diferente que el de la formación, la permeabilidad puede variar significativamente y afecta a la capacidad de los fluidos fluyendo a través de medios porosos (Civan, 2006). El efecto de la temperatura sobre esta propiedad petrofísica está muy relacionado con el comportamiento de la porosidad aunque en la literatura es controversial cual es el verdadero impacto. La permeabilidad de las rocas tiene una disminución con el aumento de la temperatura pero esta es mayor cuando la porosidad es menor (Civan 2000). Teniendo en cuenta que los procesos de combustión in situ se llevan a cabo en formaciones relativamente someras (profundidades menores a 4500ft), además que a menor profundidad mayor es la porosidad debido a que la sobrecarga y compactación de los sedimentos es menor, se puede afirmar que las formaciones candidatas para los procesos térmicos no presentaran grandes variaciones de la permeabilidad con el aumento de la temperatura. Pero esta

variación no tiene un gran impacto en la producción de hidrocarburos puesto que la reducción de la viscosidad por aumento de la temperatura de los hidrocarburos genera un aumento de la producción y por ende es el objetivo en común de los procesos térmicos.

#### **6.10 COMPACTACIÓN.**

Este fenómeno tiene como principal causa la depleción del yacimiento y es reconocido como un mecanismo de accionamiento que favorece la producción de hidrocarburos, reconocido en Alberta (Canadá) y Venezuela. Pero la compactación se complica cuando la naturaleza de medio poroso es no consolidada y además por aspectos térmicos (Settari 2001). Las consecuencias de este fenómeno inicialmente es la subsidencia del sector del yacimiento afectado, cizallamiento de casing, reactivación de fallas e incluso reducción de la permeabilidad con la consiguiente pérdida de la productividad.

Tabla 14. Análisis global de las variables y su influencia en producción.

<b>Módulo de Young</b>	Módulos altos indican mayor rigidez y por ende mayor facilidad para fracturar, favoreciendo el cizallamiento del yacimiento.	
	Formaciones con módulos altos y con presencia de fracturas por cizalla o tensión cerca de la roca sello bajo un régimen normal puede afectar la integridad del sello. Bajos módulos de Young, indica rocas con comportamiento plástico y por ende mayor dificultad para el cizallamiento masivo del yacimiento.	
<b>Relación de Poisson</b>	Rocas con bajas relaciones de Poisson tienen una mayor rigidez, reflejando mayor fragilidad y facilidad para el cizallamiento (roca almacén).	
	Altas relaciones de Poisson indica rocas plásticas y difícil de fracturar (roca almacén) y valores bajos se fracturan con mayor facilidad (roca sello).	
<b>Deformación y resistencia</b>	Las rocas a temperaturas bajas tienden a un comportamiento frágil. Es decir rocas con baja resistencia que favorecen el cizallamiento (roca almacén).	
	Las rocas a altas temperaturas tienden a un comportamiento dúctil. Es decir que presentan una mayor deformación y resistencia antes de fallar (roca almacén). La deformación de la roca sello generada por aumento del esfuerzo efectivo vertical causa fallas por tensión (roca sello).	
<b>Cambios mineralógicos</b>	La formación de esmectita a partir de caolinita, cuarzo, dolomita y calcita; tiene un efecto negativo puesto que se hincha al contacto con el agua y reduce la porosidad y permeabilidad.	
<b>Esfuerzos térmicos</b>	Los esfuerzos térmicos superan la resistencia de la roca, se produce cizallamiento masivo del yacimiento, aumentando porosidad y permeabilidad.	
	Los esfuerzos térmicos inducidos en yacimiento alteran la geometría de los poros, disminuyendo la porosidad y permeabilidad. Los esfuerzos inducidos sobre el sello sumado a la disminución de la cohesión puede causar su fracturamiento.	
<b>Porosidad y permeabilidad</b>	Una vez superada la resistencia de la roca se genera el cizallamiento masivo lo cual aumenta la porosidad y la permeabilidad, favoreciendo el flujo de fluidos.	
	Durante el comportamiento elasto-plástico del yacimiento se produce reducción de la porosidad y permeabilidad, por la expansión térmica de los minerales.	
<b>Cohesión</b>	Una disminución reduce la resistencia y favorece el cizallamiento masivo del yacimiento.	
	Un aumento de la cohesión indica que la resistencia de la roca es mayor, desfavoreciendo el cizallamiento masivo del yacimiento. La disminución en la roca sello es desfavorable puesto que aumenta el riesgo de fracturarlo.	

## 7. CONCLUSIONES.

- ✓ De acuerdo a la revisión bibliográfica es evidente que las propiedades mecánicas de las rocas varían cuando son sometidas a un aumento de temperatura pero, en los datos reportados por los diferentes investigadores presentan comportamientos diferentes relacionados a propiedades como la resistencia, el módulo de Young, deformación. Lo anterior es atribuido a las condiciones de las muestras estudiadas en cuanto composición, grado cementación, tiempo de exposición, esfuerzos de confinamiento, granulometría y si la roca es compacta o no.
  
- ✓ De acuerdo al análisis bibliográfico realizado, se puede ver una vez más que los diferentes procesos térmicos afectan la respuesta geomecánica de la roca sello y la formación subyacente, principalmente por la expansión térmica, dilatación, cambios en la presión de poro, cizallamiento y fracturamiento por tensión. La expansión térmica del yacimiento por el influjo de calor, causa un desplazamiento vertical y horizontal, transfiriendo deformación a la roca sello y formaciones subyacentes y aledañas lateralmente.
  
- ✓ Todos los estudios publicados muestran que la expansión térmica en los yacimientos someros de crudo pesado genera un cambio en los esfuerzos y un levantamiento de la superficie. El levantamiento asociado al calentamiento también genera un incremento en los esfuerzos efectivos laterales en la zona caliente, que puede inducir cizallamiento en el yacimiento y en la interfase de la roca sello y la formación productora. Aunque también es posible la generación de fallas por tensión en el sector

del yacimiento que sufre levantamiento debido a la extensión de las capas suprayacentes.

- ✓ De acuerdo a las publicaciones revisadas es claro que garantizar la integridad de la roca sello es un punto importante en un proceso de recuperación térmica mejorada como procesos de inyección de vapor. Estos procesos cambian el estado inicial de los esfuerzos in situ, causan reducción de la resistencia, induce fracturas o reactiva fracturas existentes lo cual implica riesgo de inducir fracturamiento de la roca sello.
  
- ✓ La zona de cizalla más intensa es la parte de transición entre la roca del yacimiento caliente y la fría con un gradiente de temperatura alto, y en el caso de un pozo vertical simétrico, la concentración del esfuerzo de cizalla inducido a lo largo de la interfase en el pozo de inyección será pequeño (figura 60). El peor de los casos para el cizallamiento de los pozos vecinos en un proyecto térmico probablemente surge en la inyección de vapor continua, ya que toda la deformación es forzada hacia el exterior a lo largo del frente. En estimulación cíclica de vapor en pozos individuales conduce a menores concentraciones del esfuerzo de cizalla en los flancos y propagación más lenta debido a los efectos de la difusión radial.
  
- ✓ Las areniscas con un alto contenido de cuarzo y presencia de arcilla como la caolinita tienen una gran posibilidad de formar esmectita si es sometida a un proceso de inyección de vapor, además si esta entra en contacto con el agua generaría una reducción en la permeabilidad. Ahora en las pruebas llevadas a cabo en el instituto colombiano del petróleo (ICP), se verificó lo identificado en la literatura que la caolinita es el mineral más susceptible a

su descomposición y debido a esto puede generar la alteración de la estructura irreversible de la roca.

- ✓ El efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de las rocas se evidencia en la representación de los criterios de falla para diferentes temperaturas, en las cuales se presenta una variación poco clara de la resistencia y la cohesión para el criterio de Mohr Coulomb. Para el análisis realizado a los datos obtenidos de la literatura se pudo observar como la resistencia de la roca en términos generales aumenta al incrementar la temperatura, pero hay unos casos muy particulares como: para 200°C se obtiene la envolvente de falla con mayor resistencia y para 300 °C y 400 °C esta disminuye (figura 30).
  
- ✓ Teniendo en cuenta que la variación de las propiedades mecánicas y el cambio mineralógicos tienen un impacto sobre la porosidad y la permeabilidad del yacimiento al punto que pueden causar disminución de estas dos propiedades y aun así los procesos térmicos aumentan la producción de crudo pesado. Lo anterior deja ver que la reducción de la viscosidad de los hidrocarburos es el factor más importante que causa el aumento de la productividad, haciendo despreciables los cambios generados por la expansión térmica o la re-precipitación de minerales.
  
- ✓ Durante los procesos de recuperación térmica se inducen esfuerzos térmicos. En la etapa inicial de los procesos se genera una expansión de los minerales por el aumento de la temperatura, la cual causa un cambio en la geometría de los poros llevando a una reducción de la porosidad y la permeabilidad, pero cuando los esfuerzos superan la resistencia de la roca

como resultado se presenta el fenómeno de cizallamiento masivo del yacimiento en respuesta al incremento del esfuerzo efectivo horizontal por la expansión térmica no homogénea (la cual se presenta debido a que la roca está compuesta de diferentes minerales) y las restricciones laterales y verticales a la misma. El cizallamiento es irreversible para formaciones y esto permite el incremento de la permeabilidad y porosidad. Así el cizallamiento masivo es considerado el mayor efecto geomecánico positivo en los procesos de recobro térmicos.

## 8. RECOMENDACIONES.

- ✓ Realizar una investigación amplia a nivel de laboratorio con muestras de diferentes litologías de interés para la industria de hidrocarburos. Además considerar diferentes condiciones en las muestras como composición, grado de cementación, granulometría, presión de confinamiento, presión de poro, muestras consolidadas y no consolidadas en un rango amplio de temperatura.
  
- ✓ Realizar el montaje de modelos de simulación de pruebas triaxiales para muestras de diferentes litologías calibrados con datos de laboratorio, con el objetivo de caracterizar formaciones sin la necesidad de destruir muestras.
  
- ✓ Realizar una simulación acoplada entre geomecánica y flujo de fluidos un proceso térmico (inyección de vapor) para observar el impacto que se genera en el yacimiento por el aumento de temperatura.

## BIBLIOGRAFÍA.

- ✓ ARAFIJOR. G and SOUSA, L. Experimental investigation on the influence of temperature on the mechanical properties of reservoir rocks. Petrobras, 1997.
- ✓ BANZER, Carlos y ALVARADO, Douglas. Recuperación térmica de petróleo. 2002.
- ✓ BARRETT, Mary and MATHIAS, Richard. Production induced diagenesis during thermal heavy oil recovery: grain size as a predictor of reservoir alteration. 1996.
- ✓ BARSHAD, I. Temperature and heat of reaction calibration of the differential thermal apparatus. Am. Mineralogist, Vol. 37
- ✓ BAO, X., CHEN, Z., HENG, H., LIU, H., ZHONG, H. Couple Geomechanical and thermal simulation of SAGD process. 2013.
- ✓ BENNION, Brant and F,Thomas. Thermally induced formation damage due to hot water and steamflooding in sandstone reservoirs. 1992.
- ✓ BRANN, Johnson. Thermal Cracking of Rock Subjected to Slow, Uniform Temperature Changes. 1978.
- ✓ BUTLER, Roger. The expansion of tar sands during thermal recovery. 1986.
- ✓ CIVAN, Faruk. Porous media transport phenomena. The University of Oklahoma. 2011.

- ✓ CIVAN, Faruk. Correlation of Permeability Loss by Thermally Induced Compaction due to Grain Expansion. 2008.
- ✓ CIVAN, Faruk. Predictability of Porosity and Permeability Alterations by Geochemical and Geomechanical Rock and Fluid Interactions. 2008.
- ✓ CONTRERAS, Enrique y IGLESIAS, Eduardo. Effect of temperature and stress on compressibilities, thermal expansivities, and porosities of cerro prieto and Berea sandstones to 9000 psi and 280°C. Stanford University. 1982.
- ✓ CRAWFORD, B., SEARLES, K and REESE, W. Plastic Compaction in Diatomite: In Situ Stress versus Temperature Effects. ExxonMobil Upstream Research Company. 2006.
- ✓ DIETRICH, J and SCOTT, J. Modeling thermally induced compaction in diatomite. 2007.
- ✓ DOORNHOF, Dirk., GOLDER, Tron., NAGEL, Neal., PATTILLO, Phillip y SAYERS, Colin. Compaction and subsidence. 2006.
- ✓ DUNCAN. James y CHANG, Chin. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. 1970.
- ✓ DUSSEAULT, Maurice. Monitoring and Modelling in Coupled Geomechanics Processes. University of Waterloo. 2007.
- ✓ DUSSEAULT, Maurice. Stress Changes in Thermal Operations. 1993.
- ✓ DUSSEAULT, Maurice., BRUNO, Michael y BARRERA. John. Casing Shear: Causes, Cases, Cures. 2001.

- ✓ DUSSEAULT, Maurice. COLLINS, Patrick. Geomechanics Effects in Thermal Processes for Heavy Oil Exploitation. Dept. of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo. 2008.
- ✓ DUSSEAULT, Maurice., YIN, Shunde., ROTHENBURG, Leo and HAN, Hong. Seismic monitoring and geomechanics simulation. 2007.
- ✓ FJAER E., and RASMUS R. Petroleum Related Rock Mechanics, 2008.
- ✓ GHABEZLOO, Siavash and SULEM, Jean. Temperature induced pore fluid pressurization in geomaterials. 2010.
- ✓ GHABEZLOO, Siavash and SULEM. Stress dependent thermal pressurization of a fluid-saturated rock. 2008.
- ✓ HAJPAL and TOROK. Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. 2004.
- ✓ HAN, H. KHAN, S. Ansari, and S. Khosrav, N. Prediction of Injection Induced Formation Shear. Schlumberger .2012.
- ✓ HETTEMA, M. WOLF, K. H, PATER, C. The influence of steam pressure on thermal spalling of sedimentary rock: theory and experiments. 1998.
- ✓ HOEK, Evert. CARRANZA, Carlos and CORKUMBrent. Hoek-brown failure criterion – 2002 EDITION.
- ✓ HOMAND- ETIENNE, Action de la temperature sur les roches: Dilatation et fissuration, Laboratoire de Geomecanique, Ecole Nationale Superieure de Geologie, INPL, Nancy, France.

- ✓ HOUPERT, R. and HOMAND-ETIENNE Comportement en fonction mécanique des roches en fonction de la température, Institut National Polytechnique de Lorraine. 1980.
- ✓ HOUPERT, Rene, Françoise. Influence de la température sur le comportement mécanique des roches, Ecole Nationale Supérieure de Géologie Nancy. France.
- ✓ HUTCHEON, Ian. A review of artificial enhanced Recovery diagenesis during thermally enhanced recovery. The University of Calgary. 1982.
- ✓ HUTCHEON, Ian and LEFEBVRE, Rene. Sedimentology, diagenesis and thermal effects on petrophysical properties in the aberfeldy field, Saskatchewan. 1988.
- ✓ KHAN, Safdar. HAN, Hongxue. ANSARI, Sajad. VISHTEH, Morteza and KHOSRAVI, Nader. Caprock Integrity Analysis in Thermal Operations: An Integrated Geomechanics Approach. Schlumberger. 2011.
- ✓ KIM, K. M. and KEMENY, J. Effect of Thermal Shock and Rapid Unloading on Mechanical Rock Properties, The University of Arizona, 2009.
- ✓ KIRK, Gordon. Laboratory study of effects of steam condensate flooding in the clearwater formation: High temperature flow experiments. 1987.
- ✓ MEIBNER, TH. BECKER & E.ADAM. Stress-strain behaviour of crystalline and amorphous rocks subjected to high pressure and high temperature. 1999.
- ✓ MOUSTAFA, M; MALEK, S y JIANFU, S. Experimental Study of the Thermomechanical Behavior of the Petroleum Reservoir. University of Lille, 2012.

- ✓ NADEAU, Paul. An experimental study of the effects of diagenetic clay minerals on reservoir sands. Exxon Production Research Company. 1998.
- ✓ NAUROY, Jean Francois. Geomechanics Applied to the Petroleum Industry. 2011.
- ✓ PERRY, C and GILLOTT, E. Mineralogical transformations as indicators of combustion zone temperatures during in situ combustion. 1982.
- ✓ RANJITH. P, VIETE, Daniel, CHEN. Bai, M and PERERA. Samantha. Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behavior of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure. 2012.
- ✓ RAO. Qiu-hua, WANG. Zhi, XIE. Hai-feng and XIE Qiang. Experimental study of mechanical properties of sandstone at high temperatura. 2007.
- ✓ RICHTER, Dorothy and SIMMONS, Gene. Thermal Expansion Behavior of Igneous Rocks. 1974.
- ✓ ROMERO, Gomes Da Silva Araujo. Determinação da influência da temperatura nos parametros elásticos e resistencia em rochas reservatório de petróleo. Universidade estadual de Campinas. 1995.
- ✓ ROSENBRAND, Esther. Effect of Hot Water Injection on Sandstone Permeability: An Analysis of Experimental Literature. 2012.
- ✓ SETTARI, Antonin y WALTERS, Dale. Advances in Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling With Applications to Reservoir Compaction. 1999.

- ✓ SHAFIEI, Ali and DUSSEAULT, Maurice. Geomechanics of thermal viscous oil production in sandstones. 2013.
- ✓ SOMERTON, W.H. Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems. University of California, 1992.
- ✓ SOMERTON, W., SHAARANI, A and MOBARACK. High temperature behavior of rocks associated with geothermal-type reservoir. 1974.
- ✓ TARASOV, S., GHASSEMI, A. Propagation of a system of cracks under thermal stress. Texas A&M University, College Station. 2011.
- ✓ TEKLU, Tadesse; ALAMERI, Waleed; GRAVES, Ramona; TUTUNCU, Azra and KAZEMI, Hossein. Geomechanics Considerations in Enhanced Oil Recovery. Colorado School of Mines, 2012.
- ✓ TIAN, Hong. Development of a Thermo-Mechanical Model for Rocks Exposed to High Temperatures during Underground Coal Gasification. 2013.
- ✓ TIAN, Hong. A modified Mohr-Coulomb failure criterion for intact granites exposed to high temperature. Department of Geotechnical Engineering, RWTH Aachen University, Aachen, Germany. 2012.
- ✓ TILLEY, B. and GUNTER, W. Mineralogy and water chemistry of the burnt zone from a wet combustion pilot in Alberta. 1988.
- ✓ TRAN, David., NGHIEM, Long and BUCHANAN, Lloyd. Modelling Thermal Geomechanical Effects on Simulation Porosity. 2008.
- ✓ WINKLER, E M. Stone. Properties, Durability in Man's Environment (Applied mineralogy). Springer, 1973.

- ✓ WU. G, WANG. Y, SWIFT. G and CHEN. J. Laboratory Investigation of the Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Sandstone. 2013.
- ✓ XU, B., YUAN, Y.G., WANG, Z.C. Thermal Impact on Shale Deformation/Failure Behaviors (Laboratory Studies), BitCan Geosciences & Engineering Inc., Calgary, Alberta, Canada, 2011.
- ✓ YANG, B., XU, B and YUAN, Y. Impact of thermal pore pressure on the caprock integrity during the SAGD operation. 2013.
- ✓ YANGUANG, and Yuan. XU, Bin. Design of Caprock Integrity in Thermal Stimulation of Shallow Oil-Sands Reservoirs. BitCan G&E Inc. and Claes Palmgren, SPE, Alberta Oilsands Inc. 2011.
- ✓ ZHANG, Lian., MAO, Xian and LU, AiHong. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology. 2009.
- ✓ ZOBACK, Mark. Reservoir Geomechanics. Department of Geophysics, Stanford University. 2007.