

# **Estado del arte del ensayo de fracturamiento hidráulico**

**Jorge Ivan Castiblanco Rojas**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Maestría en Geotecnia**

Director:

Ramiro Gutiérrez

Línea de Investigación:

Fundaciones

Énfasis de Investigación:

Geotecnia

Escuela Colombiana de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2014

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 ASPECTOS GEOLÓGICO Y GEOESTRUCTURALES (Ciencias de la Tierra [1])</b> <b>17</b>	
3.1.1 Origen de la Tierra .....	17
3.1.1 Dentro de la tierra.....	18
3.1.2 Superficie de la Tierra .....	20
3.1.3 Las Rocas .....	21
3.1.4 Estructuras Geológicas .....	25
3.1.5 Tectónica de placas .....	30
<b>3.2 TENSOR DE ESFUERZOS (Ingeniería Geológica [2])</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3 TENSORES NATURALES (Ingeniería Geológica [2])</b> .....	<b>44</b>
<b>3.4 FACTORES GEOLÓGICOS Y MORFOLÓGICOS INFLUYENTES EN EL ESTADO DE ESFUERZOS</b> .....	<b>48</b>
3.4.1 Topografía.....	48
3.4.2 Erosión.....	49
3.4.3 Efecto de las discontinuidades .....	49
3.4.4 Efecto de la tectónica .....	50
<b>3.5 JUSTIFICACIÓN DE LA MEDIDA DE LOS ESFUERZOS IN SITU (Amadei [7])</b> <b>51</b>	
<b>3.6 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS</b> .....	<b>56</b>
3.6.1 Métodos de presurización .....	58
3.6.2 Métodos de sobreperforación (overcoring) .....	61
3.6.3 Otros métodos.....	64
<b>3.7 TÉCNICA DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO</b> .....	<b>65</b>
3.7.1 Introducción.....	65
3.7.2 Historia.....	66
3.7.3 Mecánica de la fractura hidráulica .....	71
3.7.4 Procedimiento para realizar ensayos de fracturamiento hidráulico. ....	86
3.7.5 Normas .....	90
3.7.6 Aspectos Geotécnicos para el ensayo.....	94
3.7.7 Descripción del equipo y personal requerido .....	95
3.7.8 Tipos de ensayos .....	105
3.7.9 Obtención de parámetros .....	108
3.7.10 Interpretación de resultados .....	112
3.7.11 Aplicaciones y Ventajas del ensayo de fracturamiento hidráulico .....	115
3.7.12 Comparaciones con otros métodos .....	116
3.7.13 Suposiciones y limitaciones.....	116
3.7.14 Factor de seguridad contra el fracturamiento hidráulico en túneles con flujo de agua a presión.....	118
3.7.15 Presentación de resultados en ensayos de fracturamiento hidráulico.....	119

<b>4.</b>	<b>ASPECTOS QUE INTERFIEREN EN LA INTERPRETACIÓN .....</b>	<b>124</b>
4.1	Permeabilidad y macizos rocosos fracturados.....	124
4.2	Macizos rocosos impermeables o poco fracturados.....	124
4.3	Transporte hidráulico en las rocas .....	125
4.4	Influencia de la inelasticidad .....	129
4.5	Retraso del fluido .....	131
4.6	Influencia de la dilatación .....	131
4.7	Rugosidad .....	132
4.1	Efectos térmicos [13].....	132
<b>5.</b>	<b>RECREACIONES O SIMULACIONES DE ENSAYOS DE FRACTURAMIENTO</b>	
	<b>HIDRAULICO EN EL LABORATORIO .....</b>	<b>135</b>
5.1	<b>FRACTURAS HIDRAULICAS EN ARENA DE CONTENCIÓN.....</b>	<b>135</b>
5.1.1	Introducción .....	135
5.1.1	Materiales .....	136
5.1.2	Aparato de inyección .....	137
5.1.3	Fluido para la fractura.....	142
5.1.4	Influencia del tamaño de la muestra .....	143
5.1.5	La Prueba .....	143
5.1.6	Resultados.....	145
5.1.7	Conclusiones .....	149
5.2	<b>UN ESTUDIO DE LABORATORIO DE LA PRESIÓN DE RUPTURA DEL</b>	
	<b>FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN LA ROCA ARENISCA (SONG, SUH, WONG</b>	
	<b>y HAIMSON [16]) .....</b>	<b>150</b>
5.2.1	Introducción .....	150
5.2.2	Tipo de roca ensayada .....	152
5.2.3	Montaje y procedimiento del ensayo.....	152
5.2.4	Análisis de las curvas presión-tiempo.....	154
5.2.5	Resultados del ensayo de fracturamiento hidráulico sin membrana.....	156
5.2.6	Resultados del ensayo de fracturamiento hidráulico sin membrana.....	160
5.2.7	Conclusiones .....	162
5.3	<b>ENSAYOS DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO PARA INVESTIGAR LAS</b>	
	<b>PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN (LIBERMAN, M. [17]) .....</b>	<b>162</b>
5.3.1	Introducción .....	162
5.3.2	Ensayo de Fracturamiento hidráulico en cámara de confinamiento .....	164
5.3.3	Adquisición de Datos.....	171
5.3.4	Procedimientos para el funcionamiento experimental del ensayo de	
	fracturamiento hidráulico .....	171
5.3.5	Programa de ensayos.....	173
5.3.1	Resultados.....	174
5.3.1	CONCLUSIONES.....	179
5.4	<b>ENSAYO DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN UN MARCO POLIAXIAL</b>	
	<b>DE CARGAS (CASAS [18]) .....</b>	<b>180</b>
5.4.1	Introducción .....	180
5.4.1	Material.....	181
5.4.2	Marco poliaxial de carga y la línea hidráulica de inyección de fluidos .....	182
5.4.3	Preparación de la muestra para el ensayo.....	183
5.4.4	Montaje del laboratorio .....	186
5.4.5	Condiciones experimentales .....	187

5.4.6	Líquido del fluido para la fractura .....	190
5.4.7	Procedimiento del ensayo .....	191
5.4.1	Resultados .....	193
5.4.1	Conclusiones.....	196
<b>5.5</b>	<b>SIMULACIÓN A ESCALA DE UN MODELO DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO PARA CREAR UNA RESERVA EGS USANDO UN APARATO DE TRIAXIAL AUTÉNTICO CALENTADO (FRASH, GUTIERREZ Y HAMPTON, [24]).</b>	<b>197</b>
5.5.1	Introducción.....	197
5.5.2	Equipo y especificaciones .....	197
5.5.3	Resultados del ensayo y observaciones.....	203
5.5.4	Conclusiones.....	208
<b>5.6</b>	<b>LABORATORIO DE ENSAYOS A GRAN ESCALA DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO (HAIMSON, [25])</b>	<b>209</b>
5.6.1	Limitaciones de Pequeña Escala en un Laboratorio de Ensayo .....	209
5.6.2	Ventajas de una instalación de pruebas a gran escala.....	209
5.6.3	Ensayos a gran escala en especímenes cilíndricos Versus especímenes Cúbicos.....	212
<b>5.7</b>	<b>ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA EN BLOQUES AL AZAR NATURALMENTE FRACTURADOS (Zhou, [26])</b>	<b>213</b>
5.7.1	Introducción.....	213
5.7.2	Instalación y Procedimiento experimental.....	213
5.7.3	Resultados experimentales e interpretación.....	217
5.7.4	Conclusiones.....	222
<b>5.8</b>	<b>SIMULACIÓN EN EL LABORATORIO DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO (Papadopoulos, [27])</b>	<b>223</b>
5.8.1	Introducción.....	223
5.8.2	Guías de análisis y simulación numérica.....	223
5.8.3	Experimentos de interfaz de separación.....	225
5.8.4	Experimentos de interacción de la fractura.....	230
5.8.5	Conclusiones.....	236
<b>5.9</b>	<b>MÉTODO DE ENSAYO DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO PARA LA MEDICIÓN DE ESFUERZOS EN ITALIA (Barla, [28])</b>	<b>237</b>
5.9.1	Introducción.....	237
5.9.2	Medición del esfuerzo de la roca en Italia.....	237
5.9.3	Acercamiento al fracturamiento hidráulico .....	240
5.9.4	Pruebas de laboratorio .....	241
5.9.5	Conclusiones.....	249
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES PARA SIMULAR EL LABORATORIO DE FRACTURAMIENTO HIDRAULICO</b>	<b>250</b>
6.1	<b>SELECCIÓN DE MONTAJE</b> .....	<b>250</b>
6.2	<b>EQUIPOS</b> .....	<b>253</b>
6.2.1	Equipo de inyección .....	253
6.2.2	Equipo de monitoreo .....	256
6.3	<b>CORRELACIONES DE ESCALA</b> .....	<b>259</b>
6.4	<b>OTRAS ALTERNATIVAS DE MONTAJES</b> .....	<b>263</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>265</b>
7.1	<b>Aspectos sobresalientes de las recreaciones en el laboratorio</b> .....	<b>267</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Estructura interna de la Tierra. ....	19
Figura 3-2. Ciclo de las Rocas.....	24
Figura 3-3. Partes de un pliegue. ....	26
Figura 3-4. Tipos de pliegues. ....	27
Figura 3-5. Falla normal. ....	28
Figura 3-6. Falla inversa.....	28
Figura 3-7. Falla de cabalgamiento. ....	28
Figura 3-8. Falla de desplazamiento horizontal. ....	29
Figura 3-9. Esquema de la fragmentación de Pangea a lo largo de un periodo de 225 millones de años hasta conformar los continentes actuales. ....	31
Figura 3-10. Esquema de la fragmentación de las placas. ....	32
Figura 3-11. Corrientes de convección dentro de un recipiente de agua. ....	33
Figura 3-12. Corrientes de convección dentro de la Tierra ....	34
Figura 3-13. Bordes divergentes a lo largo de la cresta de las dorsales oceánicas. ....	34
Figura 3-14. Bordes divergentes a lo largo de la cresta de las dorsales continentales. Rift continental.....	35
Figura 3-15. Borde convergente con ángulo de subducción bajo. Fosa de Perú-Chile ...	36
Figura 3-16. Borde convergente con ángulo de subducción de 90°. ....	36
Figura 3-17. Esquema de la convergencia oceánica- continental. ....	37
Figura 3-18. Esquema de la convergencia oceánica- oceánica. ....	38
Figura 3-19. Esquema de la convergencia continental- continental. ....	38
Figura 3-20. Borde transformantes. ....	40
Figura 3-21. Vector de desplazamiento y campo de desplazamientos. ....	41
Figura 3-22. Esfuerzos representados en un plano. ....	42
Figura 3-23. Esfuerzos principales de un elemento a una profundidad z. ....	43
Figura 3-24. Plano perpendicular a la dirección del esfuerzo $\sigma_2$ . ....	43
Figura 3-25. Medidas de los esfuerzos verticales en minas y proyectos de ingeniería civil alrededor del mundo.....	46
Figura 3-26. Variación del k con la profundidad (Hoek y Brown). ....	47
Figura 3-27. Curvas del k de esfuerzos para diferentes módulos, según la ecuación de Sheorey (1994).....	47
Figura 3-28. Influencia de la topografía en la distribución de las tensiones. ....	48
Figura 3-29. Influencia de la nariz topográfica en la distribución de las tensiones. ....	49
Figura 3-30. Influencia de la erosión en la distribución de las tensiones.....	49
Figura 3-31. Influencia de las discontinuidades en la distribución de las tensiones. ....	50
Figura 3-32. Influencia de la tectónica en la distribución de las tensiones. ....	51
Figura 3-33. Mapa de los esfuerzos regionales de Suramérica recopilados por el WSM (World Stress Map). ....	55
Figura 3-34. Tensor de esfuerzos con 6 componentes independientes. ....	58

Figura 3-35. Componentes del esfuerzo proporcionadas por los diferentes métodos.....	58
Figura 3-36. Ensayo de las células planas o Flat Jack. a) Medidas en galería o túnel. b) Esquema del ensayo. c) Perforación de taladros (Vista frontal). d) Instalación y presurización (sección). e) Registro de perforaciones.....	60
Figura 3-37. a) Sonda de medida de tensiones USBM. b) Célula triaxial CSIR.....	62
Figura 3-38. Ensayo sobreperforación, sistema USBM y CSIR. a) Perforación del sondeo. b) Perforación de menor diámetro en el fondo del sondeo. c) Instalación de la sonda de medida de deformaciones. d) Reperforación. e) Extracto del testigo y lectura de las deformaciones. ....	62
Figura 3-39. Esquema de sobreperforación con medidas con la célula USBM; direcciones de medida, direcciones de ejes y orientación de las tensiones principales en el plano de medida. ....	63
Figura 3-40. Fases de ejecución del método del doorstopper (Leeman, 1970) .....	64
Figura 3-41. Roturas inducidas en un sondeo al superar las tensiones horizontales de la resistencia de la roca, produciéndose planos de rotura perpendiculares a la dirección de la tensión horizontal mínima.....	65
Figura 3-42. Fracturamiento hidráulico en una roca porosa y permeable.....	72
Figura 3-43. Distribución de esfuerzos alrededor de un sondeo abierto y vertical, en una formación impermeable en un sondeo con alta presión. ....	73
Figura 3-44. Presión ideal en el sondeo en respuesta a la fractura hidráulica en un sondeo vertical. Se incluyen dos ciclos. ....	74
Figura 3-45. Presión realista en un sondeo durante la fractura hidráulica en un sondeo vertical. ....	76
Figura 3-46. Un sondeo orientado arbitrariamente bajo el sistema de esfuerzos in-situ (Salchi, 2012).....	78
Figura 3-47. Esquema de la pared de un sondeo, en la cual se asume una zona plástica (Addnoy, 2004). ....	80
Figura 3-48. Zona invadida y no invadida, en una fractura en un ambiente normal (Salehi, 2012). ....	81
Figura 3-49. Ilustración de una fractura paralela (izquierda) y una perpendicular (derecha) al sondeo. ....	82
Figura 3-50. Efectos del sondeo en la geometría del crecimiento de la fractura. Tipo zapata (a), típica sondeo (b) y de gravedad (c).....	83
Figura 3-51. Confinamiento de una fractura entre estratos de un esfuerzo mayor. ....	84
Figura 3-52. Confinamiento de una fractura entre estratos de un esfuerzo mayor. ....	85
Figura 3-53. Fotografía de un equipo de perforación.....	87
Figura 3-54. Curva presión vs tiempo junto con la tasa de flujo, para el método de Fractura Hidráulica.....	88
Figura 3-55. Fractura formada y tensiones principales en el plano normal al sondeo.....	89
Figura 3-56. Resultados típicos de la presión-tiempo y caudal-tiempo, durante el ensayo. ....	91
Figura 3-57. Tendencia típica para macizos rocosos permeables e impermeables.....	95
Figura 3-58. Esquema del equipo utilizado para el ensayo de fractura hidráulica. ....	96

Figura 3-59. Fotografía del equipo en superficie.....	97
Figura 3-60. Fotografía de un packer u obturador. ....	98
Figura 3-61. Fotografía de un medidor de caudales. ....	99
Figura 3-62. Fotografía de un sistema de válvulas. ....	99
Figura 3-63. Fotografía de una bomba y motor.....	100
Figura 3-64. Fotografía una consola de registro con su computador. ....	101
Figura 3-65. Esquema del equipo utilizado para el packer de impresión de fracturas....	102
Figura 3-66. Fotografía de televiewer. ....	103
Figura 3-67. Diagrama de cómo funciona el televiewer óptico.....	104
Figura 3-68. Diagrama de cómo funciona el televiewer acústico. ....	104
Figura 3-69. Esquema del ensayo por el método clásico.....	106
Figura 3-70. Esquema del ensayo por el método moderno.....	108
Figura 3-71. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de McLenan y Roegiers.....	109
Figura 3-72. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de la curva de decaimiento exponencial.....	110
Figura 3-73. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de la curva Log (presión) vs. Log(tiempo). ....	110
Figura 3-74. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de la curva de Presión vrs Log (tiempo). ....	111
Figura 3-75. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de la curva de Presión vs. Tiempo. ....	111
Figura 3-76. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método bilineal de tasa de decaimiento de presión.....	112
Figura 4-1. Flujo en zonas de medios porosos. El flujo a través de medios porosos se puede clasificar en tres zonas de flujo diferentes, dependiendo de la velocidad del fluido local dentro del espacio de los poros [Basak 1977]. ....	128
Figura 4-2. Flujo en zonas de la perforación.....	129
Figura 5-1. Figura esquemática del montaje del ensayo.....	137
Figura 5-2. Figura esquemática de la celda CT modificada con un intervalo abierto. ....	138
Figura 5-3. Fotografía de la estructura del ensayo CT.....	139
Figura 5-4. Fotografía del tubo de perforación, la pieza inferior y el pedestal de base. .	139
Figura 5-5. Fotografía del fluido BXLG. ....	143
Figura 5-6. Fotografía de la preparación de la celda CT.....	145
Figura 5-7. Resultados del ensayo de inyección de la muestra CTC08. ....	146
Figura 5-8. Imagen CT en tres dimensiones mostrando la fractura en la posición [a] y [b] de la Figura 5-7. ....	147
Figura 5-9. Imagen CT en tres dimensiones mostrando la fractura en la posición [c] y [d] de la Figura 5-7. ....	147
Figura 5-10. Imagen CT en tres dimensiones mostrando la fractura en la posición [e] y [f] de la Figura 5-7. ....	148

Figura 5-11. Fotografías de la muestra ensayada CTC08. [a] la muestra intacta, [b] la torta intacta, [c] parte de la torta es removida y [d] la sección horizontal de la torta donde se ve la fractura. ....	149
Figura 5-12. Montaje esquemático del ensayo. ....	153
Figura 5-13. Montaje del ensayo. Preparación de la muestra. ....	153
Figura 5-14. Detalle de la sección de la hidro-fractura, en la cual se muestra el difícil camino que cogió el agua, debido a las fuerzas intergranulares. ....	154
Figura 5-15. El segmento ascendente del primer ciclo, superpuesto a los ciclos siguientes. Nótese las emisiones acústicas (AE) preceden a la presión pico. ....	155
Figura 5-16. Representación de la parte ascendente de la curva presión-tiempo, en la forma de $dPdt$ en función de la presión. ....	156
Figura 5-17. Ensayos de fracturamiento hidráulico en muestras sin membrana con un mismo valor de $\sigma_h$ y variando la tasa de flujo $dPdt$ . ....	157
Figura 5-18. Ensayos de fracturamiento hidráulico en muestras sin membrana con una tasa de flujo constante pero variando la presión de confinamiento. ....	158
Figura 5-19. Modelo de hidrofracturamiento de Detounay y Cheng como una función de $\gamma$ cuando se da la condición de esfuerzo. ....	159
Figura 5-20. Compilación de los resultados del ensayo sin membrana, como $P_c - P_o$ vrs $\sigma_h - P_o$ , donde se aplicó la ley tensión efectiva del Terzaghi. ....	161
Figura 5-21. Compilación de los resultados del ensayo sin membrana, como $P_c - P_o$ vrs $2\sigma_h - (1 + \beta) P_o$ , donde $\beta = 0,72$ . ....	161
Figura 5-22. Montaje del ensayo. ....	165
Figura 5-23. Bombas ISCO DX100 tipo jeringa. ....	166
Figura 5-24. Sistema de acumulador de lodo. ....	166
Figura 5-25. Pistón de sobrecarga. ....	167
Figura 5-26. Válvula de sangrado. ....	167
Figura 5-27. Tapa inferior. ....	169
Figura 5-28. Tapa superior. ....	169
Figura 5-29. Montaje del aparato de fracturamiento hidráulico. ....	170
Figura 5-30. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 1. ....	175
Figura 5-31. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 2. ....	176
Figura 5-32. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 3. ....	176
Figura 5-33. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 4. ....	177
Figura 5-34. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 5. ....	177
Figura 5-35. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 6. ....	178
Figura 5-36. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 7. ....	178
Figura 5-37. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 8. ....	179
Figura 5-38. Vista desde arriba del bloque con sus fracturas. ....	181
Figura 5-39. Montaje del ensayo. Fotografía desde arriba, antes de ser sellado. ....	182
Figura 5-40. Componentes por dentro de la cámara. ....	183
Figura 5-41. Muestra para la realización del ensayo. ....	184
Figura 5-42. Vista desde arriba del bloque. Localización de las probetas de presión. Probetas 1 y 2, monitorean la fractura #1 (dirección este-oeste) y probetas 3, 4, 5 y 6,	

monitorean la presión antes y después de que intercepte la fractura #2 (dirección nortesur). Todas las medidas están en pulgadas. ....	185
Figura 5-43. Montaje del ensayo. Fotografía después de sellar la muestra. ....	186
Figura 5-44. Montaje de la instrumentación y adquisición de datos. ....	187
Figura 5-45. Descripción general de la estructura polyaxial puesta a punto. La Foto 1 muestra el marco de presión vacío. La Foto 2 muestra el ejemplar de ensayo colocado dentro del marco de presión, Fotos 3 y 4 muestran una placa de cuña y donde se coloca dentro del marco presión, respectivamente. La Foto 5 muestra los flatjacks, y la Foto 6 ilustra cómo se colocan los flatjacks entre el bloque de prueba y placas espaciadoras de cuña, dentro del marco de presión. ....	189
Figura 5-46. Impresión de la contribución de presión en la Ecuación 5-12 vs velocidad de inyección para viscosidades disponibles del fluido de fracturamiento (mostrado aquí en unidades de centipoise: 1 cP = 0.001 Pa.s). Como era de esperar, cuando se aumenta la velocidad de inyección y la viscosidad del fluido, las fuerzas de viscosidad empiezan a ser significativas en el proceso de la propagación de fracturas. ....	190
Figura 5-47. Representación del estado de esfuerzo para la extensión de la fractura #1. El camino de la fractura es en el plano este a oeste y el crecimiento está controlado por las probetas 1 y 2. ....	192
Figura 5-48. Representación del estado de esfuerzo para la extensión de la fractura #2. El camino de la fractura es en el plano norte a sur y el crecimiento está controlado por las probetas 3, 4, 5 y 6. ....	193
Figura 5-49. Resultados de presión para la fractura #1. ....	194
Figura 5-50. Resultados de presión para la fractura #2. ....	195
Figura 5-51. Fotografías de las fracturas, después del ensayo. a) Fractura #1 y b) fractura #2. ....	196
Figura 5-52. Esquema de la cámara triaxial auténtica. ....	198
Figura 5-53. Fotografía de la cámara triaxial auténtica. ....	199
Figura 5-54. Diagrama del sistema hidráulico de la inyección que muestra (a) el depósito de fluido de entrada, (b) el sistema automatizado de la válvula, (c) las bombas de jeringa de Teledyne Isco, (d) el acumulador de suspensión mixta, (e) la cabeza del pozo de inyección, (f) la muestra de ensayo, (g) la perforación de producción opcional, y (h) el depósito de flujo de salida opcional. ....	200
Figura 5-55. Método de sellado. ....	200
Figura 5-56. Diagrama de la superficie con la posición de los sensores. ....	201
Figura 5-57. Sensor AE instalado en la placa de carga. ....	202
Figura 5-58. Gráfica de datos hidráulicos para la fractura primaria. ....	204
Figura 5-59. Ubicaciones de origen de eventos AE durante la fractura hidráulica primaria. ....	205
Figura 5-60. AE genera la superficie de fractura de la fractura hidráulica inicial. ....	206
Figura 5-61. Gráfica del segundo ensayo de flujo de agua. ....	207
Figura 5-62. Gráfica del segundo ensayo de flujo de agua. ....	207
Figura 5-63. Gráfica del segundo ensayo de flujo de agua. ....	210

Figura 5-64. G La(a) Comportamiento esperado de la hidro-fractura como una función de los dos esfuerzos principales horizontales. Esto se ha encontrado que es esencialmente correcto en muestras de laboratorio [por ejemplo, Haimson, 1968]. (b) La desviación significativa de la dirección de la fractura esperada en la pared del pozo se puede producir, cuando el diámetro del agujero y el tamaño de los granos son del mismo orden de magnitud. (c) las discontinuidades de la roca orientados favorablemente, podrían causar que la fractura hidráulica se desvíe de su curso esperado. ....	211
Figura 5-65. Historia típica de la presión del pozo en una prueba de la fracturación hidráulica. Se muestran cuatro ciclos de presurización. ....	212
Figura 5-66. Diagrama esquemático del sistema triaxial para el ensayo de fracturamiento hidráulico. ....	215
Figura 5-67. Fracturas naturales aleatorias en la superficie del bloque después de calentarlo y dejarlo ventilar.....	215
Figura 5-68. Esquema del interior del bloque. El espacio abierto en el sondeo es de 10 mm.....	216
Figura 5-69. Relación entre la geometría de las fracturas hidráulicas y la diferencia del esfuerzo horizontal.....	218
Figura 5-70. Fractura vertical principal con múltiples ramificaciones (muestra 1). ....	218
Figura 5-71. Fractura vertical parcial con ramificaciones aleatorias (muestra 4). ....	219
Figura 5-72. Fractura radicalmente aleatorias en forma de malla (muestra 6).....	219
Figura 5-73. Señales de presión de las redes de fracturas radiales aleatorias y la fractura dominante con múltiples ramas.....	219
Figura 5-74. Análisis de la presión de cierre usando la función-G (muestra Min-2). ....	221
Figura 5-75. Señales de presión de las redes de fracturas radiales aleatorias y la fractura dominante con múltiples ramas.....	222
Figura 5-76. Señales Contexto de mecánica simple, para la fractura impulsada por un fluido. ....	225
Figura 5-77. Señales Modelo CGD (2D) de la fractura, en un aparato de separación de temprana interfaz, alimentada por una fuente de fluido.....	226
Figura 5-78. Modelo Perkins y Kern (PK), para la simulación de las fracturas delimitadas en altura, pero que se extiende lateralmente desde el pozo.....	228
Figura 5-79. Aparato de interfaz del escritorio de laboratorio para la simulación de hidro-frac (DISLASH), se muestra el modelado de una grieta circular.....	229
Figura 5-80. Gráfico escalado de resultados originales, resultados recientes y la teóricos. ....	230
Figura 5-81. Superficies de crecimiento de la fractura en la muestra bajo esfuerzo hidrostático. ....	233
Figura 5-82. La interacción entre las fracturas que crecen en pozos adyacentes, a) las superficies de crecimiento de la fractura. b) Comparación entre las trayectorias teóricas y experimentales.....	234
Figura 5-83. Crecimiento de la fractura en el campo de esfuerzos sesgados. a) superficies de fracturas típicas. b) Comparación entre las trayectorias teóricas y experimentales.....	235

Figura 5-84. Localización de los sitios en Italia donde se han realizado mediciones de los esfuerzos in-situ. ....	238
Figura 5-85. El esfuerzo vertical del ensayo versus la presión de sobrecarga. ....	239
Figura 5-86. La inclinación $\beta$ del esfuerzo secundario versus la inclinación del talud. ...	239
Figura 5-87. Izquierda; una vista isométrica de la cámara triaxial usada para los ensayos con muestras de roca. Derecha; fotografía de la celda entre los pistones de carga. ....	242
Figura 5-88. Resultados de un ensayo típico de fracturamiento hidráulico. ....	243
Figura 5-89. Fotografía del dispositivo triaxial usado para el ensayo de muestras remoldeadas. ....	244
Figura 5-90. Relación entre la presión de rotura y el esfuerzo horizontal.....	245
Figura 5-91. Influencia de la viscosidad del fluido.....	246
Figura 5-92. Secciones horizontales y verticales de la muestra ensayada. ....	246
Figura 5-93. Influencia de la velocidad de la presurización en una presión de la rotura.	247
Figura 5-94. Influencia del diámetro de la perforación en la presión de rotura con diferentes fluidos de fractura. ....	247
Figura 5-95. Influencia de la presurización de la longitud de la perforación en la presión de rotura.....	248
Figura 5-96. Caudal del agua versus la presión obtenida en la presa de Ridracoli. ....	248
Figura 6-1. Esquema representativo de la distribución de esfuerzos en un ensayo triaxial verdadero cúbico(a) y un triaxial normal cilíndrico (b).....	251
Figura 6-2. Esquema del montaje del aparato de esfuerzos poliaxiales, tipo bloque de concreto. ....	252
Figura 6-3. Fotografía de un montaje del aparato de esfuerzos poliaxiales, tipo bloque de concreto. ....	252
Figura 6-4. Esquema del montaje del aparato de esfuerzos poliaxiales, tipo bloque de concreto envuelto en un anillo de acero de alta resistencia.....	253
Figura 6-5. Fotografía del aparato de esfuerzos poliaxiales, tipo bloque de concreto envuelto en un anillo de acero de alta resistencia. ....	253
Figura 6-6. Esquema de un flatjack. ....	254
Figura 6-7. Fotografía transversal de un flatjack antes de inflarse.....	254
Figura 6-8. Esquema ilustrativo de un corte transversal de un flatjack, antes de la inyección del fluido (arriba) y después de la inyección (abajo). ....	254
Figura 6-9. Esquema ilustrativo de un corte transversal de cómo actúan los flatjacks sobre la muestra.....	255
Figura 6-10. Esquema ilustrativo de un corte transversal mostrando la función de la bomba de inyección. ....	256
Figura 6-11. Fotografía del transductor de presión Omega® PX309. ....	257
Figura 6-12. Esquema ilustrativo de un corte transversal mostrando la función de la bomba de inyección. ....	257
Figura 6-13. Fotografía de un transductor de desplazamiento.....	258
Figura 6-14. Fotografía de un transductor de deformación. ....	258
Figura 6-15. Fotografía de un aparato de adquisición de datos.....	259

Figura 6-16. Esquema ilustrativo de un corte transversal mostrando la función de la bomba de inyección. ....	259
Figura 6-17. Diagrama de flujo mostrando el método utilizado para las condiciones ideales. Los cálculos son limitados por una viscosidad de 586.800 cp y un tiempo de 5 minutos. ....	262
Figura 6-18. Fotografía del aparato de fracturamiento hidráulico HFT-70. ....	263
Figura 6-19. Fotografía del aparato triaxial que también funciona para el ensayo de fracturamiento hidráulico RTX-1000. ....	264

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1. Métodos de medida del campo de esfuerzos in situ. ....	57
Tabla 4-1. Límites para los regímenes de flujo. Fand et al. [1987] definir los regímenes de flujo por los límites superior e inferior de número de Reynolds. ....	127
Tabla 5-1. Características de la arena y sus aditivos. ....	137
Tabla 5-2. Resumen de las condiciones iniciales y los resultados del ensayo de inyección en la arena. ....	146
Tabla 5-3. Propiedades físicas y mecánicas de la arenisca ensayada. ....	152
Tabla 5-4. Parámetros de entrada de los ensayos. ....	174
Tabla 5-5. Resumen resultados de los ensayos. ....	174
Tabla 5-6. Especificaciones para el fluido de fracturación de aceite de silicona ....	181
Tabla 5-7. Propiedades de los materiales de relleno y la arenisca Colton. ....	185
Tabla 5-8. Especificaciones para el fluido de fracturación de aceite de silicona ....	191
Tabla 5-9. Parámetros para la generación de las fracturas en el bloque. ....	192
Tabla 5-10. Propiedades de los materiales a ensayar. ....	203
Tabla 5-11. Propiedades de los bloques a ensayar antes del tratamiento de calor. ....	216
Tabla 5-12. Condiciones de los esfuerzos in-situ en los ensayos. ....	217
Tabla 5-13. Condiciones de los esfuerzos in-situ en los ensayos. ....	220

# AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero agradecerle a Dios por darme la oportunidad de vivir para crear este trabajo de grado.

Mis sincera gratitud a mi director de grado, Ramiro Gutierrez, porque sin su guía no hubiera podido terminar este trabajo de grado

También quiero agradecerle a mi familia por todo el apoyo que me dieron.

Me gustaría dar un agradecimiento a mi compañero y amigo, Daniel Cañas, que gracias a sus valiosos consejos pude terminar este trabajo de grado.

También quiero agradecer a la empresa de consultoría INGETEC S.A. por todo el soporte suministrado.

Y finalmente, le dedico este trabajo de grado a mi esposa, María Rosa García, por toda la paciencia y amor.

# 1.INTRODUCCIÓN

Conocer los esfuerzos in-situ en un macizo rocoso, es un parámetro esencial para cualquier proyecto ingenieril que se desarrolle subterráneamente. En el diseño de un túnel a presión de una central hidroeléctrica, es un factor determinante para poder evitar que se presente el fenómeno de fracturamiento hidráulico en el macizo y así evitar pérdidas de agua que conllevan a problemas en generación y/o la estabilidad de laderas cercanas. En cuanto a proyectos de pozos de yacimientos de hidrocarburos, el conocer los esfuerzos in-situ es fundamental para determinar la magnitud y la dirección de la fractura y así controlar su propagación.

Por este motivo el ensayo de fracturamiento hidráulico se considera importante, ya que con esta técnica se puede determinar el valor del esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$  in-situ) del macizo rocoso. Por ser una técnica que ha venido evolucionando en el tiempo es necesario revisar el estado del arte del ensayo de fracturamiento hidráulico. Esto requiere conocer el marco teórico explicando el ensayo, las variaciones que tiene dependiendo de las condiciones del macizo y otras variables. Así como sus funciones y la posibilidad de representar a escala pequeña ensayos de laboratorio que puedan recrear el comportamiento y así mejorar conceptos para interpretación de resultados de una forma más razonablemente.

Este trabajo de grado ayudará a entender más la técnica del ensayo de fracturamiento hidráulico, su formulación e interpretación para que en futuros mega proyectos en el país puedan disponer de la información relacionada completa y adecuada.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo de grado es proporcionar el estado del arte del ensayo de fracturamiento hidráulico. Específicamente en los ensayos de laboratorio de fracturamiento hidráulico realizados a nivel mundial.

El trabajo de grado pretende proporcionar las herramientas necesarias para poder entender y realizar un ensayo de fracturamiento hidráulico en campo y/o en el laboratorio.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Realizar un resumen de los aspectos geológicos conceptuales referentes al entorno en el cual se desarrolla el ensayo de fracturamiento hidráulico. Este resumen va desde el entendimiento de la formación de la Tierra y su relación con el estado de esfuerzos in-situ.
- ✓ Describir los tensores de esfuerzos y explicar su importancia en la ingeniería y proyectos ingenieriles. Y también cómo influyen los tensores de esfuerzos en el ensayo de fracturamiento hidráulico.
- ✓ Generar el marco teórico del ensayo de fracturamiento hidráulico. Desde su historia, pasando por los equipos necesarios y llegando hasta su interpretación.
- ✓ Recopilar la información de los ensayos de fracturamiento hidráulico que se han recreado en el laboratorio. Mostrar los procedimientos y equipos necesarios para dichos laboratorios.
- ✓ Recopilar los problemas que se tienen en la interpretación de los resultados obtenidos en el ensayo.
- ✓ Recomendaciones para simular el ensayo de fracturamiento hidráulico en el laboratorio.

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1 ASPECTOS GEOLÓGICO Y GEOESTRUCTURALES (Ciencias de la Tierra [1])

#### 3.1.1 Origen de la Tierra

La tierra es un planeta en constante movimiento, y se puede comprobar y observar con los volcanes y terremotos que suceden a diario en todas partes del mundo. Estos movimientos se originan por procesos tectónicos que se producen en el interior del planeta. Para explicar mejor estos procesos vale la pena comenzar por el origen del planeta en sí, lo que implica una mirada al origen del universo y del sistema solar.

Existen varias hipótesis que describen el proceso del origen del universo, la más aceptada y estudiada, es la hipótesis del *Bing Bang*. Esta teoría postula que el origen del universo comenzó hace unos 15.000 millones de años, donde en un tiempo cero, el universo estaba concentrado en una sola masa. Luego en un tiempo uno, la gran masa explotó en millones de millones de partículas, enviando toda la materia hacia el espacio. Las primeras partículas en crearse fueron las moléculas de hidrógeno y helio, las cuales, al enfriarse y condensarse, formaron las primeras estrellas y galaxias. Una de esas galaxias es la Vía Láctea, en donde se formó nuestro sistema solar y nuestro planeta.

En un extremo de la galaxia, hace 5.000 millones de años, una porción de materia se condensó en una nube más densa, donde por las fuerzas gravitacionales, una esfera central se comenzó a formar y a su alrededor se formaron esferas más pequeñas. La nube se formó en disco plano con un sol en formación (*protosol*) en su centro. En la condensación del sol, su energía gravitacional se convirtió en energía térmica (calor), formándose una estrella.

Al terminar de formarse el sol, la temperatura comenzó a descender. Esto hizo que los materiales con puntos de fusión elevados se pudieran condensar y unirse entre sí. Los materiales como el hierro, níquel y minerales formadores de rocas, comenzaron a formar masas metálicas y rocosas que empezaron a rotar alrededor del sol. Estas masas al comenzar a girar, terminaron chocando entre sí, para unirse y generar masas más grandes (protoplanetas). Decenas de millones de años después, estas masas crecieron hasta convertirse en los cuatro planetas interiores llamados Mercurio, Venus, Tierra y Marte.

Los protoplanetas al incrementar de tamaño, comenzaron a atraer material de la nebulosa y el choque entre estos generó que se incrementara la temperatura de estos cuerpos. Las elevadas temperaturas y los campos gravitacionales débiles, causó que los componentes menos pesados no pudieran ser retenidos, como el helio e hidrógeno.

Luego los vientos solares expulsaron a estos componentes ligeros hasta la parte alejada del Sol, lo cual ocasionó que los planetas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) se comenzaran a formar. Las bajas temperaturas en este sector, ocasionaron que estos planetas se formaran por materiales con alto porcentaje de hielos (agua, dióxido de carbono, amoníaco y metano) y detritos rocosos y metálicos.

En cuanto al planeta Tierra, las altísimas temperaturas en las que se encontraba, generaron que el hierro y níquel se fusionaran entre sí. Estas gotas de metal pesado se filtraron hacia el centro de la tierra, que en poco tiempo geológico formó el núcleo denso y rico en hierro de la Tierra. Esta fusión que se desarrolló en el núcleo ocasionó que la roca se fundiera y ascendiera hacia la superficie para solidificarse y que se formará la corteza terrestre primitiva. Con esto se crearon las tres divisiones del interior del planeta, núcleo, corteza y manto. El núcleo rico en hierro, una corteza delgada y el manto que se encuentra entre el núcleo y la corteza. En este proceso de diferenciación química comenzaron a crearse erupciones de gases del interior del planeta, lo que ocasionó el inicio de nuestra atmosfera y por consiguiente la formación de la vida.

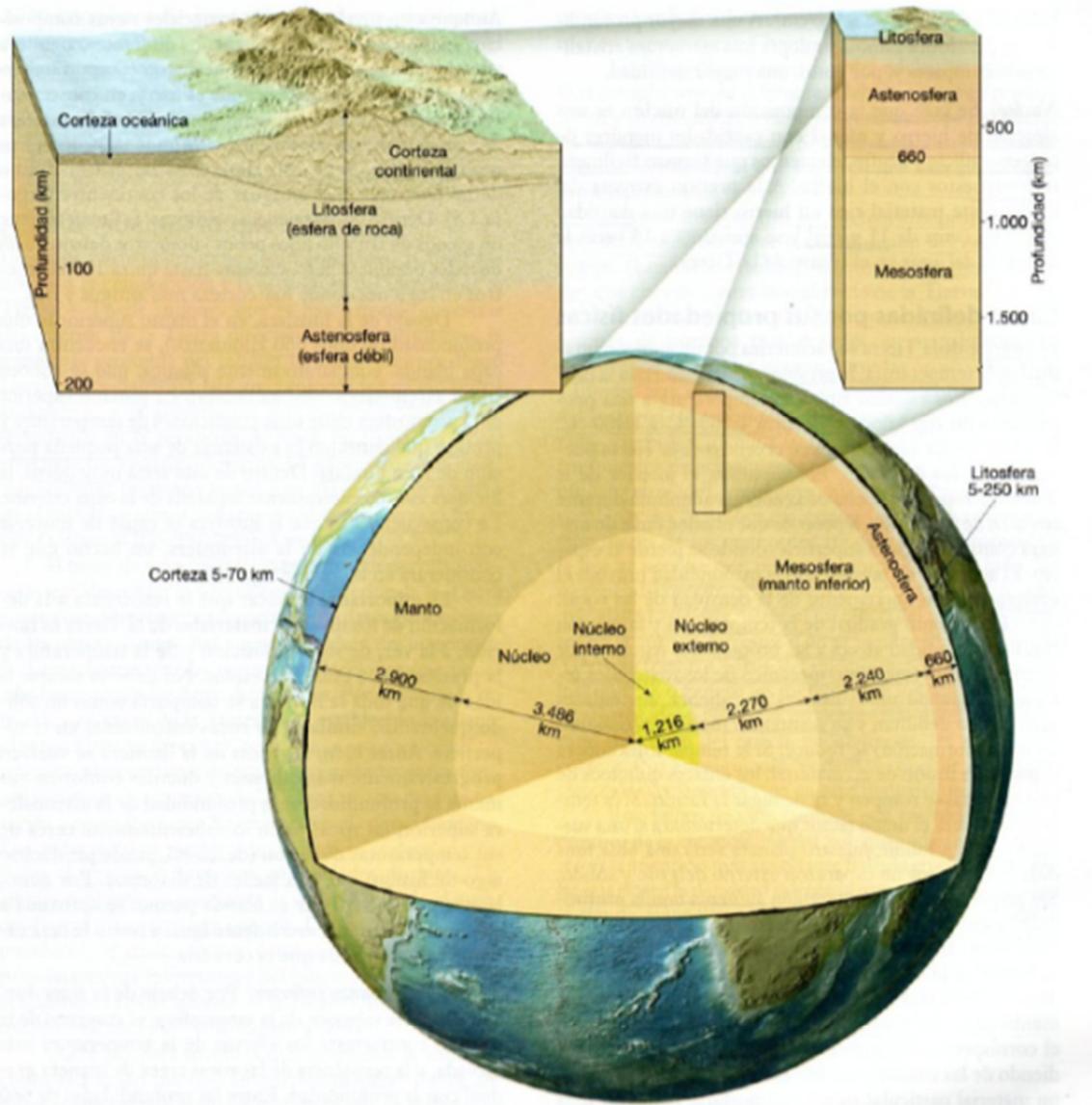
### **3.1.1 Dentro de la tierra**

El planeta tierra está conformado por tres capas definidas por su composición química: núcleo, manto y corteza (Véase Figura 3-1). La capa más externa, rígida y delgada de las tres, es la corteza. Esta capa tiene un espesor variable, de más o menos 7 km por debajo de los océanos (corteza oceánica) y 35 km en promedio por debajo de los continentes (corteza continental) aunque en los Alpes puede tener un espesor alrededor de los 100 km. La corteza oceánica está compuesta por rocas ígneas oscuras denominadas basaltos de más o menos 180 millones de años de edad con una densidad de aproximadamente  $3,0 \text{ g/cm}^3$ . En cambio la corteza continental está compuesta por rocas variadas. En la parte superior de la corteza se pueden encontrar rocas de composición media de rocas graníticas denominadas granodiorita y en la parte inferior se pueden encontrar rocas más parecidas al basalto. La edad más antigua encontrada en esta corteza es de 4.000 millones de años y la densidad promedio de esta corteza es de unos  $2,7 \text{ g/cm}^3$ .

Debajo de la corteza se encuentra el manto, un material denso, caliente y semi-sólido con un espesor de 2.900 km. El límite entre la corteza y manto hay un cambio en su composición química, en lo que se puede encontrar más hierro magnesio y calcio. La roca predominante en el manto superior es la peridotita, con una densidad de  $3,3 \text{ g/cm}^3$ .

Y finalmente en el centro de la tierra se encuentra el núcleo. Este tiene un espesor de 3.450 km, es mucho más denso que el manto a causa de su composición metálica (aleación entre el hierro y níquel). El núcleo está compuesto por dos capas, una externa líquida de 2.200 km y una interna sólida de 1.250 km de espesor. El material rico en

hierro que se encuentra en el núcleo, debido a las altas presiones, tiene una densidad de  $11 \text{ g/cm}^3$ .



**Figura 3-1. Estructura interna de la Tierra.**

**Fuente: Ciencias de la Tierra [1].**

Además de estas tres capas de composición química diferente que conforman el interior de la tierra, hay tres capas que se diferencian entre sí por sus propiedades físicas, como por su carácter sólido o líquido y dúctil o resistentes.

En la tierra la presión, temperatura y densidad aumentan a medida que se aumenta la profundidad. Esto hace que las propiedades físicas de los materiales terrestres cambien

a medida que la profundidad aumenta. Por este motivo la tierra se puede dividir en cinco capas principales en función de sus propiedades físicas: litosfera, astenosfera, mesosfera, núcleo externo y núcleo interno.

En la parte superior del manto donde la temperatura es menor y su estructura es más rígida, se encuentra una capa de roca llamada litosfera (del Griego lithos = piedra). El espesor de esta capa puede variar entre 7 km, en los océanos y 250 km de grosor en las partes más antiguas de los continentes. Por debajo de esta capa, científicos consideran que existe otra capa más débil y deformable llamada astenosfera (del Griego athenos = sin fuerza). La astenosfera es de un material sólido, pero a causa de las altas temperaturas y presiones, su viscosidad es más débil que la de la litosfera, facilitando su deformación plástica. Esta condición que separa la litosfera de la capa inferior hace que la litosfera se pueda mover independiente de la astenosfera, ya que puede “flotar” o moverse lentamente sobre el material viscoso más débil.

Por debajo de la zona dúctil de la astenosfera entre 660 km y 2.900 km de profundidad se encuentra la mesosfera (del Griego meso = medio) o manto inferior. Al encontrarse en altas profundidades, su presión y temperatura son muy elevadas por lo tanto las rocas que se encuentran son muy calientes y son capaces de fluir de una manera muy gradual.

Al terminar el manto inferior se encuentra el núcleo, este se divide en dos zonas, una líquida (núcleo externo) con un espesor de 2.270 km y una sólida (núcleo interno) con 1.216 km de espesor. En el núcleo externo se generan corrientes convectivas del hierro metálico, que generan el campo magnético de la tierra.

### **3.1.2 Superficie de la Tierra**

La superficie de la tierra está dividida en dos partes, la corteza continental y la corteza oceánica. La corteza continental está constituida esencialmente por rocas graníticas con una densidad de aproximadamente  $2.7 \text{ g/cm}^3$  y un grosor que oscila entre los 35 y 40 km. Y la corteza oceánica está constituida por rocas basálticas con una densidad de  $3.0 \text{ g/cm}^3$  y un espesor medio de 7 km.

Los continentes se pueden clasificar entre regiones planas que se han erosionado hasta casi el nivel del mar y regiones elevadas deformadas que conforman el cinturón de montañas. En general los cinturones montañosos son jóvenes, estrechos y largos, y se pueden encontrar en las márgenes continentales. Mientras que las áreas llanas y estables se encuentran en el interior de los continentes.

Los cinturones montañosos más jóvenes (100 millones de años) se encuentran en dos sectores, el cinturón del pacífico y el cinturón que se encuentra entre los Alpes hasta Indonesia. Estos terrenos montañosos en general son grandes secuencias de rocas que han experimentado grandes compresiones, como si estuvieran en un torno gigantesco.

El interior de los continentes es de una edad de 600 o más millones de años, lo que hizo que esta cadena montañosa con el tiempo se convirtiera en una llanura estable. En estas zonas generalmente se pueden encontrar rocas del Precámbrico con una edad superior a los 1.000 millones de años. Estas rocas tienen un claro indicio de las enormes fuerzas que las han plegado, fallado y meteorizado. También existen otras zonas en el interior que están cubiertas por una capa relativamente fina de rocas sedimentarias, de conformación casi horizontal, excepto en algunos puntos donde se han hundido y han formado grandes cuencas.

La corteza oceánica se puede dividir en tres unidades topográficas principales: márgenes continentales, cuencas oceánicas profundas y dorsales oceánicas (centro oceánicas). Las márgenes continentales se subdividen en la plataforma continental, el talud continental y el pie del talud. Las cuencas oceánicas no se limitan con el contacto entre el continente y el océano, ya que el continente continúa unos kilómetros más, este tramo se denomina plataforma continental. Cuando este tramo termina y comienza un cambio brusco en la pendiente, es el límite divisorio que da origen a la cuenca oceánica. Ésta pendiente alta se denomina talud continental. Pero cuando la pendiente no es tan abrupta y se acumulan sedimentos, se denomina pie del talud.

Entre las márgenes continentales y las dorsales oceánicas se encuentran las cuencas oceánicas principales, en estas se pueden encontrar regiones llanas o regiones extremadamente profundas, que pueden llegar a tener unos 1.100 metros de profundidad. Las regiones llanas se pueden extender por muchos kilómetros, pero las fosas profundas son relativamente regiones estrechas, que en comparación con todo el fondo oceánico es muy poco, pero son estructuras muy importantes, debido a su proximidad con los continentes, como la fosa de Perú y Chile que es paralela a la cordillera de los Andes.

La actividad volcánica en el fondo oceánico genera pequeñas llanuras de lava, que a veces forman cadenas de estrechas y largas como la llanura Ontong Java, situada al noreste de Nueva Guinea.

Las dorsales oceánicas son estructuras prominentes que sobresalen del fondo oceánico en una estructura larga y ancha que forma un cinturón continuo que serpentea a lo largo del planeta. Las estructura dorsales más conocidas son la dorsal Centro atlántica y la dorsal del Pacífico oriental.

### **3.1.3 Las Rocas**

Como se describe anteriormente las rocas es el material más común y abundante de la Tierra. Las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes que habitualmente se consideran un sistema continuo. Las partículas minerales son compuestos químicos, cada uno de ellos con su

propia composición y sus propiedades físicas. Esta composición y propiedades físicas de la roca dependen directamente del proceso geológico en el cual fue creado.

Las rocas se dividen en tres grandes grupos según su origen: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

**Rocas Ígneas:** las rocas ígneas son formadas por el enfriamiento del magma o roca fundida. Se entiende por magma a un fluido natural a elevada temperatura, constituido por material de roca que goza de cierta movilidad. Al enfriarse el magma, se van formando y creciendo los cristales de varios minerales. Cuando el magma está ubicado en la profundidad de la corteza, este se enfría muy lentamente, generando que los cristales se formen de gran tamaño. Las rocas ígneas de grano grueso que se forman muy por debajo de la superficie se denominan plutónicas. Un ejemplo de este tipo de rocas es el granito. Esta roca es rica en minerales de silicatos de color claro, el cuarzo y feldespatos.

En cambio cuando el magma se enfría rápidamente sus cristales no se desarrollan completamente, por ende sus cristales son de menor tamaño. Esto sucede cuando hay una erupción de un volcán y el magma al estar en contacto con el ambiente se solidifica rápidamente y se crean cristales muy pequeños. Este tipo de rocas se denominan volcánicas y suelen ser de grano fino. Un ejemplo claro de este tipo de rocas es el basalto. Esta roca de color verde oscuro a negro es rica en minerales silicato que contienen buena cantidad de hierro y magnesio. Debido a su gran contenido de hierro el basalto es más denso que el granito.

**Rocas Sedimentarias:** La meteorización y erosión de las rocas existentes producen partículas de diversos tamaños que son transportados por el agua, hielo o viento, hasta ser depositado en diferentes lugares. Una vez se acumulan y están en reposo sufren procesos que los transforman en rocas sedimentarias. En resumen los procesos que determinan la creación de una roca sedimentaria son: meteorización, erosión, transporte, sedimentación y diagénesis.

La meteorización es el proceso físico químico que sucede en las rocas al estar en contacto con agentes externos principales, es decir, la atmósfera y la hidrósfera. La erosión es el proceso responsable de desplazar los materiales de suelo por la acción del agua, viento y hielo. Ya estos materiales meteorizados y erosionados son transportados hasta llegar al lugar de sedimentación. El transporte de los materiales se puede dar por la acción de la tracción, la saltación, la suspensión, la flotación y la disolución. La sedimentación es la acumulación del material meteorizado, erosionado y transportado desde los lugares de mayor energía del medio de transporte (aire, agua y hielo), hasta lugares donde la energía es menor. Y finalmente sucede la diagénesis, que es el proceso en el cual el sedimento experimenta un cambio físico químico tras su deposición hasta convertir los sedimentos en roca. Normalmente los sedimentos se convierten en roca o se litifican por medio de los siguientes procesos: la compactación y la cementación. La

compactación se da cuando el peso del sedimento que se va colocando por encima comprime los sedimentos en masas densas y la cementación se produce conforme el agua que contiene sustancias disueltas se filtra a través de los espacios intergranulares del sedimento, luego con el tiempo el agua sale o se seca y entre las partículas queda el material cementante y con la ayuda de la compactación se unen las partículas en una masa sólida.

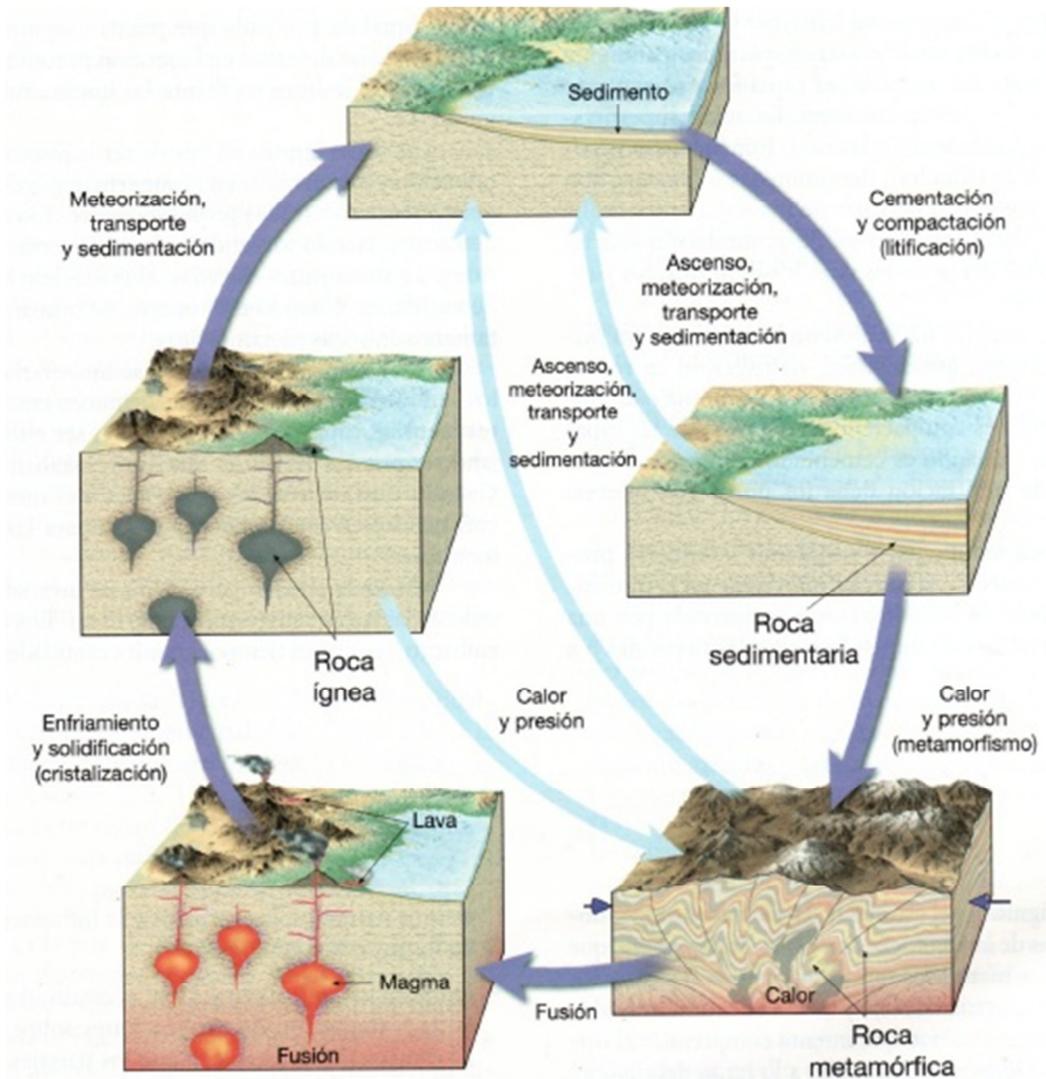
**Rocas Metamórficas:** Las rocas metamórficas son el producto de la recristalización de otras rocas de naturaleza ígnea, sedimentaria o metamórfica, bajo la acción de cambio de presión y temperatura. Estas acciones de metamorfismo pueden ocurrir en los siguientes ambientes: térmico o de contacto, hidrotermal y regional.

El metamorfismo térmico o de contacto se da cuando el proceso deformativo dominante es el térmico. En este caso el cambio está controlado por el aumento de la temperatura dentro de la roca. El metamorfismo hidrotermal implica que la roca huésped es alterada químicamente cuando el agua caliente rica en iones circula a través de las fracturas de la roca. Y el metamorfismo regional se da cuando hay cambios en la presión y temperatura durante el dinamismo en la creación de las cordilleras.

El grado de metamorfismo se puede observar en la textura de la roca y en la composición mineral. En algunos casos la roca original sufre alargamientos a acortamientos, lo cual genera un efecto de dirección que orienta los minerales de la roca madre. Algunas de estas nuevas posiciones en la re-cristalización pueden quedar paralelas entre sí, esto se le llama foliación, esto quiere decir que la roca esta laminada. A este tipo de rocas se les llama Foliadas. Cuando los minerales se cristalizan en una forma no foliada, se les llama *masiva*, como consecuencia las rocas que son compuestas predominantemente por estos minerales, tiene una estructura masiva, o sea, aquella que no tiene dirección referente o fácil de separarse o dividirse en láminas. También pueden existir unas rocas con ambas texturas, esto quiere decir que las rocas están constituidas por laminas paralelas entre si y por laminas desordenadas entre sí. A este tipo de rocas se les llama néisica y generalmente sus divisiones están señaladas por diferentes colores.

- Ciclo de las Rocas

El ciclo de las rocas o ciclo litológico es un concepto que describe la transformación que tienen las rocas en el tiempo que permiten que toda roca se pueda transformar en cualquiera de los tres tipos de roca mencionados anteriormente.



**Figura 3-2. Ciclo de las Rocas.**  
**Fuente: Ciencias de la Tierra [1].**

Todo el ciclo comienza con el magma que se forma en el interior del planeta. Este magma con el tiempo se enfría y solidifica. Esto puede suceder por debajo de la superficie o en la superficie del planeta cuando hay una erupción de un volcán. Este proceso hace que se cristalice el magma y de origen las rocas ígneas.

Las rocas ígneas al estar en contacto con la atmósfera, sufren de la acción de la meteorización que descompone la roca, luego está es transportada por agentes externos, como el agua, hielo o viento y estos sedimentos son depositados en zonas de acumulación.

Si los sedimentos son compactados a causa del peso de las capas supra yacentes o si se produce la cementación por la intrusión de minerales en el agua que llenan los poros, se produce la litificación lo que origina la Roca Sedimentaria.

Esta roca puede encontrarse en las profundidades de la tierra y si interviene en el proceso dinámico de la formación de las montañas o si hay una intrusión de magma, la roca es sometida a grades presiones o altas temperaturas, o a ambas cosas. Estos procesos generarán que la roca sedimentaria se convierta en la roca metamórfica. Pero si la roca metamórfica sufre otros incrementos de presión y temperatura, esta puede fundirse y transformarse en magma, el cual al solidificarse se transformará en roca ígnea.

En resumen, el calor que sucede en el interior de la tierra genera las rocas ígneas y metamórficas. Y la meteorización, erosión, transporte y depositación producen sedimentos que a su vez generan las rocas sedimentarias.

### **3.1.4 Estructuras Geológicas**

La combinación de los diferentes tipos de pliegues y fallas que afectan la corteza terrestre produce la variedad de estructuras observables en la Tierra, como las grandes cadenas de montañas y las cuencas sedimentarias. Todas las rocas tienen algunas características que constituyen su estructura, y es aquí en donde nace la geología estructural, la cual es una rama de la geología que estudia las estructuras geológicas presentes en la corteza terrestre, ya sea de todo el planeta o de una determinada región. En los estudios geológicos de esta naturaleza se realiza la identificación y análisis de las principales estructuras geológicas, y su reconocimiento, para luego realizar el mapeo de las estructuras tectónicas de un determinado sector.

Las estructuras geológicas es la forma en la cual se encuentra la roca en el terreno y estas se pueden clasificar en dos formas principales, las primarias y las secundarias.

- **Primarias**

Son aquellas que se forman al mismo tiempo que la masa de la roca misma. Tanto las rocas sedimentarias como las ígneas tienen estructura primaria y muchos de sus derivados metamórficos presentan estructuras primarias que no fueron modificadas durante la alteración de la roca. A través de esta estructura, la roca es depositada horizontalmente y no son afectadas por los movimientos verticales (epirogénicos) y horizontales (orogénicos).

- **Secundarias**

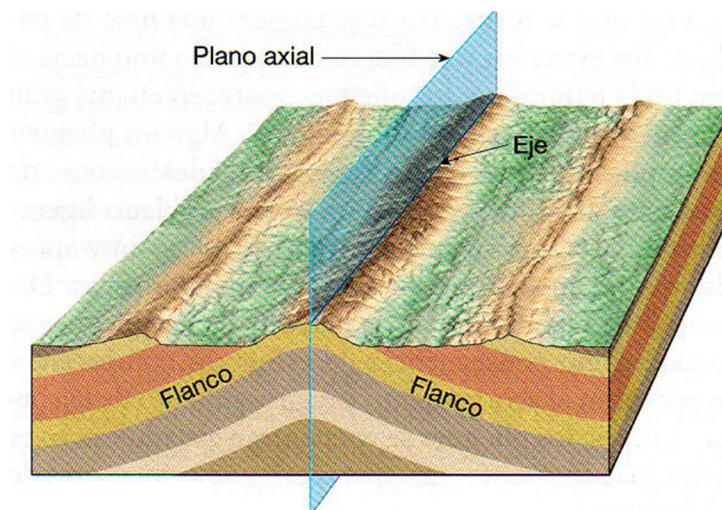
Son aquellas que se han formado después de la consolidación de la masa rocosa por las fuerzas de los movimientos epirogénicos y orogénicos a través de los cuales la roca se

ha ondulado y deformado. Son de este tipo de estructura los pliegues, fracturas o fallas, fisuras, etc.

### *Pliegues*

Son inflexiones o dislocaciones u ondulaciones, más o menos bruscas, que presentan las capas sedimentarias cuando son modificadas de su posición natural (la horizontal) por los agentes orogénicos, que se presentan dentro del proceso del diastrofismo. Estos agentes o fuerzas generan deformaciones plásticas y continuas tridimensionales, por lo que también se les llaman cuerpos geológicos, los cuales pueden tener desde unos cuantos decímetros hasta centenares de kilómetros de extensión. Un pliegue es simétrico cuando posee los flancos iguales e igualmente inclinados y será asimétrico si tiene sus planos desiguales. Los pliegues suelen ser más habituales en rocas sedimentarias plásticas, como las volcánicas, aunque también se presentan en rocas metamórficas.

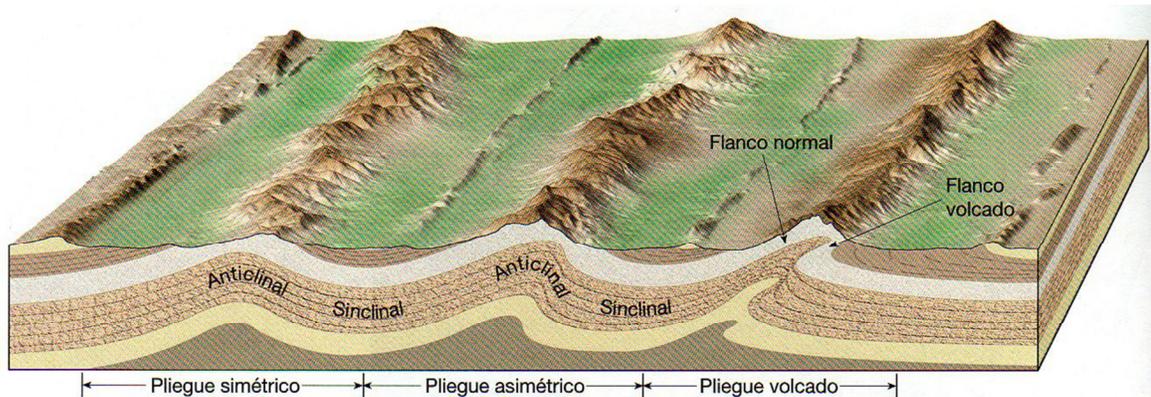
Para entender los pliegues y el plegamiento, se debe familiarizar con la terminología utilizada para nombrar las partes de un pliegue. Los dos lados de un pliegue se denominan flancos. Una línea trazada a lo largo de los puntos de máxima curvatura de cada estrato se llama línea de charnela, o simplemente charnela. El plano axial es una superficie imaginaria que divide un pliegue de la manera más simétrica posible (Véase Figura 3-3).



**Figura 3-3. Partes de un pliegue.**  
**Fuente: Ciencias de la Tierra [1].**

Hay dos tipos de pliegues, el anticlinal y el sinclinal. Un pliegue anticlinal se forma casi siempre por plegamiento convexo, o arqueamiento, de las capas de roca. En cambio los sinclinales son pliegues cóncavos, o surcos. Estos pliegues pueden ser simétricos, cuando los flancos son imágenes el uno y el otro y anti-simétricos cuando no lo son. Se

dice que un pliegue asimétrico está volcado o acostado si uno de los flancos está inclinado más allá de la vertical (Véase Figura 3-4).

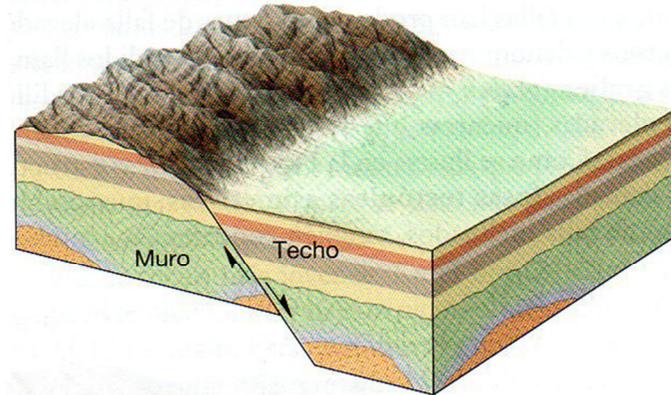


**Figura 3-4. Tipos de pliegues.**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].

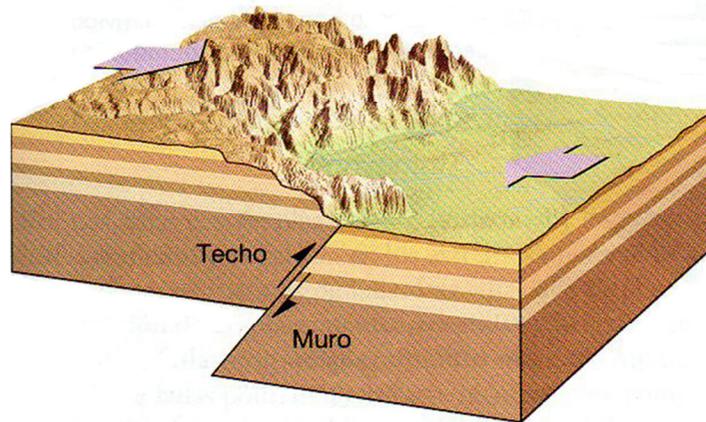
### Fallas

Corresponde a la fractura que se presenta en las rocas a lo largo de las cuales ha tenido lugar un movimiento o desplazamiento. Este movimiento produce un plano o zona de falla, que pueden alcanzar un ancho que va desde milímetros hasta los cientos de metros. Los movimientos o desplazamientos pueden ser pequeños (milímetros) o muy grandes llegando a alcanzar los cientos de kilómetros. Los geólogos clasifican a las fallas por sus movimientos relativos, que pueden ser predominantemente horizontales, verticales u oblicuos.

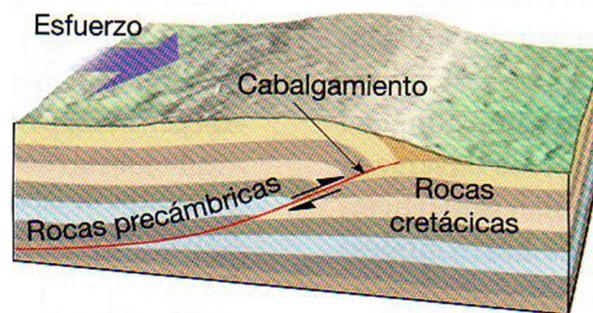
Las fallas en las que el movimiento es fundamentalmente paralelo a la inclinación o buzamiento de la superficie de falla se denominan fallas con desplazamiento vertical. Este tipo de movimiento puede producir pequeños resaltos denominados escarpes de falla. Se identifica como techo a la superficie rocosa que está inmediatamente por encima de la falla y muro a la superficie de roca inferior. Los dos tipos principales de falla con desplazamiento vertical se denominan fallas normales (Véase Figura 3-5) y fallas inversas (Véase Figura 3-6). Además, cuando una falla inversa tiene un ángulo de buzamiento o inclinación menor de  $45^\circ$  se denomina de cabalgamiento (Véase Figura 3-7)



**Figura 3-5. Falla normal.**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].



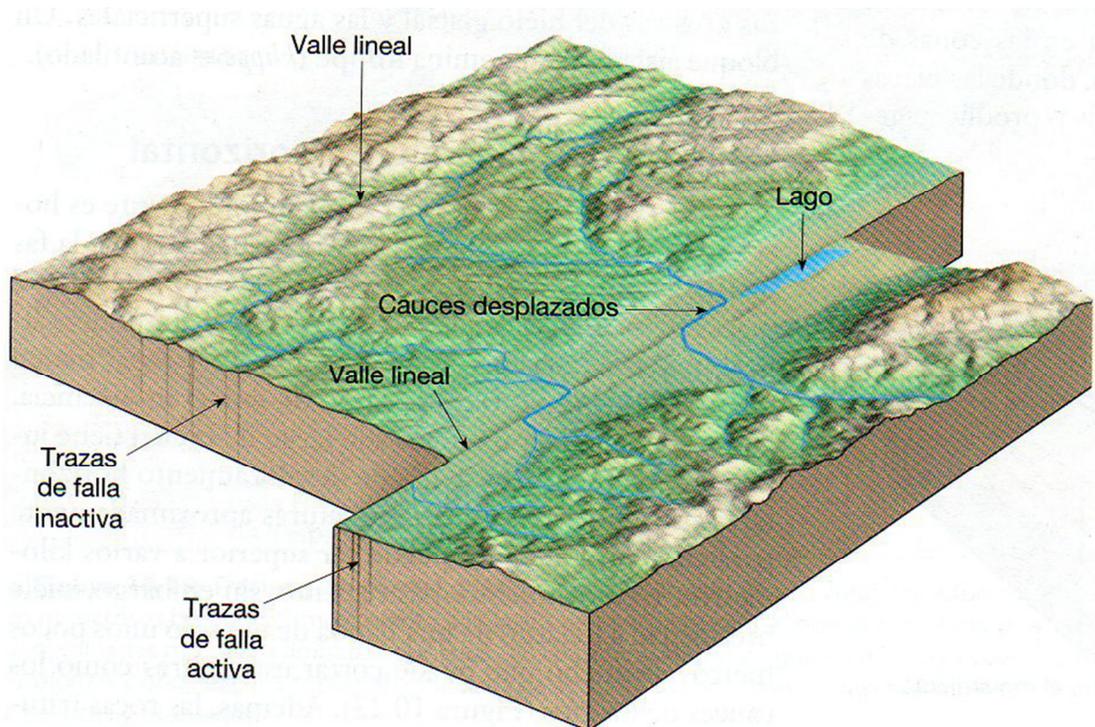
**Figura 3-6. Falla inversa.**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].



**Figura 3-7. Falla de cabalgamiento.**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].

Las fallas en las que el desplazamiento dominante es horizontal y paralelo a la dirección de la superficie de falla, se denominan fallas de desplazamiento horizontal. En vez de

una fractura única a lo largo de la cual tiene lugar el movimiento, las fallas de desplazamiento horizontal consisten en una zona de fracturas aproximadamente paralelas, cuya anchura puede ser superior a varios kilómetros. El movimiento más reciente, sin embargo suele producirse a lo largo de una banda de tan sólo unos pocos metros de ancho que puede cortar estructuras como los cauces de los ríos (Véase Figura 3-8).



**Figura 3-8. Falla de desplazamiento horizontal.**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].

### *Diaclasas*

Son fracturas sin desplazamiento transversal detectable, solo con poco movimiento extensional. Son las fracturas más frecuentes en todos los tipos de rocas. En la superficie son más frecuentes como en altas profundidades. Tienen una extensión de milímetros, centímetros hasta pocos metros. Normalmente existen en una masa rocosa, grupos de diaclasas o sistemas de diaclasas. Los sistemas de diaclasas se cortan entre sí en ángulos definidos y tienen una cierta simetría. Algunas diaclasas están rellenas con calcita u otros minerales. Según su origen se clasifican en varios tipos:

**Diaclasas de Descompresión.** Estas se originan en las rocas que están sometidas a grandes presiones de carga y estas terminan.

Diaclasas de Compresión. Estas se originan en las partes cóncavas de los plegamientos; son de tipo cerrado pues en esta zona los materiales se reorganizan para así ocupar menos volumen.

Diaclasas Tensionales. Estas se forman en la parte convexa de los plegamientos y son abiertas por el mecanismo opuesto al de compresión.

Diaclasas de Retracción. Estas son abiertas y se originan por el proceso de enfriamiento del magma en la formación de rocas ígneas, debido a la disminución de volumen que esto implica.

### 3.1.5 Tectónica de placas

La tectónica de placas es la ciencia que estudia la deformación que se produce en las rocas a causa de movimientos de la capa externa de la tierra que generan los continentes, las montañas y las cuencas oceánicas. Estos movimientos se generan a causa de los movimientos que produce la capa externa de la tierra por medio de mecanismos de subducción y de expansión del fondo oceánico.

La teoría de la tectónica de placas fue una revolución en el mundo geológico. A comienzos del siglo XX la comunidad científica aprobaba la idea que los continentes eran estructuras sólidas sin movimiento y que las montañas se formaban a causa de fuerzas compresivas que se originaban por el enfriamiento y contracción del centro de la tierra. Luego en 1925 el científico Alfred Wegener publica su libro "The origin of the Continents and Oceans" donde por medio de investigaciones realizadas a fósiles similares encontrados en Brasil y África, propuso que en el pasado la Tierra estaba constituida por un súper-continente llamado *Pangea* (pan = todo, gea = tierra) y que hace unos 200 millones de años el súper-continente se comenzó a fragmentar en continentes más pequeños y se movieron hasta suposiciones actuales.

Esta teoría no fue muy aceptada dentro de la comunidad científica a causa de que Wegener no pudo demostrar cómo podían moverse los continentes. Ya no fue sino hasta la década de los sesenta donde nuestra comprensión de la naturaleza y el funcionamiento de nuestro planeta cambiaron conforme a la tectónica de placas. Los científicos pudieron demostrar que la corteza externa de la Tierra se mueve y que los continentes migran de una manera gradual a través del planeta.

En la Figura 3-9 se muestra cómo hace 200 millones de años el súper-continente Pangea se comenzó a separar hasta llegar a la posición actual de los continentes.

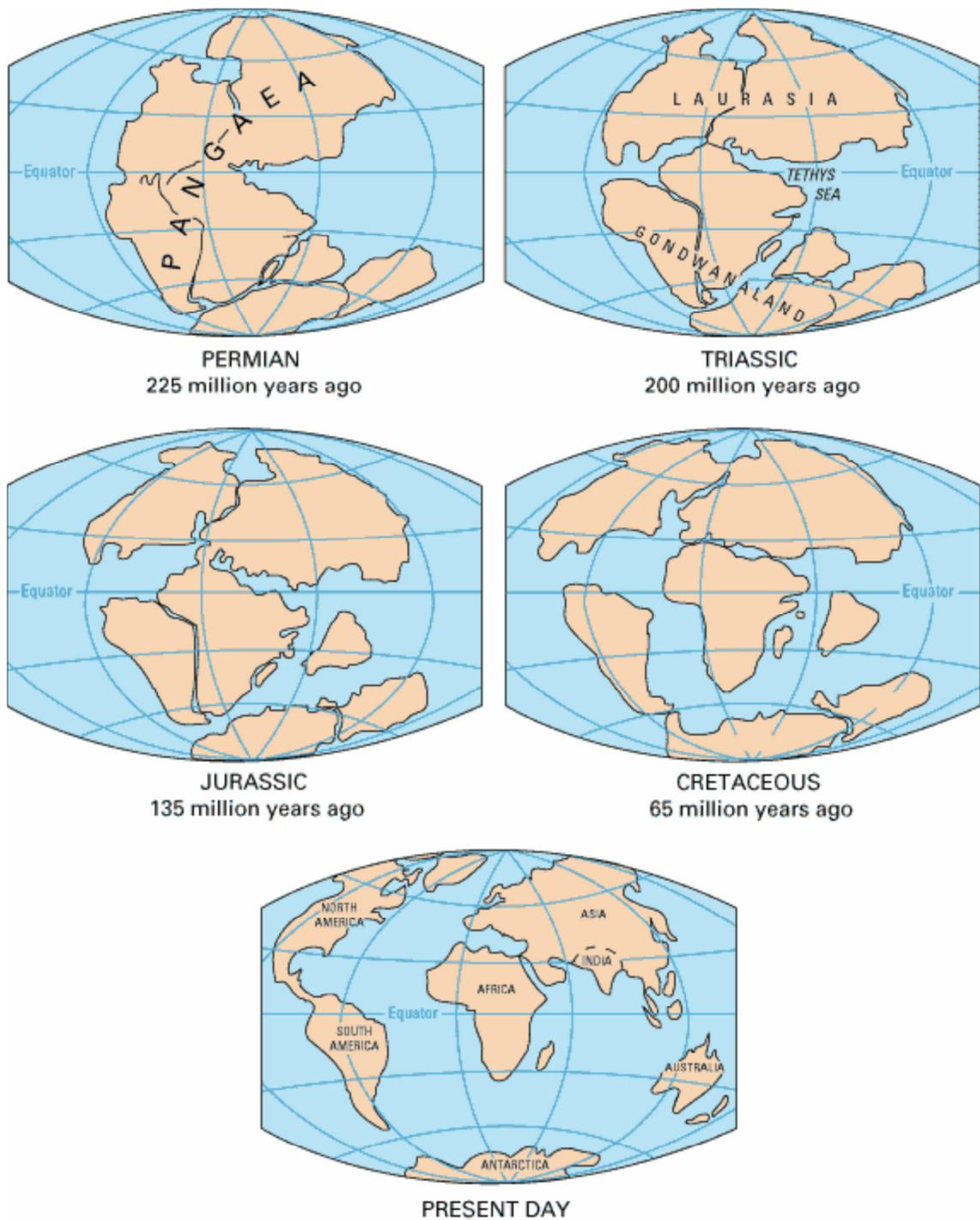
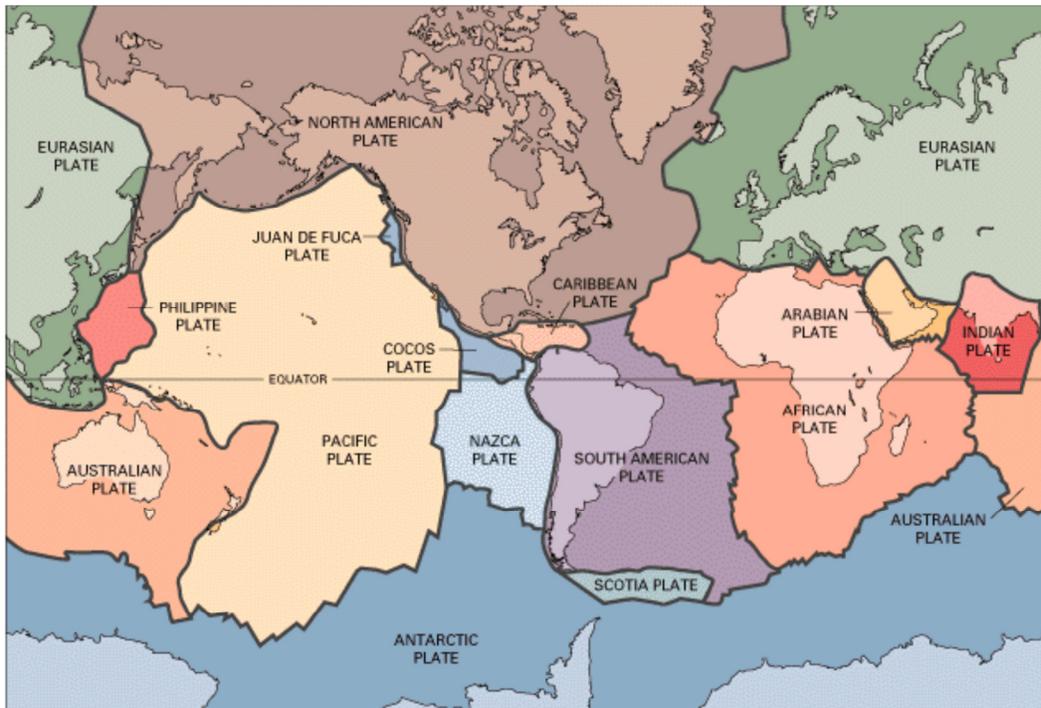


Figura 3-9. Esquema de la fragmentación de Pangea a lo largo de un periodo de 225 millones de años hasta conformar los continentes actuales.

Fuente: This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics (online edition) [5].

Según la tectónica de placas, la litosfera se comporta como una capa rígida y fuerte, la cual está rota en fragmentos, denominados placas (Véase Figura 3-10). Estas placas de la litosfera continental pueden tener un grosor entre 100 y 150 km, mientras que las placas oceánicas alcanzan a tener un grosor entre pocos kilómetros en las dorsales oceánicas y 100 km en las cuencas oceánicas profundas. Las placas se pueden dividir en siete placas principales, la placa Norteamericana, la Sudamericana, la del Pacífico, la Africana, la Euroasiática, la Australiana y la Antártica.



**Figura 3-10. Esquema de la fragmentación de las placas.**

**Fuente: This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics (online edition) [5].**

La litosfera se encuentra por encima de un estrato más dúctil, la astenosfera (Véase Figura 3-1). La temperatura que puede soportar la astenosfera superior es tal que los materiales que la conforman están en su límite del punto de su punto de fusión, lo que hace que esta zona tenga un comportamiento dúctil que permite la separación efectiva de la litosfera de las capas inferiores. Por este motivo la roca que es menos resistente que se encuentra en la astenosfera superior permite el movimiento de la capa externa rígida de la Tierra.

Las placas se mueven en relación con las demás a una velocidad muy lenta pero continua a la vez de unos cinco centímetros por año. Este movimiento de las placas nace dentro de la astenosfera donde existe una convección térmica importante. La tierra tiene que evacuar el calor que se libera de la desintegración de los elementos radioactivos atrapados en profundidad, como lo son esencialmente; el uranio, el torio y el potasio. Como resultado, la astenosfera se encuentra caliente en su base y la pérdida de calor en

el tope que hace contacto con la litosfera fría, genera corrientes de convección contra-rotativos.

La convección dentro de la astenosfera se puede comparar a la convección que existe dentro de un recipiente de agua (Véase Figura 3-11): si se calienta muy poco un recipiente lleno de agua, ningún movimiento se puede observar. Al aumentar el calentamiento, aparecen a la superficie pequeñas corrientes. Si tiramos en el agua pequeñas migas de pan, se observa que existe una corriente ascendente en el centro del recipiente, y descendente cerca de las paredes. Si aumentamos más la llama, los movimientos del líquido son más rápidos y más desordenados.



**Figura 3-11. Corrientes de convección dentro de un recipiente de agua.**  
Fuente: Física y la Tierra [6].

Esto mismo ocurre en la Tierra (Véase Figura 3-12), el material caliente que se encuentra en las profundidades del manto se mueve despacio hacia arriba y simultáneamente, las láminas más frías y densas de la litosfera oceánica descienden al manto, poniendo en movimiento la capa externa rígida de la tierra. Estos roces entre las placas litosféricas de la tierra ocasionando terremotos, creando volcanes y deforman grandes masas de roca en las montañas.

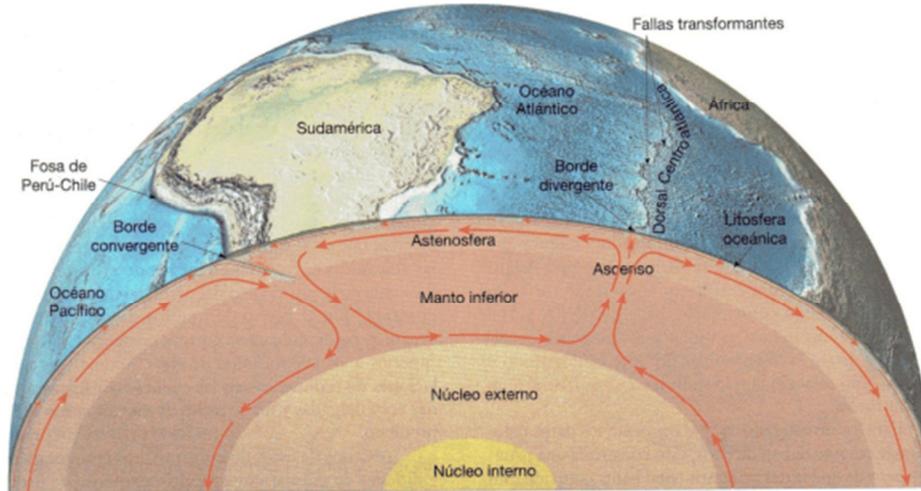
El movimiento de las placas litosféricas genera un roce entre cada una de ellas en sus bordes, lo cual ocasionan deformaciones. Estas deformaciones en los bordes se pueden clasificar en tres categorías, borde divergente, borde convergente y borde transformante.

- **Borde Divergente**

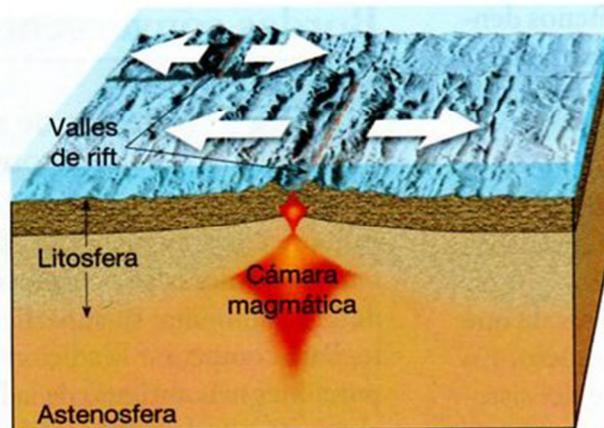
Los bordes divergentes o también denominados bordes constructivos, son aquellos donde dos placas se separan, lo que produce el ascenso de material desde el manto para crear nuevo suelo oceánico.

La mayoría de estos bordes divergentes ocurren a lo largo de la cresta de las dorsales oceánicas, acá a medida que las placas se separan del eje de la dorsal, las fracturas creadas se llenan inmediatamente con roca fundida que asciende desde el manto

caliente situado debajo. Luego este magma es enfriado lentamente generando una roca dura y produciendo así nuevos fragmentos del fondo oceánico (Véase Figura 3-13)



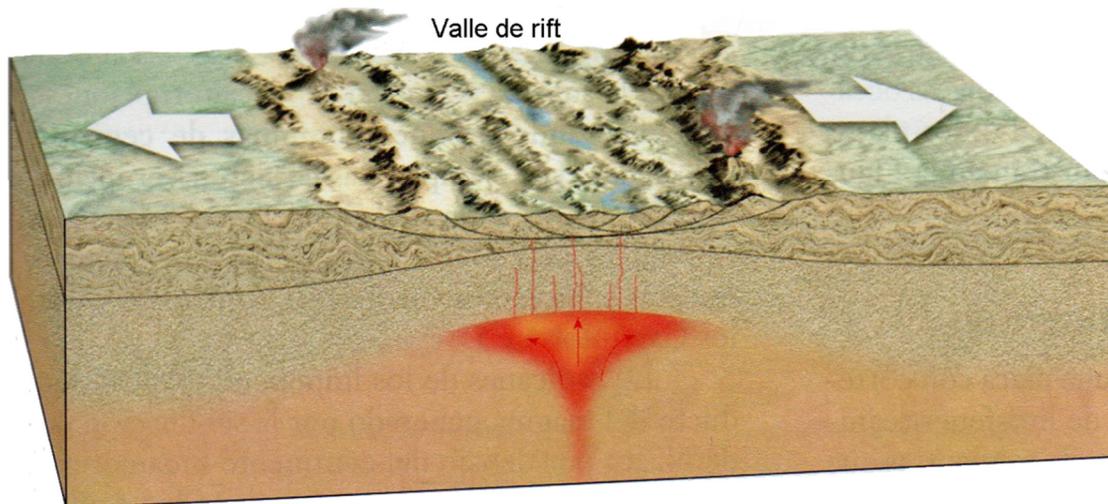
**Figura 3-12. Corrientes de convección dentro de la Tierra**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].



**Figura 3-13. Bordes divergentes a lo largo de la cresta de las dorsales oceánicas.**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].

También pueden existir bordes de placa divergentes en el interior de un continente, en donde la masa continental se fragmenta en dos o más fragmentos. Esta división comienza con la formación de una depresión alargada denominando rift continental. En esta las fuerzas tensionales han estirado y adelgazado la corteza continental, lo que da como resultado que la roca fundida ascienda desde la astenosfera e inicia una actividad

volcánica en la superficie, al continuar la divergencia la placa puede terminar separándose (Véase Figura 3-14).



**Figura 3-14. Bordes divergentes a lo largo de la cresta de las dorsales continentales. Rift continental.**

Fuente: Ciencias de la Tierra [1].

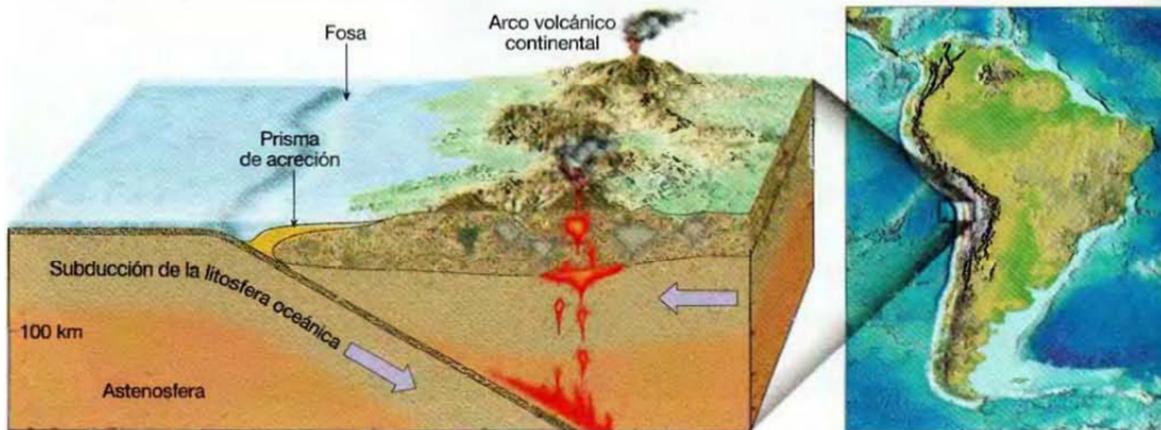
#### ▪ Borde Convergente

Los bordes convergentes o bordes destructivos, es en donde dos placas se juntan provocando el descenso de la litosfera oceánica debajo de una placa superpuesta, que es finalmente absorbida por el manto, o posiblemente puede darse la colisión de dos bloques continentales creando un sistema montañoso.

Cuando dos placas van convergiendo lentamente, el borde frontal de una de ellas se doble hacia abajo, permitiéndole deslizarse por debajo de la otra. A medida que esto sucede lentamente, el borde frontal de una de ellas se dobla hacia abajo, permitiéndole deslizarse por debajo de la otra. Esta superficie de la placa descendente se denomina *fosa submarina*. La subducción entre placas siempre se da con la placa oceánica por debajo de la continental. Esto se debe a que la placa oceánica es más densa que la astenosfera adyacente, mientras que la litosfera continental es menos densa y resiste la subducción.

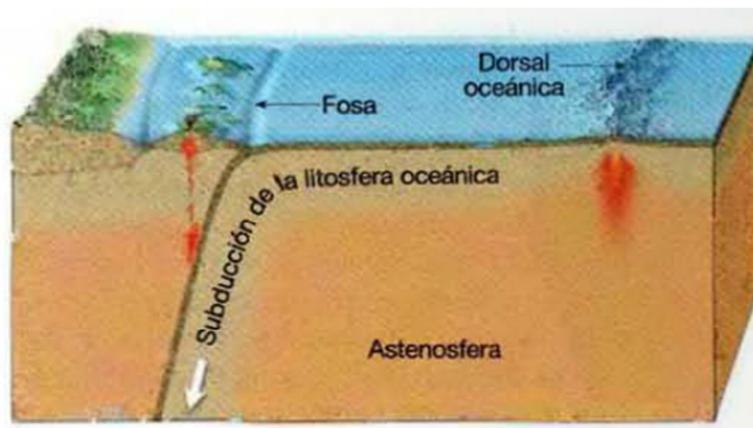
Las capas litosféricas descienden en la astenosfera en ángulos de pocos grados a casi vertical, pero el ángulo medio es de 45°. Este ángulo depende de la densidad que posea la placa. Por ejemplo, si la litosfera donde ocurre la subducción es joven, caliente y con alta flotación, el ángulo de descenso es pequeño. En zonas donde se presenta este poco ángulo, hay mucha interacción entre la placa descendente y la placa superior, por

consiguiente son zonas con muchos terremotos, como la fosa Perú-Chile (Véase Figura 3-15).



**Figura 3-15. Borde convergente con ángulo de subducción bajo. Fosa de Perú-Chile**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].

También puede existir el caso de que la litosfera es más vieja y más fría, lo que hace que aumente su grosor y su densidad, por ende las láminas de subducción descienden en un ángulo de  $90^\circ$  (Véase Figura 3-16).



**Figura 3-16. Borde convergente con ángulo de subducción de  $90^\circ$ .**  
Fuente: Ciencias de la Tierra [1].

Las zonas convergentes tienen las mismas características generales, pero hay algunos rasgos muy variables, como el tipo de material de la corteza que interviene y el ambiente tectónico. Pueden presentarse tres escenarios de convergencia, entre dos placas oceánicas, entre una placa oceánica y otra continental y entre dos continentales.

*Convergencia oceánica-continental*

La placa oceánica al ser más densa que la placa continental, al ocurrir la convergencia, la placa oceánica se hundirá en el manto. Cuando la placa oceánica descienda unos 100 km, se desencadena la fusión dentro de la cuña de la astenosfera caliente supra yacente. Esto se da a causa de que los sedimentos y la corteza oceánica contienen una gran cantidad de agua que a medida que es hundida por la subducción, el agua es expulsada de los espacios porosos conforme aumenta la presión de confinamiento. A una profundidad aproximada de 100 kilómetros y a varios kilómetros del borde superior de la capa oceánica en subducción, el manto es lo suficientemente caliente como para que la introducción de agua conduzca a la fusión.

Este proceso, denominado *fusión parcial*, se entremezcla con la roca no fundida del manto. Al ser esta mezcla menos densa que la roca que la rodea, esta tiende a subir a la superficie como una estructura en forma de gota. Según el contorno, estos magmas en forma de gota pueden subir hasta la superficie y provocar una erupción volcánica. Esto sucede con la subducción de la placa de Nazca por debajo del continente sudamericano.



**Figura 3-17. Esquema de la convergencia oceánica- continental.**  
Fuente: *This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics* (online edition) [5].

#### *Convergencia oceánica-oceánica*

Cuando convergen dos placas oceánicas, una desciende por debajo de la otra, iniciando una actividad volcánica por el mismo mecanismo que actúa en un borde convergente oceánica-continental. En este escenario los volcanes crecen desde el fondo oceánico antes que sobre una plataforma continental. Cuando la subducción se mantiene, acabará por construir cadenas de estructuras volcánicas que emergen como islas. Esta tierra formada que consiste en una cadena en forma de arco de pequeñas islas volcánicas se denomina arco de islas volcánicas. Las islas volcánicas suelen estar separadas aproximadamente por unos 80 kilómetros y están formadas sobre dorsales sumergidas de unos cuantos centenares de kilómetros de anchura (Véase Figura 3-18).



Figura 3-18. Esquema de la convergencia oceánica- oceánica.  
Fuente: This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics (online edition) [5].

#### *Convergencia continental-continental*

Como en una convergencia oceánica-continental la placa oceánica es subsumida por la placa continental, pero si la placa oceánica en subducción contiene litosfera continental, esta subducción acabará uniendo los dos bloques continentales. Mientras la litósfera oceánica es relativamente densa y se hunde en la astenosfera, la litosfera continental flota, lo cual impide que esta sea hundida a gran profundidad. Esto da como resultado un colisión de dos bloques continentales (Véase Figura 3-19).

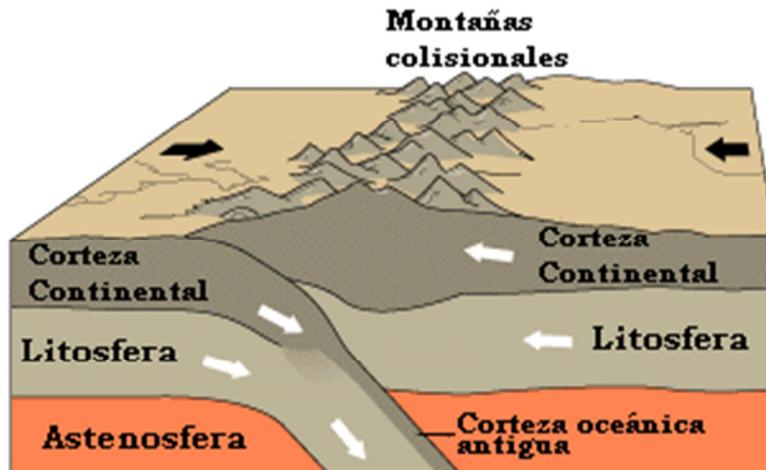


Figura 3-19. Esquema de la convergencia continental- continental.  
Fuente: This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics (online edition) [5].

- **Borde Transformante**

Los bordes transformantes o bordes pasivos, son donde dos placas se desplazan lateralmente una respecto a la otra sin la producción o destrucción de la litosfera. Este tipo de borde fue identificado en primer lugar allí donde se desplazan los segmentos alineados de una dorsal oceánica.

La mayoría de las fallas transformantes unen dos segmentos de la dorsal centro oceánica. Aquí, son parte de unas líneas prominentes de rotura en la corteza oceánica conocidas como zonas de fractura, que abarcan las fallas transformantes y sus extensiones inactivas en el interior de las placas. Las fallas transformantes activas se encuentran solo entre los dos segmentos desplazados de la dorsal. Aquí, el fondo oceánico producido de un segmento de la dorsal se desplaza en la dirección opuesta al fondo oceánico generado en el segmento opuesto. Por consiguiente entre los dos segmentos de la dorsal las dos placas adyacentes se están rozando mientras se desplazan a lo largo de la falla. La orientación de estas zonas de fractura es aproximadamente paralela a la dirección del movimiento de la placa. Por lo tanto, estas estructuras pueden utilizarse para cartografiar la dirección del movimiento de las placas en el pasado geológico.

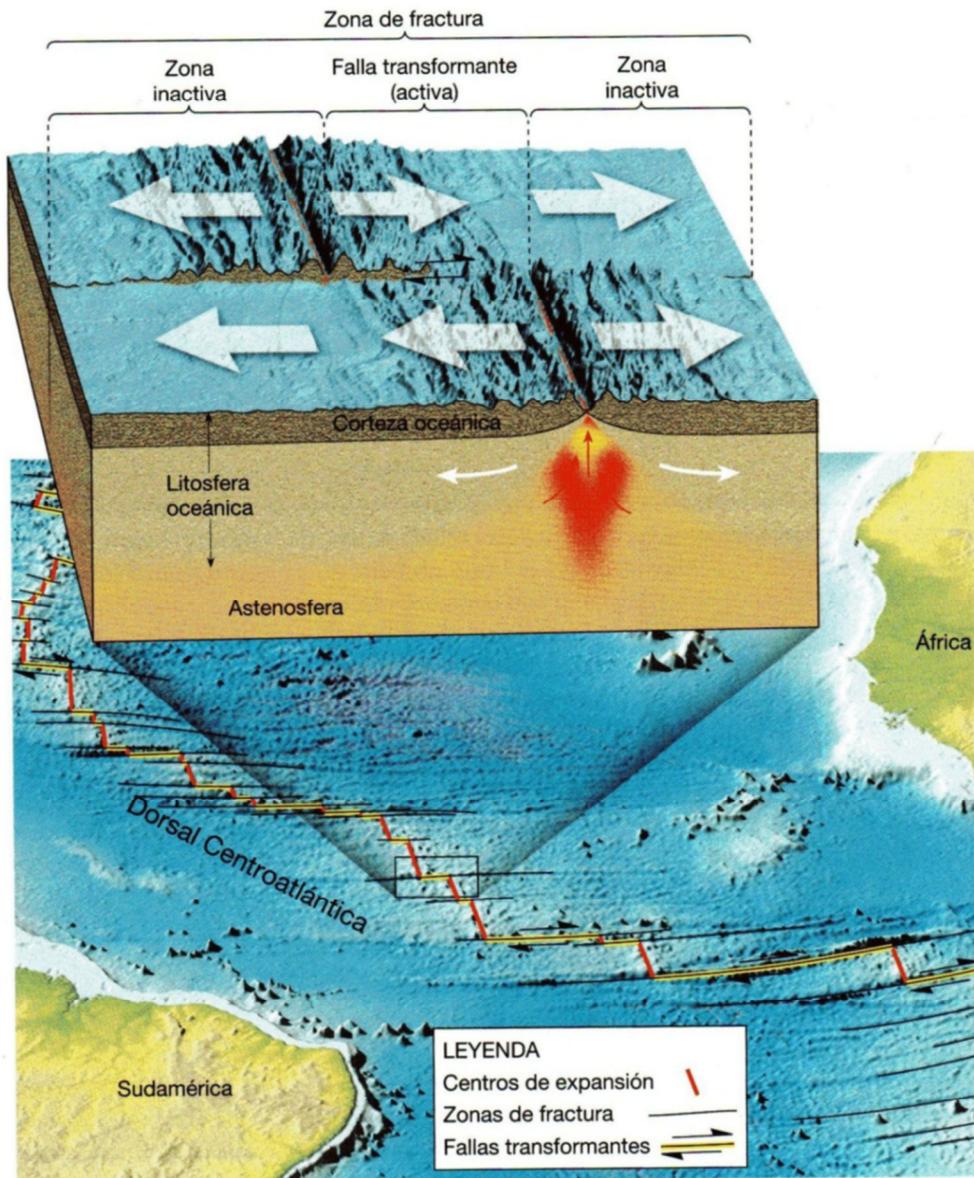


Figura 3-20. Borde transformantes.

Fuente: Ciencias de la Tierra [1].

## 3.2 TENSOR DE ESFUERZOS (Ingeniería Geológica [2])

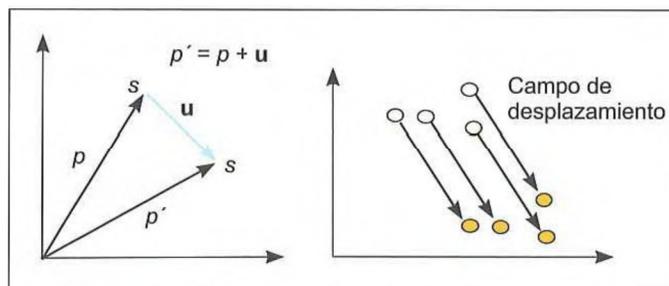
Las rocas, a diferencia de los materiales artificiales como el concreto y el acero, presentan defectos estructurales debido a la variación en la composición mineralógica, orientación de los minerales que la conforman, porosidad, micro fisuración, grado de alteración, etc. Además los macizos rocosos contienen discontinuidades y zonas meteorizadas o tectonizadas. Estas características se reflejan en unas propiedades

físicas y mecánicas heterogéneas, discontinuas y anisotrópicas, que gobiernan la respuesta mecánica del medio rocoso frente a la actuación de las fuerzas.

La aplicación de nuevas fuerzas, da lugar a cambios en el estado mecánico de los sistemas rocosos, produciéndose una serie de efectos internos, como desplazamientos, deformaciones y modificación del estado tensional o de esfuerzos. En los ensayos de laboratorio se aplican fuerzas para producir la rotura del material y conocer así sus propiedades resistentes y deformaciones.

El estado mecánico de un sistema está caracterizado por, la posición de cada una de sus partes, la cual está definida por sus coordenadas, las fuerzas que actúan entre y sobre las partes del sistema y la velocidad con que las partes cambian de posición. La diferencia entre dos estados mecánicos, quedarán definidas por los desplazamientos, las deformaciones y los cambios en el estado tensional o de esfuerzos.

El desplazamiento,  $u$ , es el cambio de posición de una partícula  $s$ , y queda definido por un vector  $u = p' - p$ . El campo de desplazamientos en un sistema será homogéneo si los vectores de desplazamiento de cada partícula son iguales en magnitud y dirección (Véase Figura 3-21).



**Figura 3-21. Vector de desplazamiento y campo de desplazamientos.**  
Fuente: Ingeniería Geológica [2].

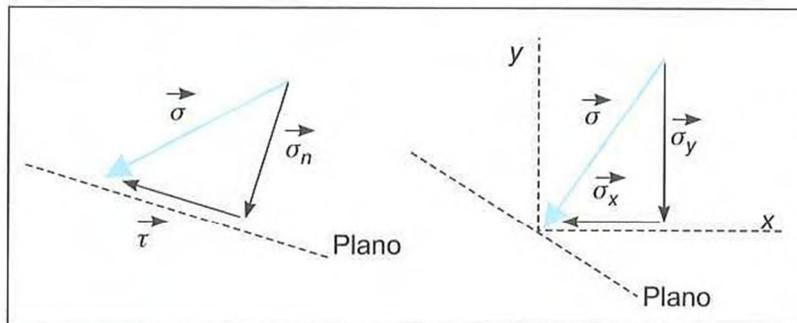
La deformación,  $\varepsilon$ , indica la variación de longitud o espacio entre dos partículas en dos estados mecánicos distintos, y se puede expresar como la relación entre la variación de longitud y la longitud inicial entre partículas:  $\varepsilon = (l_i - l_f)/l_i$ . Este parámetro es adimensional y compara situaciones en dos estados mecánicos diferentes.

El comportamiento mecánico de un sistema depende del estado de las fuerzas que actúan sobre él. Sobre un cuerpo rocoso actúan dos tipos de fuerzas, la gravitatoria o volumétrica, donde la fuerza es equivalente a la masa multiplicado por la gravedad ( $F = mg$ ) y las fuerzas superficiales, las cuales son ejercidas al cuerpo por los materiales que lo rodean, y actúan sobre las superficies de contacto entre las partes adyacentes del sistema rocoso, y se transmiten a cualquier punto del interior del cuerpo; un ejemplo de estas últimas con las fuerzas tectónicas que se ejercen sobre las rocas.

Las fuerzas superficiales se clasifican como compresivas (positivas) y traccionales (negativas), y se representan como vectores apuntando hacia dentro o hacia afuera del punto de aplicación. Al ser un vector, esta posee magnitud, dirección y sentido de aplicación.

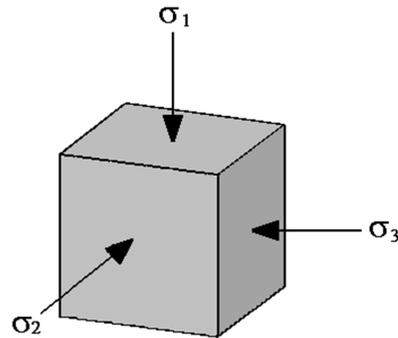
Si una fuerza es aplicada sobre una unidad de área, se produce un esfuerzo o tensión ( $\sigma = F/A$ ). Si la fuerza actúa uniformemente en una superficie, el esfuerzo o tensión indica la intensidad de las fuerzas que actúan sobre el plano. El esfuerzo no varía en función del área considerada siempre que las fuerzas se distribuyan uniformemente sobre la superficie. Si las fuerzas no se distribuyen uniformemente, el esfuerzo variará para diferentes áreas del plano.

El esfuerzo al comportarse como un vector, puede ser descompuesto en sus componentes normal y tangencial,  $\sigma_n$  y  $\tau$ , referidas en cualquier plano. De igual modo el esfuerzo puede ser descompuesto en dos componentes,  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ , paralelas a los ejes de un sistema de coordenadas ortogonales  $x$  y  $y$  (Véase Figura 3-22).



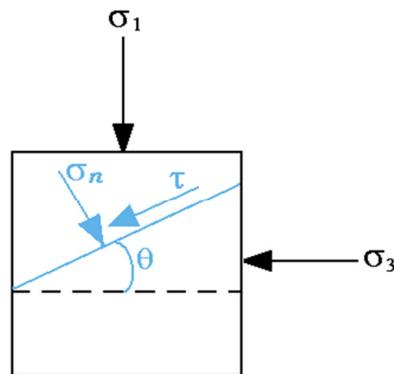
**Figura 3-22. Esfuerzos representados en un plano.**  
Fuente: Ingeniería Geológica [2].

Un esfuerzo principal se define como aquel que es normal al plano en el que se está aplicando y en donde el esfuerzo cortante es nulo; si consideramos un elemento de suelo a una profundidad  $z$ , se puede afirmar que éste se encuentra en equilibrio y que está sometido a tres tipos de esfuerzos principales externos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ; donde  $\sigma_1$  es el esfuerzo principal mayor,  $\sigma_2$  el esfuerzo principal intermedio y  $\sigma_3$  el esfuerzo principal menor; la terna de esfuerzos principales mantienen en equilibrio el elemento de suelo, a pesar de que estos son diferentes en magnitud (Véase Figura 3-23).



**Figura 3-23. Esfuerzos principales de un elemento a una profundidad  $z$ .**

En la teoría de los esfuerzos principales, a pesar de que estos son diferentes en magnitud, mantienen el elemento en equilibrio, indicando entonces que se requiere que algo suceda internamente para compensar el hecho de que estos esfuerzos no sean iguales. Al considerar en el elemento un plano perpendicular a  $\sigma_2$  se tendrá la situación que se presenta en la Figura 3-24, permitiendo analizar qué sucede internamente en el elemento.



**Figura 3-24. Plano perpendicular a la dirección del esfuerzo  $\sigma_2$ .**

Bajo estas condiciones tampoco existe deformación en el elemento de suelo, pues existe un sistema interno de esfuerzos en el elemento ( $\sigma_n$ ,  $\tau$ ) que compensan la diferencia entre los esfuerzos  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , lo cual hace que el elemento se encuentre en equilibrio; por ejemplo, sobre un plano determinado por el ángulo  $\theta$  actuarían en este caso los esfuerzos  $\sigma_{n\theta}$  y  $\tau_\theta$  correspondientes, los cuales se pueden calcular realizando un análisis convencional estático.

$$3-1 \quad \sum F_y = 0 = \sigma_1 + \sigma_n \cos \theta + \tau \sin \theta$$

$$3-2 \quad \sum F_x = 0 = \sigma_3 + \sigma_n \sin \theta + \tau \cos \theta$$

Por lo tanto:

$$3-3 \quad \sigma_{n\theta} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

$$3-4 \quad \tau_{\theta} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

Con las ecuaciones 3-3 y 3-4, es posible obtener los esfuerzos internos en cualquier plano, o a partir de esfuerzos conocidos en un plano, los esfuerzos principales.

### 3.3 TENSORES NATURALES (Ingeniería Geológica [2])

Los tensores naturales son los esfuerzos que existen en una determinada zona de la corteza terrestre, previamente a que ésta haya sido sometida a la realización de cualquier tipo de excavación.

La corteza terrestre está sometida a distintos tipos de tensiones o esfuerzos cuyos efectos se manifiestan en los movimientos de las placas tectónicas, en las deformaciones de las rocas o en la liberación brusca de energía en forma de terremotos, entre otros. El estado de esfuerzos en la corteza terrestre obedece a distintas causas, siendo las principales; esfuerzos de origen tectónico, esfuerzos gravitacionales y esfuerzos de origen no renovable.

Los esfuerzos de origen tectónico son los responsables del movimiento de las placas litosféricas y constituyen la fuente principal de los esfuerzos presentes en las rocas. Mediante diversos métodos de análisis estructural se puede llegar a estimar tanto la orientación de los esfuerzos como la magnitud de los mismos.

Los esfuerzos gravitacionales se producen como consecuencia del peso de los materiales geológicos. Si en un punto no actúa otro tipo de esfuerzos, el estado de esfuerzos es el correspondiente a las fuerzas gravitacionales que ejercen los materiales supra yacentes y confinantes, por lo tanto las tensiones o esfuerzos principales son la componente vertical y la horizontal:

$$3-5 \quad \sigma_1 = \sigma_v$$

$$3-6 \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_h$$

Entonces la tensión vertical en un punto cualquiera de la corteza terrestre tendría una magnitud equivalente a la originada por el peso de los materiales supra yacentes y por tanto:

$$3-7 \quad \sigma_v = \rho g z$$

Siendo  $\rho$  la densidad del material,  $g$  la fuerza de gravedad y  $z$  la profundidad o espesor del material.

Al medir el esfuerzo vertical en varias minas y proyectos de ingeniería civil alrededor del mundo, se llega a la Figura 3-25, según Brown y Hoek (1978).

Basándose en la teoría de la elasticidad, para que no se expanda un elemento cúbico, se debe de cumplir:

$$3-8 \quad \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0 = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

Reemplazando  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  por  $\sigma_{h1}$ ,  $\sigma_{h2}$  y  $\sigma_v$ , respectivamente y resolviendo la 3-8, se llega a:

$$3-9 \quad \sigma_{h1} = \sigma_{h2} = \frac{\nu}{(1-\nu)} \sigma_v$$

Y sabiendo que la relación  $k = \sigma_h / \sigma_v$ , reemplazamos:

$$3-10 \quad k = \frac{\nu}{1-\nu}$$

Dónde:

$\sigma_{h1}$  y  $\sigma_{h2}$  son las dos componentes principales del tensor de esfuerzos en la horizontal.

$\nu$  = es el coeficiente de Poisson del macizo rocoso

$k$  = es la relación de esfuerzos. Es decir esfuerzo horizontal sobre el esfuerzo vertical.

Las tensiones de origen no renovable pueden ser generadas por efectos térmicos sobre los materiales rocosos, por flexiones o abombamientos en la corteza o como consecuencia de cambios en el radio de curvatura de una placa tectónica, pudiendo dar lugar en teoría a grandes esfuerzos en la corteza, aunque debido a que no son renovables se disipan en proceso tipo creep o de rotura frágil dentro de periodos geológicos relativamente cortos.

Sheorey en 1994, desarrollo un modelo elástico-estático térmico, de la tierra. Este modelo considera la curvatura de la corteza y la variación de las constantes elásticas, la densidad y los coeficientes de expansión térmica a lo largo de la corteza y el manto. El suministró una ecuación simplificada, la cual puede ser utilizada para la estimación de la relación  $k$  de esfuerzos.

$$3-11 \quad k = 0.25 + 7E_h \left( 0.001 + \frac{1}{z} \right) [3]$$

Dónde:

$z$  = La profundidad por debajo de la superficie en metros.

$E_h$  = El promedio del módulo de deformación de la parte superior de la corteza terrestre, medido en la dirección horizontal.

Al realizar la figura de la ecuación [3], en la Figura 3-27, para un rango de módulos de deformaciones. Las curvas relacionadas con la profundidad por debajo de la superficie, son similares a las publicadas por Bown y Hoek (1978) (Figura 3-26), Herget (1988) y otros autores que midieron los esfuerzos in-situ. Por lo tanto la ecuación [3] provee una estimación básica del valor  $k$  de esfuerzos.

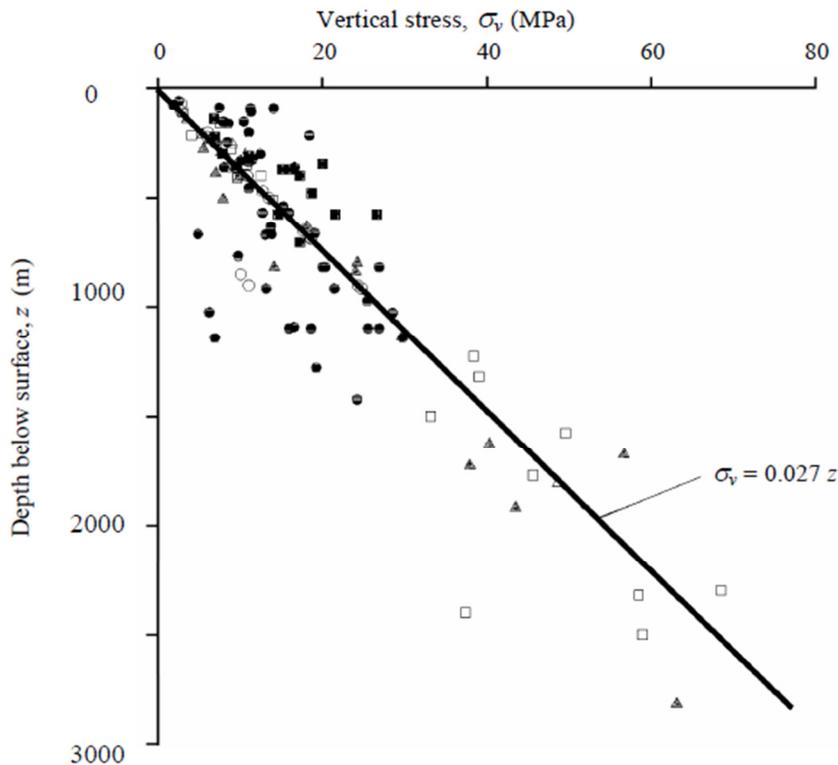
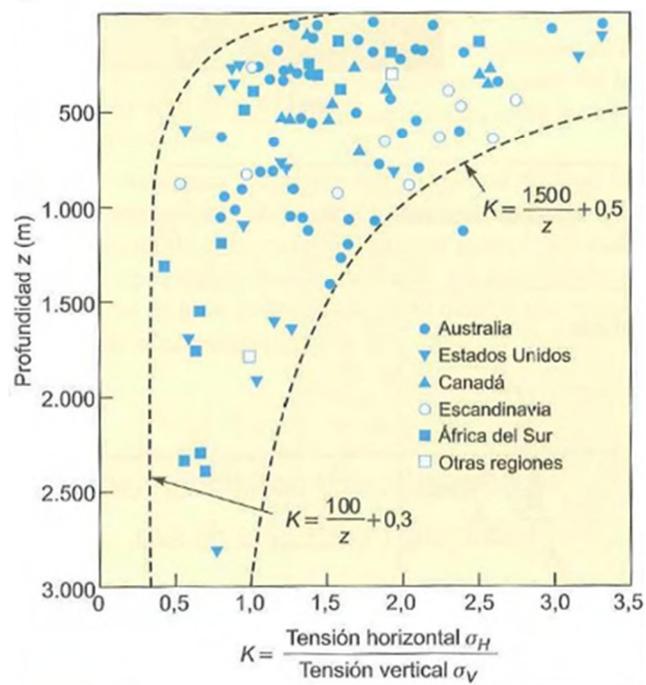
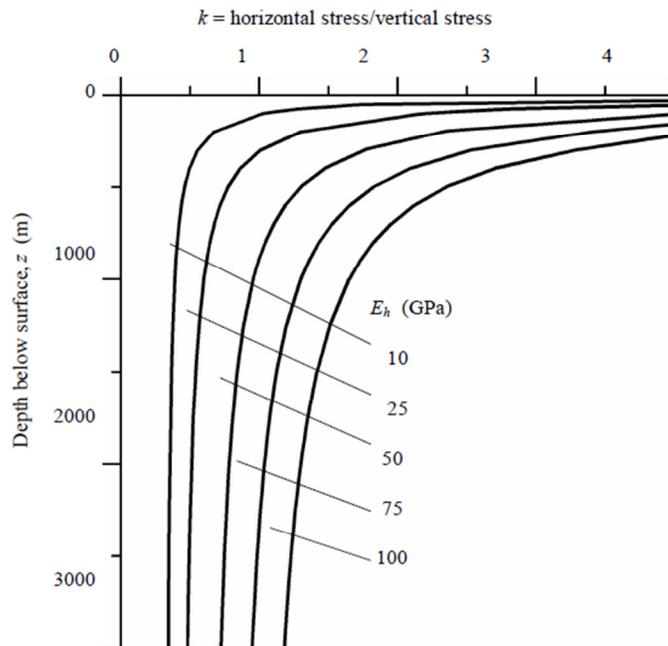


Figura 3-25. Medidas de los esfuerzos verticales en minas y proyectos de ingeniería civil alrededor del mundo.

Fuente: Support of underground excavations in hard rock [3].



**Figura 3-26. Variación del k con la profundidad (Hoek y Brown).  
Fuente: Ingeniería Geológica [2].**



**Figura 3-27. Curvas del k de esfuerzos para diferentes módulos, según la ecuación de Sheorey (1994).**

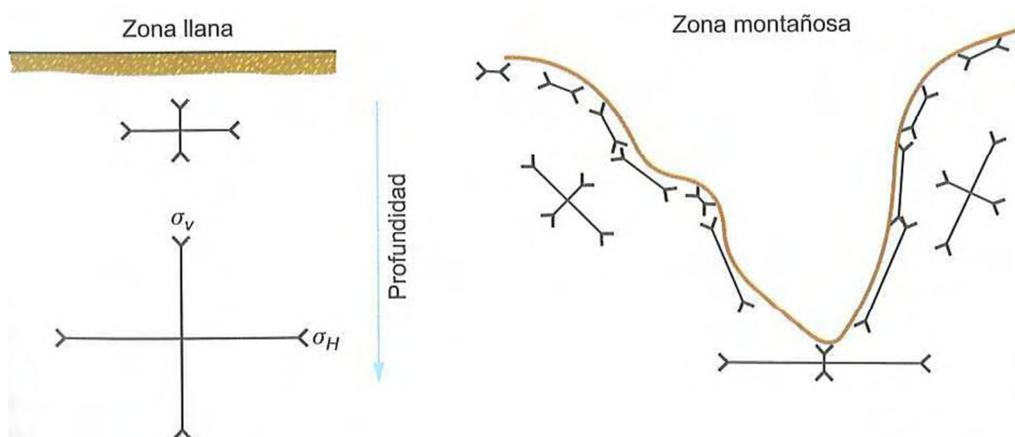
**Fuente: Support of underground excavations in hard rock [3].**

### 3.4 FACTORES GEOLÓGICOS Y MORFOLÓGICOS INFLUYENTES EN EL ESTADO DE ESFUERZOS.

Existen varios efectos que separan el campo tensional natural, del elástico, que deben ser tenidos en cuenta a la hora de realizar un modelo del comportamiento de una excavación, entre los que se destacan los que se presentan a continuación.

#### 3.4.1 Topografía

En zonas de topografía escarpada como pueden ser valles profundos, cañones, fiordos, o ríos encajados, el empuje de los materiales situados en los laterales hará que aumente de manera importante la tensión horizontal perpendicular a la estructura ( $\sigma_h > \sigma_v$ ) en el fondo de la depresión. Casos similares se han dado en cortas profundas en las que las tensiones horizontales ya eran altas antes de su excavación (Véase Figura 3-28).



**Figura 3-28. Influencia de la topografía en la distribución de las tensiones.**  
Fuente: Ingeniería Geológica [2].

Otro ejemplo de la influencia de la topografía en la distribución de las tensiones, son la narices topográficas o protuberancias que resaltan de la montaña. En estas narices se presentan relajaciones de los esfuerzos in-situ en magnitud, pero con su orientación dirigida en forma normal o perpendicular al valle o al perfil idealizado, una vez han sido eliminadas las protuberancias, como se muestra en la Figura 3-29.

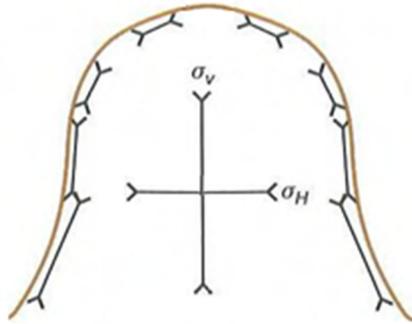


Figura 3-29. Influencia de la nariz topográfica en la distribución de las tensiones.

### 3.4.2 Erosión

Si tras un equilibrio elástico inicial se produce una fase de erosión significativa y las tensiones horizontales se mantienen, entonces éstas tenderán a ser relativamente mayores de lo que inicialmente eran (Véase Figura 3-30).

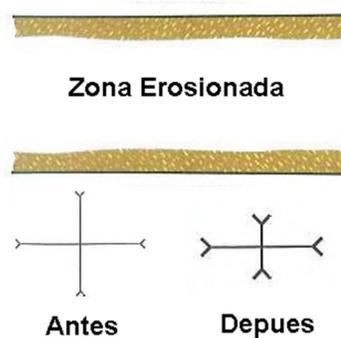
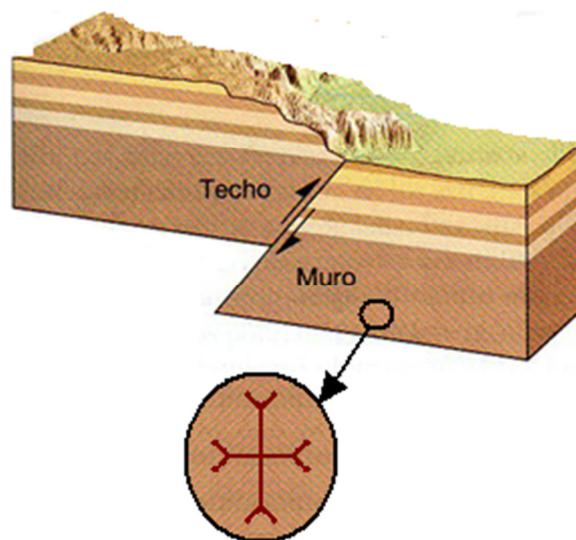


Figura 3-30. Influencia de la erosión en la distribución de las tensiones.

### 3.4.3 Efecto de las discontinuidades

En las zonas con presencia de fallas, éstas tienden a convertir toda la energía en deformación. Así, en una zona muy comprimida tectónicamente ( $\sigma_H > \sigma_v$ ) al producirse la rotura, se liberan las tensiones concentradas y se produce deformación, por lo que las tensiones horizontales y verticales variarán de manera significativa tendiendo a ser mínimas en dirección normal a la falla. Estos fenómenos suelen repetirse, originando sismos de mayor o menor escala (Véase Figura 3-31).



**Figura 3-31. Influencia de las discontinuidades en la distribución de las tensiones.**

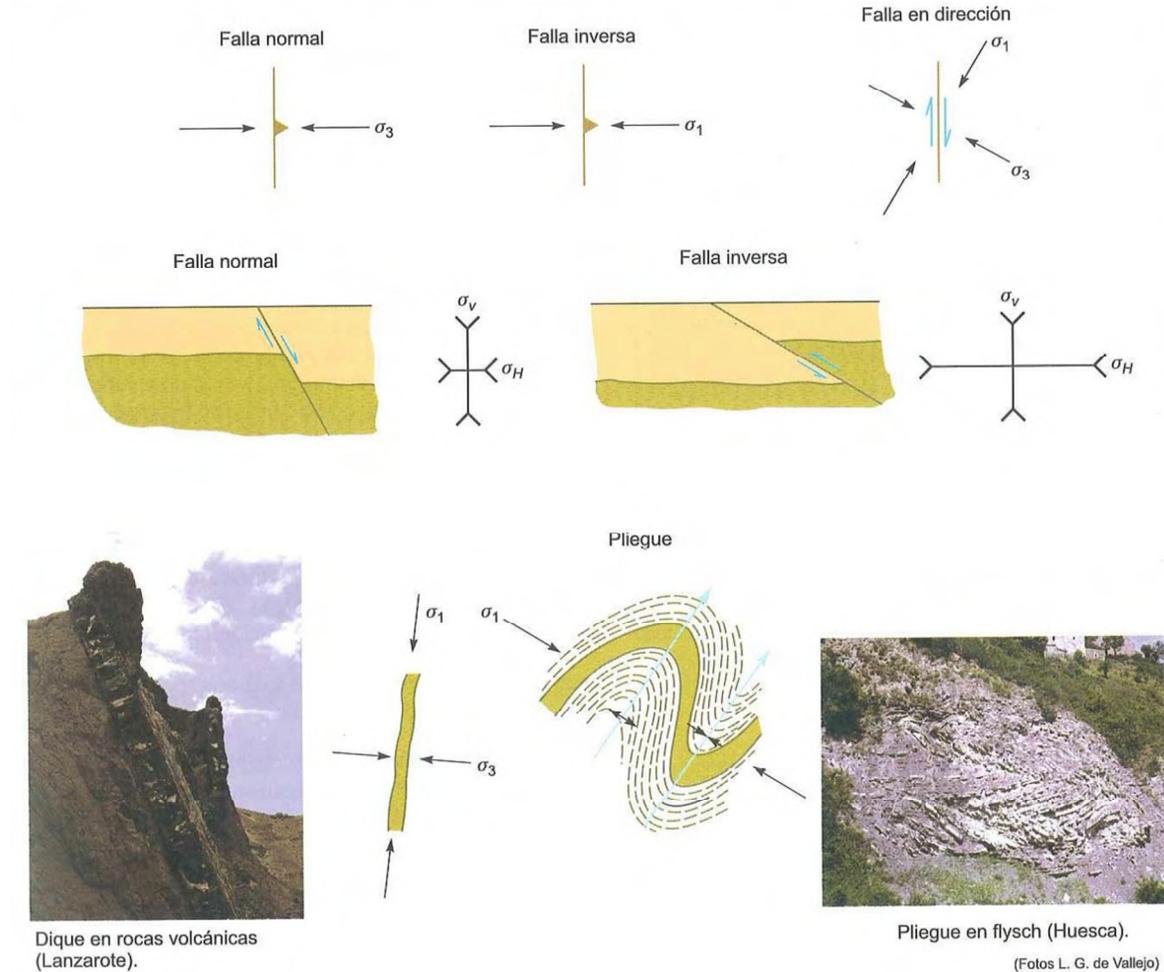
### **3.4.4 Efecto de la tectónica**

Sin duda los efectos de la tectónica son los que mayor importancia suelen tener sobre el campo de los esfuerzos, de entre todos los que se han señalado. A partir de las características tectónicas observadas regionalmente en la zona a estudiar, se puede tener una idea aproximada de cómo es el campo tensional (Véase Figura 3-32).

La aparición de fallas inversas o cabalgamientos suele ser indicio de campos tensionales con una componente horizontal perpendicular al rumbo de estas estructuras muy elevada y típicamente mayor que la tensión horizontal. Lo mismo ocurre en el caso de los plegamientos, en los que además la componente de tensión horizontal perpendicular a la que originó los pliegues suele ser menor que la vertical.

Contrariamente la presencia de fallas directas suele indicar una componente horizontal de tensión perpendicular al rumbo de las fallas más bien pequeña e inferior a la componente vertical. En el caso de fallas de desgarre la componente principal mayor de la tensión estará orientada en una dirección seudo-paralela al plano de desgarre, que variará en función de las propiedades de la roca.

En todos los caso señalados la orientación tensional indicada es la existente en el momento en el que se formaron las estructuras en cuestión, pero el campo tensional habrá probablemente variado con el paso del tiempo. No obstante, en muchos casos y particularmente en el de grandes estructuras regionales las orientaciones tensionales pueden conservarse.



**Figura 3-32. Influencia de la tectónica en la distribución de las tensiones.**  
Fuente: Ingeniería Geológica [2].

### 3.5 JUSTIFICACIÓN DE LA MEDIDA DE LOS ESFUERZOS IN SITU (Amadei [7])

El conocer el estado de esfuerzos *in situ* en la corteza terrestre es muy importante para muchos problemas que tengan que ver con rocas en la ingeniería civil, minera y petróleo, como también en la geología y en la geofísica.

En la ingeniería civil y de minería, los esfuerzos *in situ* controlan la distribución y magnitud del esfuerzo alrededor de estructuras subterráneas como túneles, minas, galerías o cavernas. La concentración de esfuerzos en las paredes de una excavación puede ser tan grande como para sobre esforzar la roca, movilizandole la fuerza de la masa de la roca localmente o a una gran escala, y creando una falla. Los esfuerzos también pueden inducir a una deformación excesiva, que se puede manifestar en el cerramiento

de la bóveda, o en un movimiento lateral o la subsidencia del piso. Por otro lado, esfuerzos de tensión en las paredes pueden abrir fracturas existentes o crear nuevas, las cuales pueden resultar en problemas de cuñas.

En general, los problemas de estabilidad relacionados a los esfuerzos, son directamente proporcionales a la profundidad, pero también se pueden encontrar a poca profundidad (0 a 200 m), esto es debido a altos esfuerzos in situ horizontales. Los altos esfuerzos también se pueden encontrar cuando se realizan excavaciones subterráneas en regiones montañosas que estén cerca a peñascos. En general, las excavaciones en rocas con esfuerzos altos son difíciles de manejar y requieren un tratamiento especial para poder minimizar el impacto de los esfuerzos. Los problemas potenciales de estabilidad asociados con el relajamiento de los esfuerzos altos, pueden incluir el levantamiento del piso (floorbucling), spalling, reducción del espacio entre las paredes (squeezing), movimientos en las paredes hacia el interior de la excavación y el estallido de la roca (rock burst). También el hecho de taladrar en roca con esfuerzos altos es más difícil. Myrvang, Hansen and Sorensen (1993) encontraron, una correlación negativa entre la frecuencia de la penetración de la rotación del taladro con el incremento del esfuerzo. Sin embargo, un aspecto positivo del esfuerzo alto es el que la roca está más comprimida, lo que hace que el agua tenga dificultad de transitar.

En la ingeniería de la construcción subterránea, los esfuerzos in-situ son un aspecto crítico en las decisiones del diseño. La distribución y magnitud de los esfuerzos in-situ, se afectan por la geometría, la forma, la dimensión, la secuencia de excavación y la orientación de las excavaciones subterráneas. Ellos también ayudan en la selección y diseño de un sistema de soporte. Desde un punto de vista práctico, en el momento del diseño de obras subterráneas donde el esfuerzo virgen es menor en comparación con la resistencia de la roca, el diseño final lo que intenta es minimizar los problemas de la concentración de esfuerzos, creando un campo de compresión de esfuerzos uniformemente distribuido en las paredes de la excavación y evitando regiones de esfuerzos a tensión. Por ejemplo, una excavación circular se comporta mejor para un campo de esfuerzo hidrostático que para cualquier otro campo de esfuerzo. Cavernas horizontales muy anchas requieren de un esfuerzo horizontal más grande que el esfuerzo vertical. Aunque cabe decir que si el esfuerzo virgen es muy alto, se recomienda que la forma de la excavación debe seleccionarse de tal forma que las zonas donde la roca este con sobre esfuerzo queden concentradas en las esquinas y que no sean extensas.

Desde hace 10 años, la mecánica de rocas se ha convertido más en una herramienta práctica para las operaciones superficiales o subterráneas de una mina o de un túnel. La aceptación de las técnicas de la mecánica de rocas en obras subterráneas se ha dado gracias al avance acelerado que han tenido los modelos numéricos, el uso de los sistemas de clasificación del macizo rocoso y a los métodos más confiables para la medición del esfuerzo de la roca. La redistribución del esfuerzo in situ debido a la actividad subterránea es la causante de deformación y falla del macizo rocoso. Una falla

puede llegar a producir lesiones y daño a equipos, lo cual afecta la productividad de la obra subterránea.

Las mediciones del esfuerzo en la roca son comúnmente realizadas para proporcionar valores que son utilizados en modelos numéricos para el diseño de obras subterráneas y minas. Estos modelos proporcionan resultados de deformaciones, fuerzas, esfuerzos, que sirven para un buen diseño de los soportes más óptimos a utilizar.

El rendimiento de la excavación de un túnel a presión, pozos y caverna de almacenamiento, sin revestimiento depende fuertemente de la magnitud y orientación del esfuerzo *in situ*. Túneles a presión y pozos, que en su mayoría no tienen revestimiento, han sido utilizadas para muchos diseños de hidroeléctricas a nivel mundial. La primera y más importante consideración en un diseño seguro de un túnel a presión o pozo sin revestimiento, es evitar fugas de agua generadas por una apertura hidráulica en el macizo rocoso o también conocido como Hydrojacking (hidrogateo) o fracturamiento hidráulico. Los problemas que se pueden generar a causa del fenómeno de fracturamiento hidráulico (Marulanda, 2006) son:

- Disminución del suministro del agua para la generación eléctrica a causa de caída de bloques dentro de la excavación subterránea.
- Presiones hidráulicas en laderas poco permeables que pueden generar inestabilidad.
- Acumulación de altas presiones hidráulicas detrás de los blindajes, generando ondulación en las láminas de acero.
- Se pueden formar manantiales por encima de los materiales erosionables, que pueden ocasionar avalanchas de lodo.
- Se pueden producir disoluciones en materiales erosionables que pueden causar inestabilidad del conducto.
- Se pueden producir filtraciones de agua hacia otras excavaciones.

El Hydraulic jacking (hidrogateo) en el macizo rocoso puede ser prevenido al posicionar los túneles conductores con flujo de agua a presión en una roca competente y bajo una cobertura que pueda proveer el confinamiento suficiente para que contrarreste la presión hidráulica. En numerosas ocasiones se ha sugerido la utilización de revestimientos de concreto reforzado o de inyecciones pre-esforzadas para soportar las presiones, pero la práctica ha demostrado que estas medidas no son efectivas para controlar la ocurrencia del fenómeno del fracturamiento hidráulico.

Un criterio para posicionar los túneles a presión y pozos es que en ningún lugar del alineamiento, la presión interna del agua no debe superar el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ )

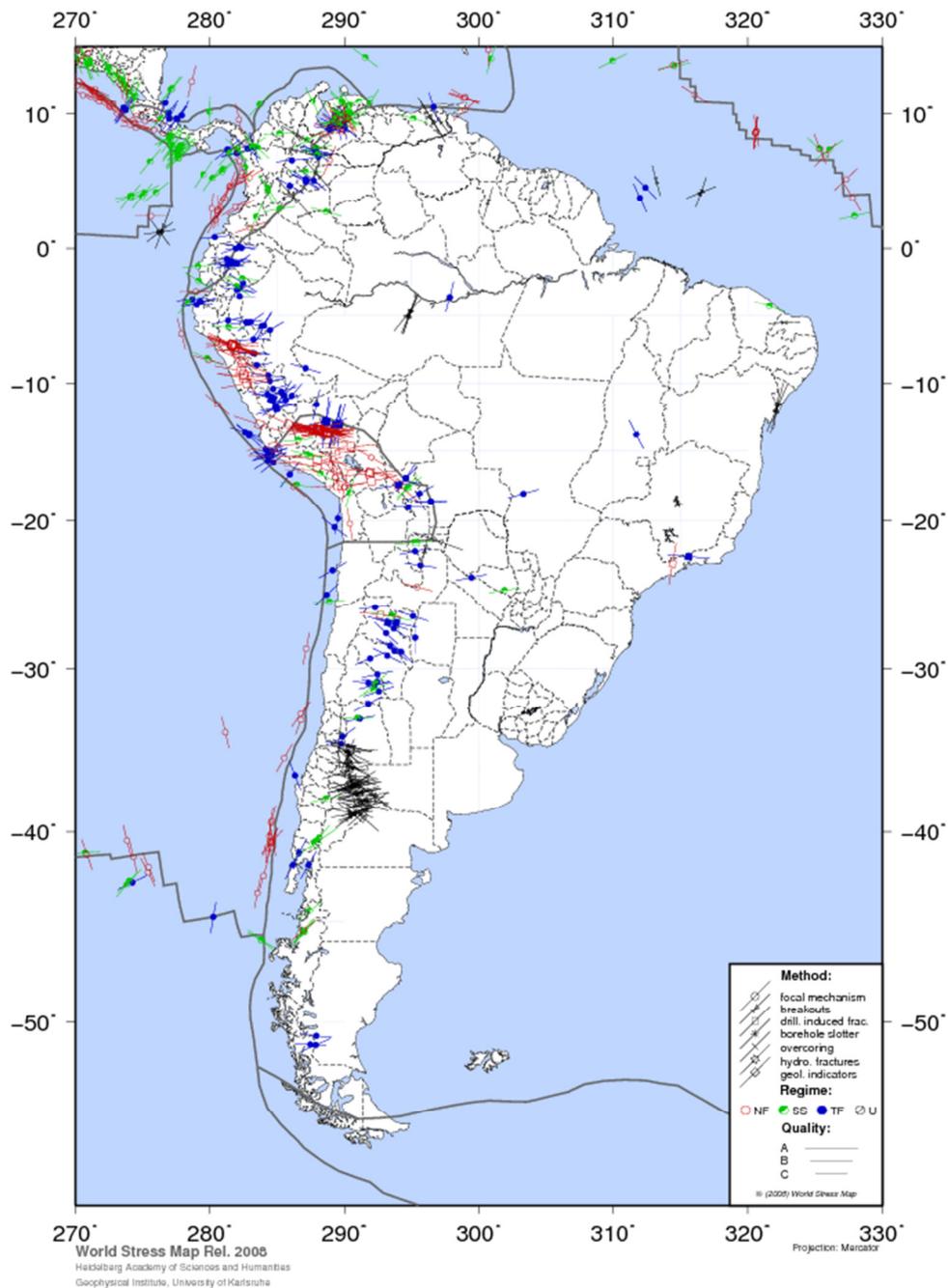
en la masa de roca a su alrededor. Los grandes esfuerzos in situ pueden ayudar a reducir longitudes del revestimiento en túneles a presión y pozos.

La efectiva utilización de los recursos del petróleo y gas, en tierra y en el mar y la tecnología para la divergencia de los pozos se ha incrementado en los últimos 20 años. En particular, en orden de determinar la dirección de un pozo y reducir desviaciones o fracturas del mismo, es necesario tener muy claro los conceptos de los esfuerzos in situ. La estabilidad de un pozo, la cual es de mayor importancia para un ingeniero de petróleos, está controlada por la concentración de los esfuerzos localizados en las paredes del pozo. El fracturamiento excesivo debido a la movilización de la fuerza de la roca puede crear muchos problemas de inestabilidades en el pozo. El conocimiento del esfuerzo in situ es también muy importante para la formación de fracturas que estimulen la producción del petróleo y gas.

En la nueva geología global y tectónica de placas, los geólogos y geofísicos están tratando de ganar conocimiento en el rol que está tomando el esfuerzo in situ, en cuanto a comprender el mecanismo del movimiento de las placas, su colisión y divergencia, la dinámica de las fallas a lo largo de los límites de las placas y regiones medias, formaciones de las montañas, la formación de las cuencas, los terremotos y otros procesos geológicos activos. Para este propósito, perforaciones ultra profundas se están llevando a cabo en varias partes del mundo. Como por ejemplo el esfuerzo in situ se ha estado midiendo en la cresta media a profundidades entre 0,8 y 9,0 km en el KTB (Proyecto Alemán de Perforación Continental Profunda) de Alemania.

Se han recolectado más de 7300 datos de diferentes puntos alrededor del mundo, en lo que se conoce como Proyecto del Mapeo Mundial del Esfuerzo (World Stress MapProyect). Este mapa ha revelado unos patrones de esfuerzo y regiones de esfuerzo en la corteza terrestre. En estos mapas se pudo evidenciar que la dirección de los movimientos de las placas grandes tiende a coincidir con la dirección del esfuerzo principal máximo horizontal. (Véase Figura 3-33).

El esfuerzo in situ es importante para los geólogos en cuanto a poder comprender varios procesos geológicos. A lo largo de los años, varias teorías de fallas, plegamientos, empujes, tectónica de placas, intrusiones, subsidencias han sido propuestas. La formación, emplazamiento y extensión de dichas estructuras depende en gran medida de los esfuerzos *in situ*.



**Figura 3-33. Mapa de los esfuerzos regionales de Suramérica recopilados por el WSM (World Stress Map).**

**Fuente: Página de la World Stress Project [8].**

Los esfuerzos in situ son usualmente determinados en conjunto con las propiedades del macizo rocoso, tales como deformación, resistencia y permeabilidad. Las técnicas de medida de los esfuerzos in situ pueden ser vistas como el suministro de muestras del campo de esfuerzos durante un cierto volumen de interés. Como muchas propiedades de

la masa rocosa, el esfuerzo in situ puede variar de un punto a otro y puede tener diferentes valores al ser medido en diferentes volúmenes. Dichas variaciones son intrínsecas y no siempre deberían ser vistas como anomalías o errores en la propia medición.

El esfuerzo in situ es raramente uniforme en un macizo rocoso. Su distribución depende en gran medida de las estructuras que componen del mismo macizo (discontinuidades, fallas, diques, su heterogeneidad, etc) y en la carga que se ha aplicado en el macizo rocoso durante su historia geológica. Por ejemplo, estratos de roca competente tienden a poseer esfuerzos mayores que un estrato de roca débil.

El esfuerzo in situ interactúa con las propiedades del macizo rocoso. Por ejemplo, el esfuerzo del macizo rocoso aumenta con respecto a su confinamiento in situ. Los esfuerzos alteran la permeabilidad del macizo rocoso, ya que el esfuerzo compresivo hace que las fracturas naturales tiendan a cerrarse mientras que los esfuerzos tensionantes hacen que las fracturas naturales se abran. Este hecho hace que el conocimiento de la relación de los esfuerzos con la compresión y el flujo de agua en las fracturas sea particularmente importante en cuanto al conocimiento del flujo hidráulico y en la contaminación de su transporte en el macizo rocoso y en poder predecir la efectividad de las inyecciones hidráulicas que son muy comunes en la explotación de hidrocarburos o en los sistemas de energía geotérmica o en la disposición de líquidos o en la conformación de una presa. Por otro lado, las estructuras de un macizo rocoso, como foliaciones o diaclasas, afectan la distribución del esfuerzo in situ. Por estos motivos el conocimiento de los esfuerzos in situ, es clave para cualquier área del conocimiento de la corteza terrestre.

### **3.6 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS**

La determinación del estado tensional de los macizos rocosos es uno de los problemas más complejos en la mecánica de rocas. Los esfuerzos o tensiones principales que actúan en un punto a una profundidad determinada están definidos por su orientación y magnitud, lo cual sólo pueden ser determinados in situ.

Este estado de esfuerzos in situ puede ser medido en sondeos, afloramientos y paredes de galerías subterráneas; también se pueden hacer estimaciones inversas a partir de las medidas de los desplazamientos y las roturas observadas en excavaciones subterráneas.

Las técnicas de medida se pueden aplicar con herramientas muy diferentes y se pueden clasificar en métodos hidráulicos, métodos de relajación de esfuerzos, métodos de compensación de tensiones y otros métodos. En la Tabla 3-1, se presentan los métodos más comunes utilizados.

**Tabla 3-1. Métodos de medida del campo de esfuerzos in situ.**

CLASIFICACIÓN	MÉTODO
MÉTODOS DEPRESURIZACIÓN	Fracturamiento hidráulico
	Células planas o gatos planos o “flat-jacks”
MÉTODOS DE SOBUPERFORACIÓN (Overcoring)	USBM
	Doorstopper
	CSIR - Célula triaxial
OTROS MÉTODOS	Análisis de estructuras tectónicas
	Análisis de los mecanismos focales de terremotos
	Observación de la orientación e los planos de rotura en las paredes de un sondeo
	Medidas de relajación de tensiones en afloramientos

**Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes [9].**

Los métodos de presurización se basan en la inyección de un fluido para producir la fracturación de la roca o en provocar una dilatación mecánica. Existen los métodos hidráulicos (fracturamiento hidráulico) y los de compensación de tensiones (“flat-jacks”).

El método hidráulico inyecta agua a presión en una zona del terreno hasta fracturar la roca o abrir las discontinuidades preexistentes, para interpretar sus resultados se deberán conocer parámetros resistentes de la roca. Tienen la ventaja de poder aplicarse en grandes profundidades y suelen dar buenos niveles de aproximación pues afectan a volúmenes del terreno bastante grandes.

El método de compensación de tensiones consiste en realizar ranuras finas en el entorno de las excavaciones en las que se colocarán instrumentos planos que permiten la medida tensional, que se presionará contra la roca hasta obtener la tensión previa a la instalación del equipo, lo cual se controlará por los desplazamientos.

Los métodos de sobre-perforación se basan en la medida de las tensiones que se liberan al perforar un sondeo, mediante el registro de las deformaciones producidas, bien en el fondo del mismo o a lo largo de sus paredes. Las tensiones se calculan aplicando la teoría elástica para convertir en esfuerzos las deformaciones medidas, conociendo el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de la roca, parámetros que deben estimarse en el laboratorio.

Los otros métodos, son estimaciones por medio de técnicas observacionales, las cuales relacionan la geología, los terremotos o los planos de rotura de las paredes de un sondeo.

El objetivo final de todos estos métodos es el de poder medir las nueve componentes del tensor de esfuerzos (Véase Figura 3-34), seis de las cuales son independientes; tres

esfuerzos normales y 3 esfuerzos tangenciales. Cada método proporciona valores de alguno o de todos los componentes del tensor de esfuerzos (Véase Figura 3-35).

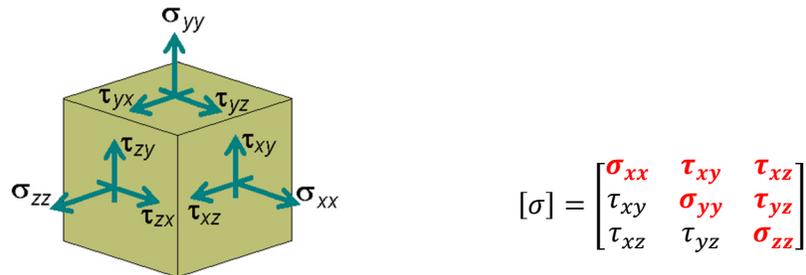


Figura 3-34. Tensor de esfuerzos con 6 componentes independientes.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ - & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ - & - & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \text{ Célula triaxial de Leeman.}$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & - \\ - & \sigma_{yy} & - \\ - & - & - \end{bmatrix} \text{ Metodo de USBM}$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix} \text{ Metodo de Flat jack}$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & - & - \\ - & \sigma_2 & - \\ - & - & \sigma_3 \end{bmatrix} \text{ Metodo de fracturamiento hidráulico}$$

Figura 3-35. Componentes del esfuerzo proporcionadas por los diferentes métodos.

### 3.6.1 Métodos de presurización

- Método de fracturamiento hidráulico

En los años 40 y 50, la ingeniería de petróleos desarrolló el método de fracturamiento hidráulico con el objetivo de crear una técnica adecuada para propagar fracturas por tracción en el interior de un macizo rocoso mediante la inyección de agua a presión. Este método se utilizaba como estimulación en campo o recuperación secundaria de crudo, por lo que su principal objetivo era el de mejorar la permeabilidad eficaz del yacimiento para aumentar su productividad. En los años 70, se utilizó por primera vez para estimar el campo tensional del terreno.

El objetivo del ensayo de fracturamiento hidráulico es el de medir el estado de tensiones in situ en el interior de un sondeo. El ensayo proporciona las magnitudes y direcciones de

las tensiones máxima y mínima en un plano perpendicular al sondeo. Esta técnica es óptima para sondeos muy profundos, pudiéndose llegar a profundidades superiores a 1.500 m.

El ensayo consiste en inyectar un fluido a presión en un tramo de un sondeo vertical de 1 m de longitud, previamente aislado por obturadores especiales, hasta conseguir la fractura de la roca. En este ensayo se mide la presión de fluido en el tiempo necesario para generar, propagar, mantener y reabrir la fractura. Estas presiones se relacionan con las tensiones principales in situ, existentes en la zona donde se realiza el sondeo.

La dirección del sondeo debe coincidir con la dirección de una de las tensiones principales, para que así las tensiones obtenidas en el ensayo, sean la dirección de las otras dos a partir de la orientación del plano de fractura inducido por la hidro-fracturación. El método es más exacto cuando se aplica en materiales no porosos con comportamiento elástico, homogéneo, continuo e isotrópico, ya que se asume la teoría de la elasticidad. En el ensayo de fracturamiento clásico se debe verificar que en el tramo donde se va a realizar el ensayo no existan fracturas. Durante la perforación se debe extraer testigos de roca para la observación de discontinuidades y sus orientaciones y para la realización de ensayos de laboratorio.

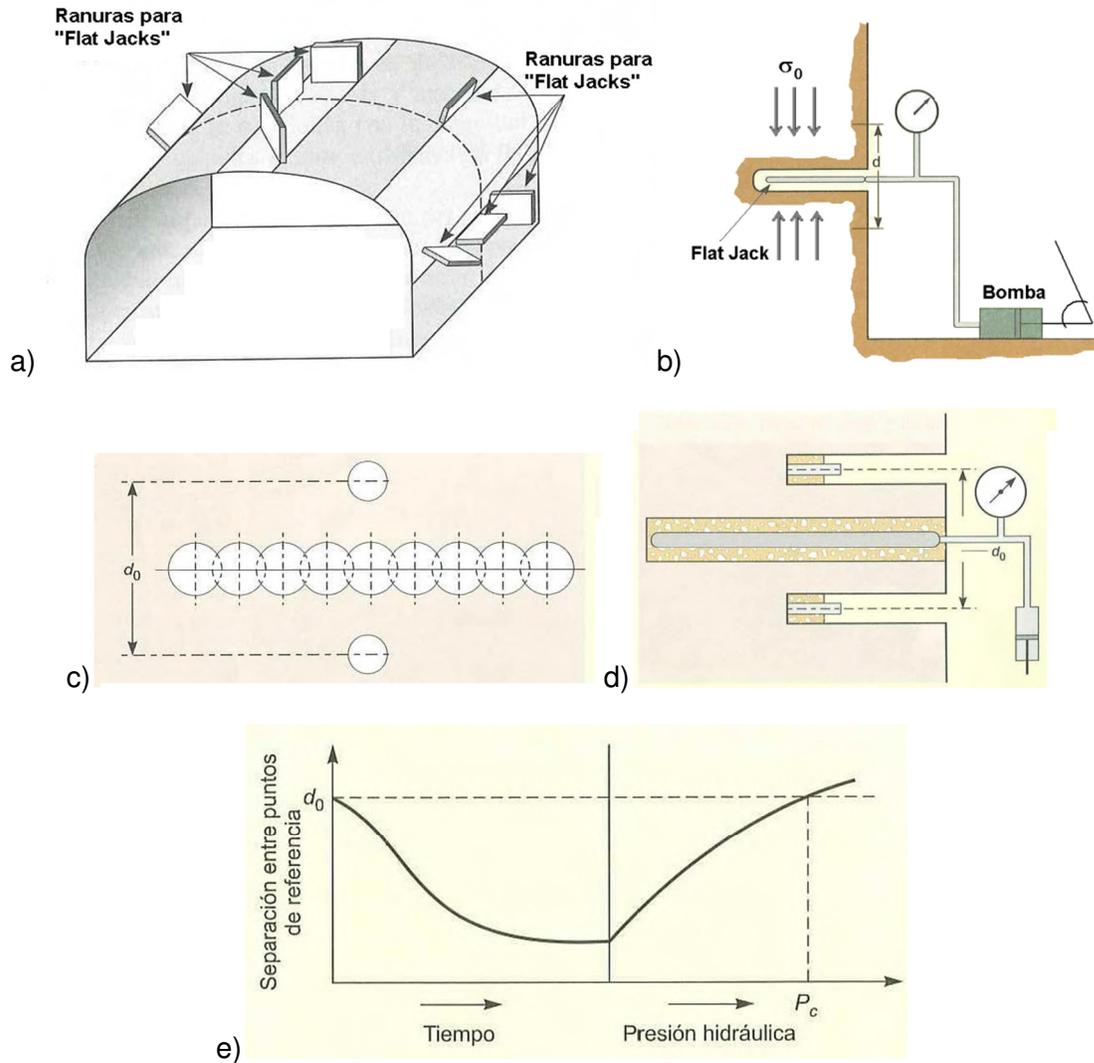
- *Método de flat jack*

En el caso de que se tenga acceso a una cara libre del macizo rocoso, por ejemplo con una galería o túnel, se puede medir la tensión a partir de un método muy simple introducido en Francia por Tincelin en los años 50. Sus resultados pueden considerarse representativos hasta una distancia de unos pocos metros hacia el interior del macizo rocoso a partir de la superficie en la que se realiza el ensayo.

El método permite obtener de una manera fácil y económica una componente del tensor de esfuerzos. La instrumentación necesaria es sencilla, asequible y robusta, lo cual es una gran ventaja en las labores de interior.

Para llevar a cabo el proceso de medida se comienza situando sobre la pared de roca uno o más pares de puntos de medida. La separación entre estos puntos, “ $d_0$ ”, suele ser de orden de centímetros. A continuación se efectúa una ranura en la roca entre los puntos de referencia, con una sierra o mediante perforación de taladros, lo que provoca un acercamiento entre los puntos al tender a cerrarse la ranura por la liberación de los esfuerzos existentes en el macizo rocoso. Se comienzan a medir las deformaciones inmediatamente después de realizar la hendidura y algún tiempo después, entre uno y tres días. Se introduce entonces un gato plano (flat Jack) en la ranura y se aplica presión hasta que las distancias entre los puntos de referencia sean iguales a las primitivas; esta presión aplicada se considera igual a la tensión inicial de la roca,  $\sigma_0$ , antes de realizar la hendidura, en la dirección perpendicular al flat Jack. Durante el ensayo se registran las

presiones aplicadas y se miden las deformaciones producidas, a partir de las cuales se obtiene el módulo de deformación elástica del macizo rocoso (Véase Figura 3-36).



**Figura 3-36. Ensayo de las células planas o Flat Jack. a) Medidas en galería o túnel. b) Esquema del ensayo. c) Perforación de taladros (Vista frontal). d) Instalación y presurización (sección). e) Registro de perforaciones.**

**Fuente: Ingeniería Geológica [2].**

La principal desventaja del método es que la zona en la que se realiza la medida habrá sufrido una variación muy significativa de su estado de esfuerzos debido a la excavación de la galería o túnel desde la que se realiza la medida. Si la galería ha sido excavada cuidadosamente, la variación del estado tensional de la misma puede ser calculada a partir de un estudio de distribución de tensiones.

En general, si se realizan tres medidas de tensión normal perpendiculares a tres planos radiales donde se instalen células alrededor de la galería, se obtendrán tres valores  $\sigma_{\theta 1}$ ,  $\sigma_{\theta 2}$  y  $\sigma_{\theta 3}$  para los esfuerzos tangenciales paralelos a la superficie de la excavación, en estos planos. Así los esfuerzos iniciales en el plano perpendicular a la galería se podrán calcular invirtiendo la relación:

$$3-12 \quad \begin{bmatrix} \sigma_{\theta 1} \\ \sigma_{\theta 2} \\ \sigma_{\theta 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xo} \\ \sigma_{yo} \\ \tau_{xyo} \end{bmatrix}$$

Donde los coeficientes  $f_{ij}$  ( $i, j = 1, 3$ ) dependen de la geometría de la excavación.

Los componentes del esfuerzo in situ son entonces determinados al solucionar el sistema de seis ecuaciones con seis incógnitas basados en seis medidas. Si se realizan más medidas, un análisis de regresión multilinear se puede hacer con los resultados.

### 3.6.2 Métodos de sobreperforación (overcoring)

- *Medida de la deformación diametral con la célula USBM y CSIR*

Las células tipo USBM permiten estimar las tensiones en dos direcciones y las CSIR en tres (Véase Figura 3-37). Los transductores incorporados a las células USBM miden las deformaciones a través de tres diámetros del sondeo. Si los ejes de referencia están alineados paralelos y perpendicularmente al sondeo, las medidas permiten conocer las tres componentes del estado de esfuerzos bidimensional en el plano perpendicular al sondeo:  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  y  $\tau_{xy}$ . Para medir las tensiones tridimensionales se deben efectuar las medidas en tres sondeos en direcciones diferentes, perforados en el interior de una galería o túnel o bien emplear el sistema CSIR, en el que se utilizan 9 ó 12 transductores.

Al ya haber realizado un sondeo hasta la profundidad donde se desean tomar las medidas, se realiza otro de menor diámetro desde el fondo del taladro, en el que se introduce la sonda o torpedo de medida de deformaciones en tres direcciones; después se re-perfora con el diámetro del sondeo inicial, liberando las tensiones en el anillo de roca resultante, sobre el que se registran las deformaciones inducidas. (Véase Figura 3-38).

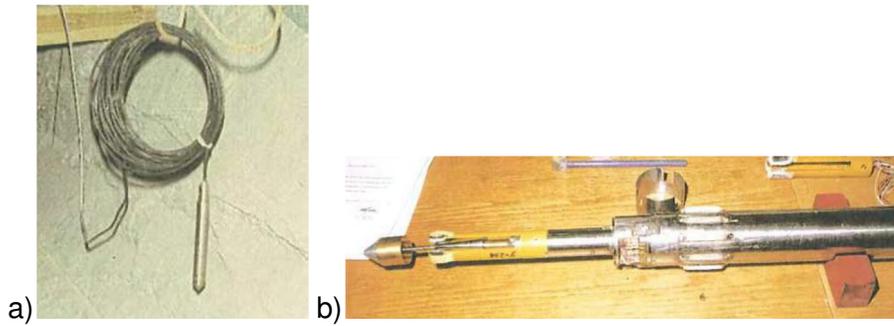


Figura 3-37. a) Sonda de medida de tensiones USBM. b) Célula triaxial CSIR.  
Fuente: Ingeniería Geológica [2].

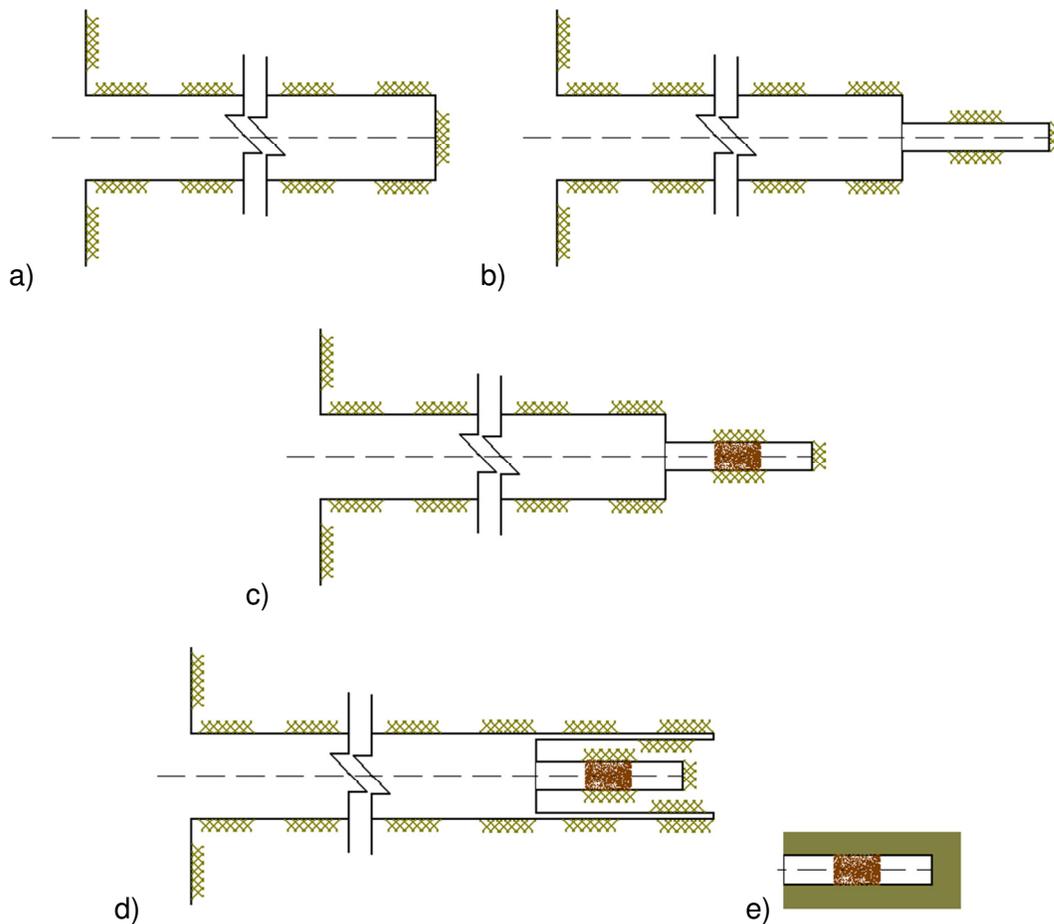
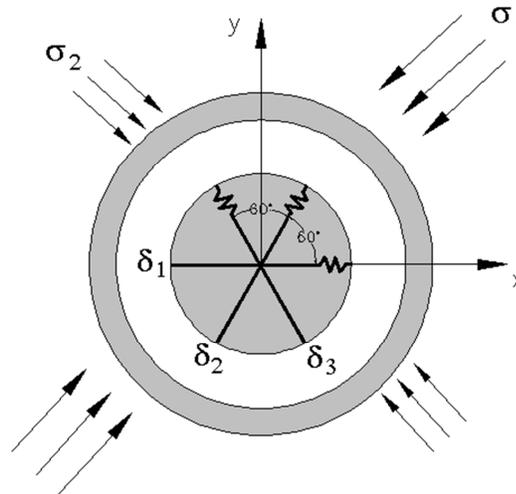


Figura 3-38. Ensayo sobreperforación, sistema USBM y CSIR. a) Perforación del sondeo. b) Perforación de menor diámetro en el fondo del sondeo. c) Instalación de la sonda de medida de deformaciones. d) Reperforación. e) Extracto del testigo y lectura de las deformaciones.

Como resultado del ensayo se obtendrán las variaciones de los diámetros del sondeo en tres direcciones que forman entre sí ángulos de  $60^\circ$  y se denominarán  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  y  $\delta_3$  respectivamente. Para su análisis se seleccionarán convenientemente unos ejes X-Y en el plano perpendicular al eje del sondeo (Véase Figura 3-39). El cálculo de la tensión in situ puede presentar distintos grados de complejidad en función de que las tensiones sean en dos o tres dimensiones y según el grado de anisotropía y linealidad del macizo.



**Figura 3-39. Esquema de sobreperforación con medidas con la célula USBM; direcciones de medida, direcciones de ejes y orientación de las tensiones principales en el plano de medida.**

- Medida con la célula extensométrica “door-stopper”

El método doorstopper proporciona la dirección y magnitud de las tensiones según un plano perpendicular al eje del sondeo. Para determinar el estado de esfuerzos completo se precisan tres sondeos perforados en diferentes direcciones dentro de una galería o túnel.

Primero se realiza una perforación de unos 60 mm de diámetro; se pega en el fondo de la perforación la cabeza del aparato de medida, que lleva unas bandas extensométricas para medir las deformaciones unitarias en tres direcciones, haciéndose una lectura inicial; a continuación se continúa la perforación con el mismo diámetro y se extrae un testigo de roca con la cabeza del aparato adherido, quedando así liberadas las tensiones del testigo, momento en el que se pueden leer las deformaciones producidas.

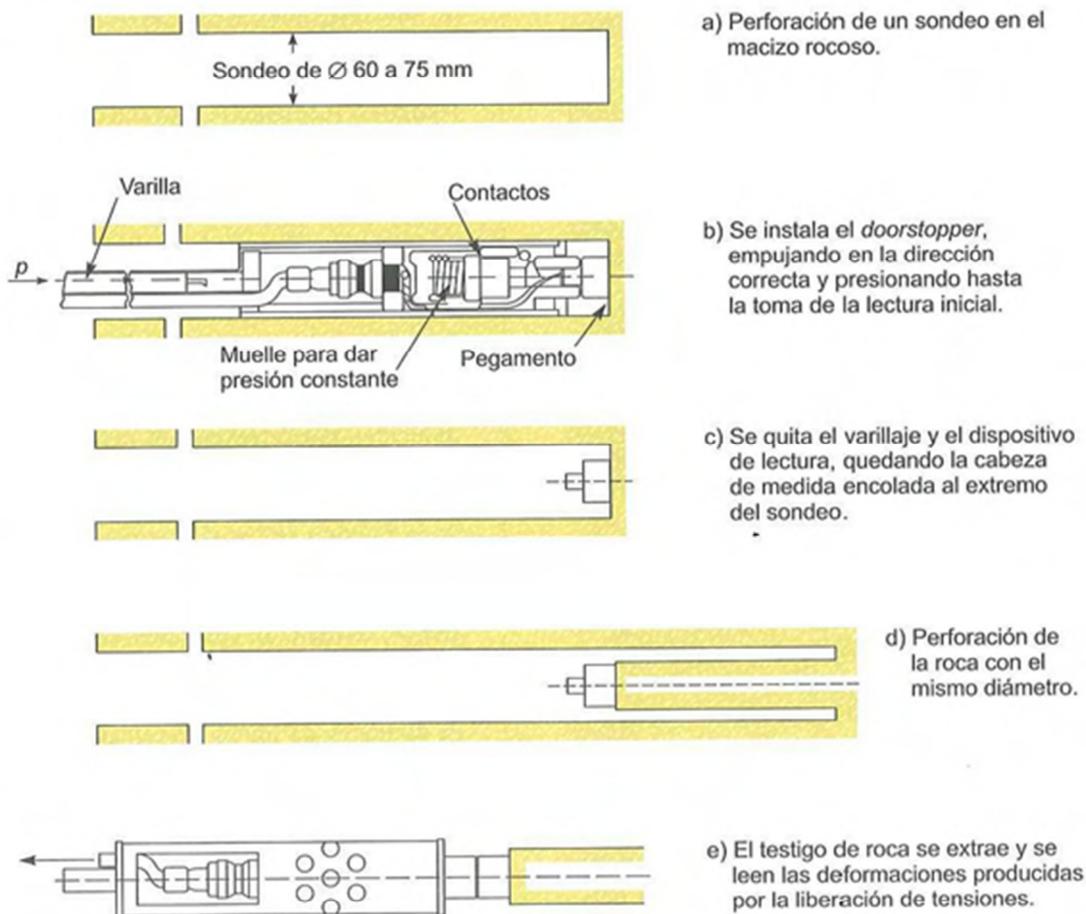


Figura 3-40. Fases de ejecución del método del *doorstopper* (Leeman, 1970)  
Fuente: Ingeniería Geológica [2].

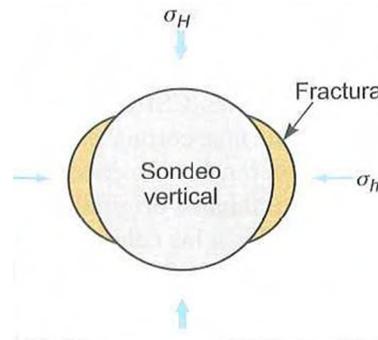
### 3.6.3 Otros métodos

El análisis de estructuras tectónicas, principalmente juntas estilo-líticas y grietas rellenas de re-cristalizaciones, permiten interpretar los campos de paleo-esfuerzos y estimar su dirección y trayectoria.

Otro de los métodos se basa en el análisis de las ondas sísmicas generadas por un terremoto. Durante la ocurrencia de sismos, es posible establecer la dirección preferencial de los esfuerzos principales por medio de correlaciones con las ondas de compresión ( $p$ ) y dilatación o tensión ( $t$ ). Mediante la identificación de su mecanismo focal se puede calcular la dirección de los esfuerzos actuantes durante sismos registrados a profundidades menores a los 80 km. El esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) está orientado preferencialmente en la zona de la representación estereográfica del mecanismo focal

donde se concentran las ondas compresionales y el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) en la zona donde se localizan los efectos de extensión o tensión obtenidos de los registros y representados con mecanismos focales, Amadei (1997).

También pueden indicar la dirección de los esfuerzos las fracturas producidas en las paredes de un sondeo, al orientarse éstas en la misma dirección que la tensión principal máxima horizontal (Véase Figura 3-41).



**Figura 3-41. Roturas inducidas en un sondeo al superar las tensiones horizontales de la resistencia de la roca, produciéndose planos de rotura perpendiculares a la dirección de la tensión horizontal mínima.**

**Fuente: Ingeniería Geológica [2].**

En afloramientos rocosos es posible determinar la orientación de los esfuerzos mediante el análisis de la liberación de tensiones que se producen al re-perforar un testigo de gran diámetro.

Los patrones de fallas regionales de falla y diaclasamiento muestran aspectos importantes para inferir la orientación de los esfuerzos principales in-situ. El plano que contiene los vectores de los esfuerzos principales mayor ( $\sigma_1$ ) y principal intermedio ( $\sigma_2$ ), se orienta por lo general en forma paralela al sistema de fallas de tipo inverso, Amadei et al (1997). Adicionalmente los esfuerzos principales mayor e intermedio, se orientan en una posición intermedia entre el rumbo de los sistemas principales de diaclasas y algunas veces algunos de estos dos esfuerzos principales, en forma paralela alguna de las fallas y/o a los sistemas de diaclasas, Gutiérrez (1993).

## 3.7 TÉCNICA DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

### 3.7.1 Introducción

La técnica del fracturamiento hidráulico consiste en medir el estado de esfuerzos in situ del macizo rocoso, al aislar una sección de un sondeo y aplicando presión hidráulica en

sus paredes. La presión aplicada es incrementada hasta que las fracturas preexistentes se abran o que se produzcan nuevas fracturas. Este ensayo proporciona las magnitudes y direcciones de las tensiones máxima y mínima en un plano perpendicular al sondeo.

El fracturamiento hidráulico ha sido utilizado comercialmente en el área petrolera como una técnica de estimulación desde los comienzos de los años 50. Estos trabajos de fracturamiento fueron diseñados para estimular la producción de reservas de petróleo con baja permeabilidad. Esto involucra el bombeo de grandes cantidades de fluido y sólidos (propantes), así creando grandes fracturas llenas de propantes. Una fractura hidráulica masiva, puede necesitar de más de mil metros cúbicos de fluido y un millón de kilogramos de propante. Entonces la fractura crea un canal de flujo de alta permeabilidad hacia el pozo que tenga más área de drenaje y hacia la formación con permeabilidad más baja. Si la fractura no es llenada con material sólido, esta se cierra cuando la presión del fluido baja.

Los métodos de ensayo de fracturamiento hidráulico pueden dividirse en dos subgrupos: el método del fracturamiento hidráulico (HF) y el método del ensayo hidráulico en fracturas preexistentes (HTPF o hidrogateo). Estos métodos han encontrado aplicaciones en la caracterización e investigación de sitios de obra usando sondeos realizados desde la superficie o desde excavaciones subterráneas. Estos métodos tienen la ventaja que para su realización no requieren de un conocimiento especializado de la deformabilidad de la roca y se pueden realizar sin mucha dificultad por debajo del nivel de agua. En general los métodos hidráulicos son los más adecuados para profundidades mayores a 50 m.

En el método de fracturamiento hidráulico se asume que la dirección del sondeo está en la dirección del esfuerzo principal. Usualmente, al asumir esta afirmación es porque para sondeos perforados desde la superficie, el esfuerzo vertical es calculado a partir del peso de la sobrecarga. El método hidráulico en fracturas preexistentes (HTPF), es el único método hidráulico y el único método de determinación del esfuerzo *in situ* a grandes profundidades, que el sondeo no necesita asumirse vertical y ni orientado perpendicularmente a los componentes del esfuerzos principal *in situ*.

### 3.7.2 Historia

La fracturación hidráulica se desarrolló en el ámbito de la ingeniería del petróleo por Clark en el año 1949, como una técnica adecuada para propagar fracturas por tracción en el interior de un macizo rocoso mediante la inyección de agua a presión.

El “hidrofrac”, como lo llamaban en ese entonces, consistía en dos simples pasos:

1. La inyección de un fluido viscoso con material granular, como arena o una gente de apuntalamiento, con alta presión para fracturar el macizo.

2. Al fracturar el macizo, el líquido viscoso cambiaba de una viscosidad alta a baja para que pudiera ser desplazada rápidamente del macizo.

La interpretación más popular que tenían en los años 40, acerca de la interpretación del fracturamiento hidráulico, era que la presión había separado el macizo a lo largo de un plano de estratificación, levantando la sobrecarga, a pesar del hecho de que la presión de fracturamiento es significativamente menor que el peso total de la sobrecarga. Unos años después, Scott, Barden y Howard (1953) realizaron ensayos de laboratorio con un núcleo cilíndricos huecos de roca y observaron que, con fluidos penetrantes, las fracturas ocurrían paralelamente al lecho de la roca mientras que con fluidos no penetrantes, las fracturas tendían a ser paralelas al eje del núcleo.

Una revisión de las fracturas de las rocas por medio de la presión aplicada en sondeos, llevó a Hubbert y Willis (1957) a la conclusión que, sin importar si el fluido de fracturamiento era del tipo de penetración o no, las fracturas producidas deben ser aproximadamente perpendiculares al eje del último esfuerzo aplicado. Ellos presentaron duros argumentos para demostrar que la condición en general del esfuerzo por debajo de la superficie, no es hidrostática, sino que consistía de tres esfuerzos principales diferentes entre sí en magnitud y perpendiculares en dirección. Después de una clara y exhaustiva presentación acerca de la distorsión que causa un sondeo y el efecto que la presión aplicada a un sondeo, Hubbert y Willis (1957) discutieron acerca de la presión de ruptura (o presión rotura) necesaria para iniciar una fractura y en particular las propiedades de las rocas al ser fracturadas. Ellos escribieron “en cualquier sección de un sondeo a pocas decenas de metros de longitud, es probable que muchas de estas articulaciones pueden ser interceptadas. Sin embargo, esa fuerza de tensión a la que la mayoría de las rocas que son sometidas a una presión hidráulica de fracturamiento en sondeos tiende a cero, y la presión requerida para producir una separación en las fracturas de las rocas, es la necesaria para reducir a cero el esfuerzo de compresión alrededor de algún plano en las paredes del sondeo.” (Hubbert y Willis, 1975).

Muchos autores en la literatura del fracturamiento hidráulico mencionan a los autores Hubbert y Willis (1957) en sus introducciones a la teoría del fracturamiento hidráulico en sondeos. Algunas veces el desarrollo de la ecuación para el fracturamiento hidráulico se les atribuye a ellos. Esto no es correcto ya que Hubbert y Willis (1957) nunca introdujeron el término de la fuerza de tensión en sus ecuaciones. Y además, ellos se limitaron solo a la discusión del estado general de los esfuerzos subterráneos, donde los tres esfuerzos principales son desiguales.

Una vez una fractura ha sido iniciada en la pared de un sondeo, el fluido penetra en la abertura de la roca y la presión aplicada es transmitida a las paredes de la fractura. Hubbert y Willis (1957) estuvieron en el camino correcto, al afirmar que la mínima presión de inyección depende solo de la menor magnitud del esfuerzo principal regional y no está afectada por la geometría del sondeo o la calidad del fluido de penetración. Por lo tanto la

mínima presión de inyección requerida para mantener y extender la fractura, es ligeramente mayor al esfuerzo regional normal al plano de la fractura.

Basados en la observación de que la mayoría de operaciones de fracturamiento hidráulico en el área petrolera se realizan en la Costa de Golfo, en el área media continental y en el área Oeste de Texas y Nuevo México en los Estados Unidos, requieren presiones de inyección menores que la presión de confinamiento, Hubbert y Willis (1957) concluyeron que la mayoría de estas fracturas eran verticales y eran controladas por los esfuerzos preexistentes en las rocas que el fluido era inyectado.

Scheidegger (1962) fue el primer científico en proponer un método para determinar los tres esfuerzos principales en la corteza superior de la Tierra, de manera directa al analizar las tablas de presión al fondo del sondeo obtenidas por el proceso de hidrafracturamiento (término antiguo como se le llamaba al fracturamiento hidráulico) en pozos petroleros. Él investigó la conexión entre el fracturamiento en pozos y el esfuerzo regional prevalente para líquidos penetrantes y no penetrantes. Él también introdujo el esfuerzo finito de una roca a las ecuaciones del fracturamiento hidráulico. Además, Scheidegger (1962) se dio cuenta que la presión al fondo del sondeo durante un fracturamiento usualmente se relaciona a un valor en el cual es menor que la presión de fractura. Igual que Hubbert y Willis (1957), él asumió que esta presión es solo capaz de mantener la fractura abierta y por lo tanto debe ser igual al menor esfuerzo principal que actúa en el plano perpendicular de la fractura inducida.

Kehle (1964) aportó el siguiente paso significativo en el desarrollo del fracturamiento hidráulico, al analizar la distribución alrededor de una sección sellada de un pozo y los esfuerzos cortantes causados por los obturadores. El alcance del modelo de Kehle fue la simplificación de las bandas de esfuerzo cortante producidas por los obturadores de caucho. Después, Haimson (1968) señaló que el caucho es incompresible, de tal forma que la compresión axial resulta siendo una expansión lateral la cual aplica una carga normal a las paredes de la perforación y entonces reduce la concentración de esfuerzos en las esquinas que se forman entre los empaques de caucho y la perforación abierta. Esto eliminaría la posibilidad de que la fractura se iniciara en estas esquinas. Luego, Stephansson (1983) presentó los resultados de ensayos de laboratorio de los empaques instalados en tubos de acero, donde él demostraba que existía muy bajo riesgo de que la fractura se iniciara en el extremo de un empaque.

Hubbert y Willis (1957), Scheidegger (1962), Kehle (1964) y otros autores discutieron las implicaciones del registro de la presión de la bomba en pozos sin tener en cuenta los esfuerzos tectónicos regionales ni la orientación de las fracturas, pero Fairhurst (1964) fue el primero en recomendar el fracturamiento hidráulico para el propósito primordial de medir los esfuerzos. Él enumeró varias características atractivas del fracturamiento hidráulico que no poseen otras técnicas de medición de esfuerzos disponibles de la época, como el "flat Jack" y el "overcoring". Fairhurst (1964) también adoptó la teoría desarrollada por Kehle (1964) acerca del estudio del esfuerzo desarrollado alrededor de

la pared del intervalo presurizado entre dos empaques y desarrolló una simple teoría para determinar la distribución del esfuerzo en una perforación de una roca ortotrópica sometida a un esfuerzo. Él también destacó la posibilidad de determinar la orientación de una fractura, usando un revestimiento inflable extruido ligeramente en la fractura, de forma similar a la técnica demostrada por Fraser y Pettitt (1962). La técnica de la impresión con el empaque se sigue utilizando extensivamente para determinar la orientación de una fractura hidráulica.

El proceso del fracturamiento hidráulico como método para determinar el esfuerzo in situ en una formación elástica frágil a grandes profundidades, fue analizado teórica y experimentalmente en la tesis doctoral realizada por Haimson (1968). Este trabajo representa el hito en la historia del fracturamiento hidráulico ya que Haimson (1968) fue el primero en enumerar la importancia de investigar si el fluido usado para inducir y extender las fracturas, penetra y fluye entre los estratos de la roca. Haimson (1968) demostró que un caudal bombeado aumenta la presión del fluido en los poros en formaciones porosas y crea esfuerzos y desplazamientos adicionales. Esto a su vez reduce la presión crítica requerida para iniciar la fractura y reduce el ancho de la fractura recién formada.

En un documento conjunto, Haimson y Fairhurst (1967) propusieron un criterio de iniciación de las fracturas verticales, teniendo en cuenta la contribución de los siguientes tres campos alrededor del pozo: (1) esfuerzos no regionales en la corteza terrestre, (2) la diferencia entre el caudal de presión en la perforación y la formación del caudal de presión, y (3) el flujo del caudal entre los poros de la roca de la perforación dentro de la formación a causa de la diferencia de presión.

A pesar del extensivo trabajo teórico realizado acerca del fracturamiento hidráulico a mediados de los años 60, la cantidad de trabajo experimental había sido hasta ahora muy limitada. En la tesis de Haimson (1968), se realizaron 400 ensayos triaxiales con carga externa constante, en muestras de cilindros y cubos perforados de cinco rocas porosas y no porosas donde se les inyectó agua a presión en la perforación. En todas las muestras ensayadas, las fracturas inducidas hidráulicamente fueron siempre en tracción y no en corte. Después, Haimson y Fairhurst (1970) hicieron una declaración que el fracturamiento hidráulico eventualmente dejaría de ser un método potencial y se convertiría en una herramienta práctica en la determinación de los esfuerzos.

Las primeras dos oportunidades para probar el método del fracturamiento hidráulico en el campo, fue en una mina subterránea y una mina de granito, ambas en Minnesota, realizadas por Von Schonfeldt y Fairhurst (1970). Los ensayos fueron realizados en perforaciones abiertas de 57.1 mm (2.25 pulgadas) de diámetro, con un equipo especialmente diseñado. Las fracturas se extendieron en la dirección perpendicular al menor esfuerzo de compresión reportado. La oportunidad de ensayar el método a profundidades mayores llegó con el experimento en el pozo petrolero de Rangely, en Colorado (Haimson, 1973; Raleigh, Healy y Bredehoeft, 1976). Se concentró mucha

actividad sísmica intensa dentro y fuera del pozo de Rangely a causa de la cercanía con la falla de deslizamiento que había sido reportada y se llevó a cabo un programa de investigación para determinar si existía una correlación entre el detonante de los sismos y la presión de poros de la formación. El método del fracturamiento hidráulico (a una profundidad de 1900 m) demostró que el esfuerzo principal vertical era de mediana magnitud y que los esfuerzos restantes eran acordes con la falla de deslizamiento. La medición del esfuerzo fue considerada como muy exitosa y eso conllevó a una serie de investigaciones para profundizar el tema. En un abrir y cerrar de ojos, el fracturamiento hidráulico se comenzó a utilizar en la medición de los esfuerzos desde adentro de los túneles y cavernas, como también pozos y perforaciones realizadas en la superficie, para resolver problemas ingenieriles. Al mismo tiempo, el fracturamiento hidráulico incremento el entendimiento del estado de esfuerzos en la corteza de la Tierra.

Actualmente el fracturamiento hidráulico tiene muchas aplicaciones, como las siguientes [13]:

- “Frac and pack”, operaciones en yacimientos con areniscas débiles. Estas son fracturas relativamente cortas y anchas, llenas de material de inyección o “propante”, diseñadas para penetrar en las zonas cercanas al pozo que estén dañadas y así reducir la caída de presión cercana del pozo de sondeo y por lo tanto también reducir el potencial de rugosidad del pozo.
- Para los trabajos de fracturación hidráulica masivos, lo cual se utiliza normalmente antes se realiza un ensayo de fractura con un pequeño volumen de inyección (Mini-Frac), para determinar el esfuerzo más pequeño en la formación y por lo tanto la presión de tratamiento requerida y otros parámetros de diseño para el trabajo de fracturación.
- En las operaciones de perforación, se realizan pruebas de fugas para determinar el gradiente de fractura de la formación por debajo de la cobertura y por lo tanto se encuentra la presión máxima permisible para evitar así la pérdida de circulación. Si un volumen de agua suficientemente grande se bombea, esto creará una pequeña fractura alrededor del pozo.
- La fracturación hidráulica se puede utilizar para como expulsión de los residuos por debajo de la superficie. En la industria petrolera, la reinyección de detritos de perforación contaminados es un ejemplo. En esta aplicación es importante tener una formación permeable o en algún lugar por encima del punto que puede actuar como un receptor y un reductor de presión de inyección. Si esta condición no está presente, la presión seguirá siendo alta debido a la fuga de despegue muy lenta y la fractura creada durante la inyección puede llegar a penetrar todo el camino hasta la superficie.

- El único método confiable para la determinación del esfuerzo horizontal más pequeña ( $\sigma_h$ ), es fracturar la formación geológica y registrar la presión a la que la fractura se cierra. Esto requiere que la fractura haya penetrado lo suficiente en la formación para sentir sólo la resistencia del esfuerzo horizontal in situ.

### 3.7.3 Mecánica de la fractura hidráulica

A continuación se describen los conceptos teóricos sobre el desarrollo de la grieta y los esfuerzos en el ensayo de fracturamiento hidráulico, según la referencia [13].

- Condiciones para la falla a tensión

Desde un punto de vista macroscópico, la fractura está relacionada con la falla a tensión. Generalmente cuando se considera una muestra sólida para un ensayo, la falla a tensión ocurre cuando el esfuerzo a tracción excede el esfuerzo a tensión  $T_0$ . Siguiendo la postura tradicional, donde el esfuerzo es positivo y la compresión es negativo, se tiene que:

$$3-13 \quad \sigma < -T_0$$

Para materiales porosos, el esfuerzo total debería ser reemplazado por el esfuerzo efectivo, y la condición deberá quedar:

$$3-14 \quad \sigma - \mu < -T_0$$

Donde  $\mu$  es la presión de poros.

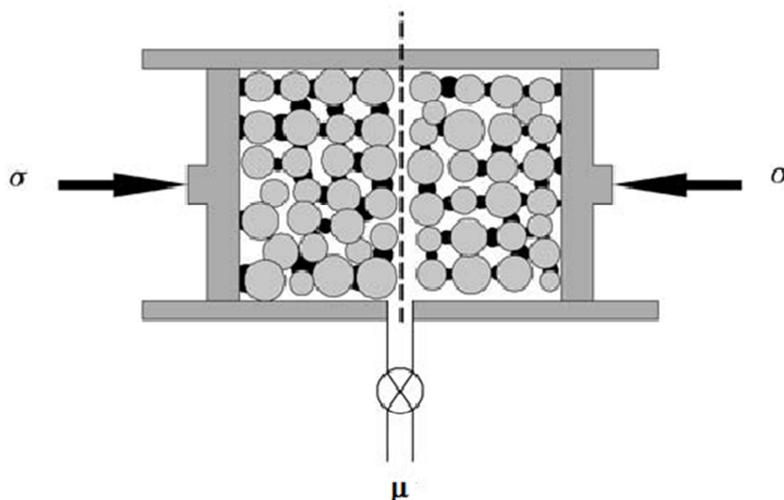
Asumiendo que se tiene un tapón de material poroso y permeable en una celda triaxial, como se muestra en la figura Figura 3-42. Al tapón se le aplica un esfuerzo externo  $\sigma$  y con esto, la presión de poros  $\mu$  puede estar siendo alterada.

Considerando que los granos están cementados unos a otros y que el tapón está pegado al pistón, por la línea punteada estos vínculos se han roto, formando así una fractura cerrada. La fuerza que hace que la fractura esté cerrada, va a estar dada por la diferencia entre la presión aplicada  $\sigma$  y la presión de poros  $\mu$  en la fractura. La condición para que la fractura se abra está dada por la siguiente expresión:

$$3-15 \quad \sigma - \mu < 0$$

Esta condición se puede dar al incrementar la presión interna de poros  $\mu$  o al reducir el esfuerzo externo  $\sigma$ . En un tapón corto como el que se indica en la Figura 3-42, la presión interna  $\mu$  serán constante en todo el cuerpo. Pero si consideramos un tapón largo con mucha menor permeabilidad y realizando el mismo razonamiento anterior, se deja claro

que la presión de poros  $\mu$  en la ecuación 3-15, es la presión en la fractura, no la presión media en el tapón.

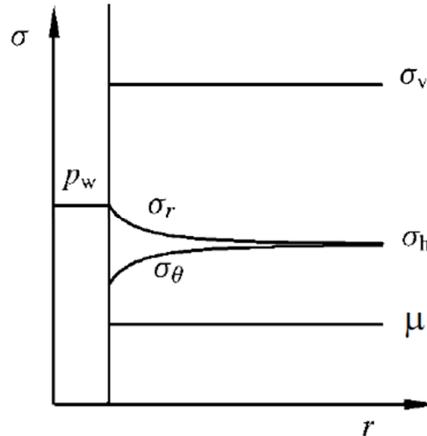


**Figura 3-42. Fracturamiento hidráulico en una roca porosa y permeable.**  
Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics [13].

En conclusión se puede decir que la ecuación 3-14, representa el criterio general del esfuerzo a tensión para poder dividir el material, mientras que la ecuación 3-15, representa el criterio para reabrir las fracturas existentes.

- Iniciación de la fractura y formación de la ruptura

Para ilustrar los conceptos de iniciación de la fractura y formación de la ruptura, se considera la siguiente situación; un sondeo vertical que penetra el campo de esfuerzos con un esfuerzo isotrópico horizontal ( $\sigma_v > \sigma_H = \sigma_h$ ). La roca se asume isotrópica y homogénea, obedeciendo la ley de comportamiento elástico lineal de Hook. Desde ahora se asume una pared impermeable en el sondeo, implicando que la presión de poros en la formación permanece constante y no es afectada por la presión del sondeo. A medida que la presión del sondeo  $p_w$  se incrementa, el esfuerzo tangencial  $\sigma_\theta$ , se reducirá respectivamente, como se muestra en la Figura 3-43.



**Figura 3-43. Distribución de esfuerzos alrededor de un sondeo abierto y vertical, en una formación impermeable en un sondeo con alta presión.**

**Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics [13].**

La condición para poder iniciar una fractura hidráulica está dada por:

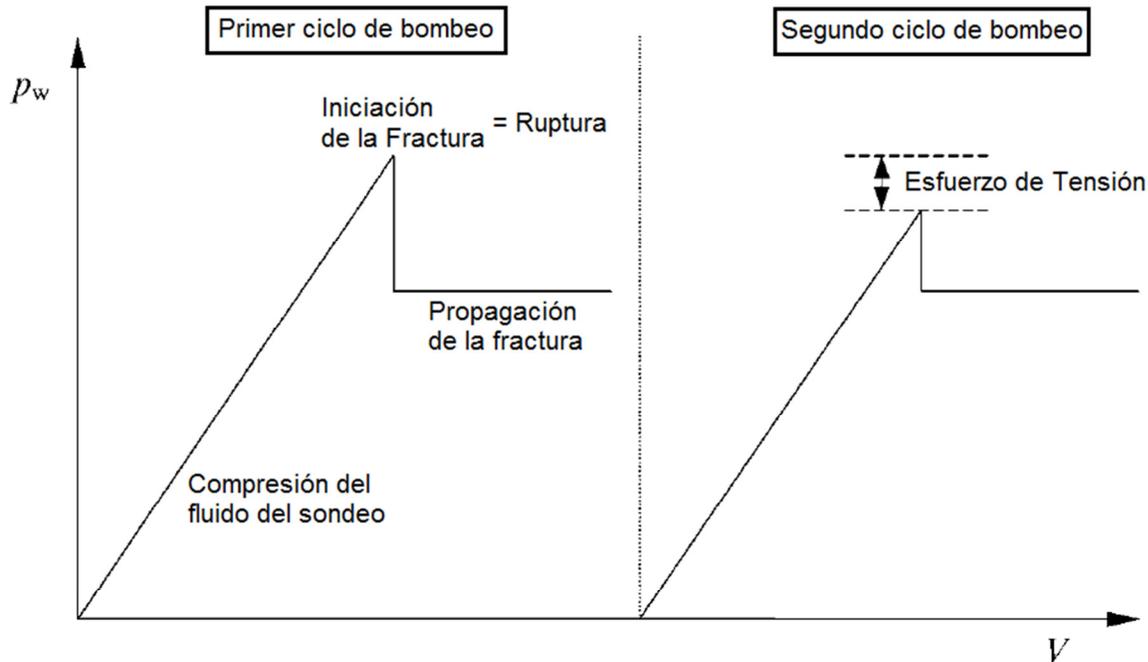
$$3-16 \quad \sigma_{\theta} - \mu = -T_0$$

O

$$3-17 \quad p_{w,max}^{frac} = 2\sigma_h - \mu + T_0$$

La respuesta de la presión en el sondeo va a estar dada por la Figura 3-44.

La primera parte lineal de la Figura 3-44, representa la deformación elástica del sistema, adentro y alrededor del sondeo, principalmente para la compresión del fluido. El pico, representa la condición de iniciación de la fractura, o mejor explicado, la creación de una fractura vertical en la pared del sondeo. En este punto la presión del sondeo baja instantáneamente, esto implica una situación de inestabilidad en el crecimiento de la fractura, por consiguiente el volumen de la fractura está creciendo más rápidamente que el volumen de inyección. Si se continúa inyectando, el crecimiento de la fractura terminará estabilizándose, lo que representa la presión constante en el sondeo.



**Figura 3-44. Presión ideal en el sondeo en respuesta a la fractura hidráulica en un sondeo vertical. Se incluyen dos ciclos.**

**Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics [13].**

La segunda curva en la Figura 3-44, muestra lo que puede ocurrir si se realiza un segundo ciclo. En este ciclo, la única resistencia a la iniciación de la fractura y la formación de la ruptura, puede ser la concentración de esfuerzos alrededor del sondeo. El esfuerzo a tensión es cero, siendo que la fractura ya existe. La diferencia entre el pico de un ciclo y otro, debe ser idealmente, la medición del esfuerzo efectivo de la formación. Pero en la práctica, la presencia de la fractura puede hacer que la concentración del esfuerzo efectiva sea menor en el segundo ciclo que en el primero, dando a entender que la diferencia no está sólo relacionada al esfuerzo de tensión.

Si el sondeo se asume como completamente permeable y la tasa de presurización es baja como para mantener una condición estable durante el bombeo, el esfuerzo tangencial de la pared del sondeo está dado por la ecuación 3-18.

$$3-18 \quad \sigma_{\theta} = 2\sigma_h - p_w - (\mu_0 - p_w) \frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}} \alpha$$

Insertando esta expresión en el esfuerzo tangencial de la ecuación 3-16 y conociendo que la presión de poros cerca al sondeo y la presión de la pared del sondeo son casi iguales, la iniciación de la fractura se convierte en la ecuación 3-19.

$$3-19 \quad p_{w,max}^{frac} = \frac{2\sigma_h - \alpha \frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}} \mu_0 + T_0}{2 - \alpha \frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}}}$$

Si se asume que  $\alpha = 1$ , la ecuación 3-19, se puede simplificar, llegando a la ecuación 3-20.

$$3-20 \quad p_{w,max}^{frac} = 2(1 - \nu_{fr})\sigma_h - (1 - 2\nu_{fr})\mu_0 + (1 - \nu_{fr})T_0$$

La ecuación 3-17, representa el límite superior de la iniciación de la fractura y la ecuación 3-19, representa el límite inferior de la presión de iniciación de la fractura. El límite superior es comúnmente referenciado como el límite de presurización rápido y el límite inferior como el límite de presurización lento (Dertournay y Carbonell, 1997).

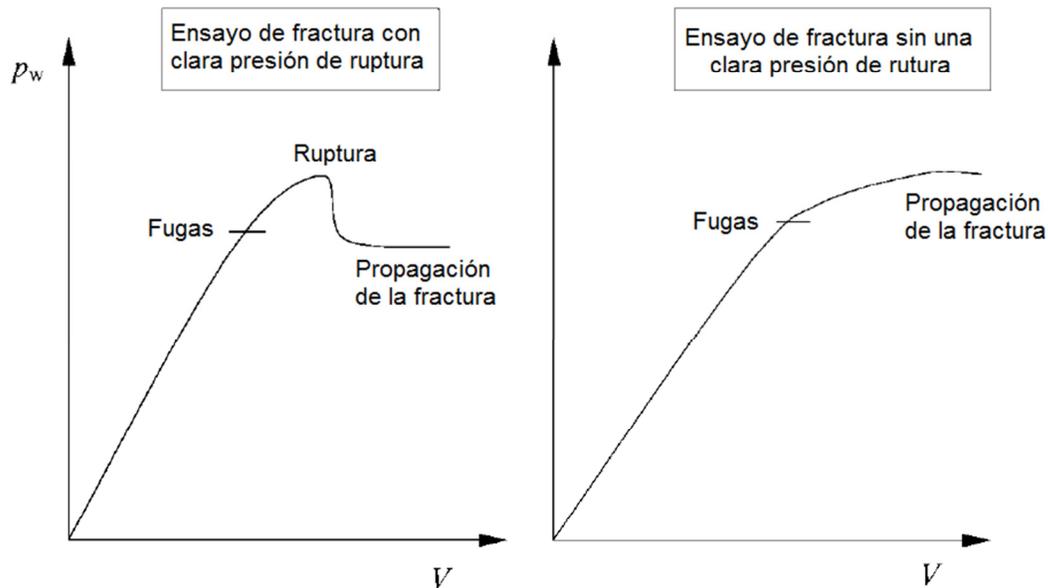
Considerando sólo el efecto de la tasa de bombeo en la evolución de la presión de poros, este es sólo significativo para rocas con muy baja permeabilidad. Detournay y Cheng (1992) mostraron que para un fluido como el agua, la permeabilidad de la roca puede ser menor que 1  $\mu$ Darcy, antes de experimentar cualquier efecto de la tasa de bombeo. Por encima de este valor la roca se puede asumir totalmente permeable y se aplicaría el límite inferior de la iniciación de la fractura.

En una situación real, las curvas de tiempo-presión pueden ser ligeramente diferentes de las mostradas en la Figura 3-44. La curva mostrada en la Figura 3-45, ilustra una idea más general, donde la curva de la izquierda tiene una presión de ruptura distintiva, mientras que la curva de la derecha no lo tiene.

Se asume que las roturas o fracturas existen en la pared de un sondeo, hasta cierto punto donde los esfuerzo de tensión heredados, se rompen. Luego se asume que el esfuerzo tangencial es transmitido por medio de la fractura, pero la presión del sondeo puede penetrar dentro de la fractura sin avanzar dentro de la formación. Esto deberá requerir algún material de cierre alrededor de la fractura. Dicho escenario es posible cuando con anterioridad se presuriza la fractura del sondeo en una arenisca. Refiriéndose a la ecuación 3-17, se llega a la ecuación 3-21:

$$3-21 \quad p_w = \sigma_h$$

Esto implicaría que la iniciación de la presión de la fractura es igual al esfuerzo horizontal menor. Esta situación, sin embargo, no es automáticamente detectable como una respuesta de presión-volumen, especialmente si las fracturas son pequeñas, ya que todavía hay resistencia al crecimiento de la fractura en la punta. No es hasta que la resistencia de la punta es superada y la fractura comienza a crecer, cuando se puede observar la desviación lineal en la respuesta de la presión-volumen. La desviación es más propensa a verse a una presión baja en un esquisto, que en una arenisca.



**Figura 3-45. Presión realista en un sondeo durante la fractura hidráulica en un sondeo vertical.**

**Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics [13].**

Ha sido observado experimentalmente que una fractura iniciada en una pared de un sondeo, puede crecer significativamente (varios centímetros) antes de convertirse inestable (Moria et al., 1996). Esto se explica como una torta de filtro interior en la fractura que protege la punta de la fractura de la presión en el resto de la fractura. Esto implica que una cierta cantidad de sobrepresión en la fractura es requerida antes de que la presión en la punta sea lo suficientemente grande como para causar la ruptura y el crecimiento inestable de la fractura. Este comportamiento es sólo posible en una roca permeable como la arenisca y esto puede explicar porque la aparente diferencia entre la iniciación de la fractura en una arenisca que en un esquisto. Para este tipo de comportamiento, la pendiente de la curva permanecerá casi constante inclusive después de la iniciación de la fractura, hasta que el fluido comience a fluir dentro de la fractura.

Si el esfuerzo horizontal es diferente, entonces la distribución de esfuerzos es modificada. Si se asume que  $\sigma_h$  es el esfuerzo principal menor y que  $\sigma_H$  es el esfuerzo principal intermedio, entonces la presión de iniciación de la fractura para los casos impermeables o de alta presurización en un sondeo vertical está dada por la ecuación 3-22.

$$3-22 \quad p_{w,max}^{frac} = 3\sigma_h - \sigma_H - \mu + T_0$$

Esta expresión se obtiene sustituyendo  $2\sigma_h$  por  $(3\sigma_h - \sigma_H)$  en la ecuación 3-17. Y similarmente se hace la misma sustitución en la ecuación 3-19, para obtener la expresión del límite inferior de la presión de iniciación de la fractura.

Considerando la ecuación 3-20, con un valor de  $\nu = 0,5$  y un esfuerzo de tensión despreciable, se llega a la ecuación 3-23.

$$3-23 \quad p_{w,max}^{frac} = \sigma_h$$

Entonces la fractura se iniciará a una presión igual a la presión requerida para propagar la fractura. Por lo tanto en este caso no habrá concentración de esfuerzos alrededor de la presión de iniciación de la fractura.

Si se vuelve a considerar la misma ecuación 3-20, pero ahora asumiendo los efectos de la anisotropía del esfuerzo horizontal, el resultado es la ecuación 3-24 o 3-25.

$$3-24 \quad p_{w,max}^{frac} = \frac{3\sigma_h - \sigma_H}{2}$$

O

$$3-25 \quad p_{w,max}^{frac} = \sigma_h + \frac{\sigma_h - \sigma_H}{2}$$

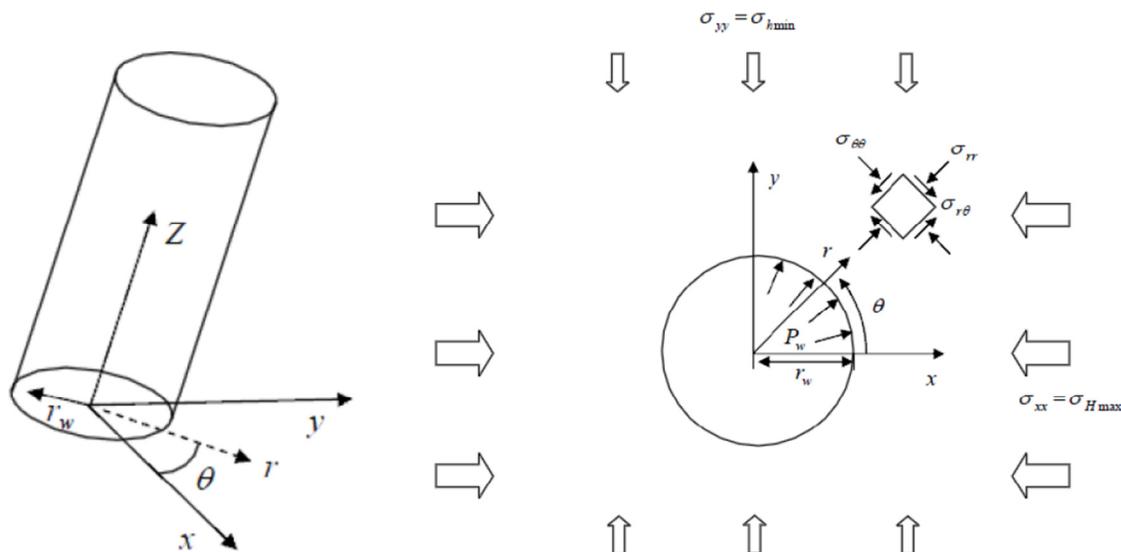
Esto simplemente muestra que en este caso especial, la fractura iniciará a una presión menor que el esfuerzo principal menor en la formación ( $\sigma_h$ ). Por lo tanto la presión de iniciación es menor que la presión de propagación y un aumento de la presión del sondeo va a ser requerida para hacer que la fractura se propague.

Cabe recordar que lo mostrado anteriormente es basado en condiciones ideales. La verdadera presión de iniciación de la fractura, va a depender de las condiciones de esfuerzo, la dirección e inclinación del sondeo, las propiedades de la roca, el fluido de inyección y los procedimientos operacionales.

Existen otros modelos de diferentes autores, que interpretan la fractura hidráulica en un sondeo. A continuación se muestran las diferentes teorías.

#### *Solución de Kirsch [17]*

Kirsch (1898), describe el esfuerzo alrededor de un sondeo vertical con un campo de esfuerzos disparejo. La transformación de los esfuerzos para un sondeo vertical está dado en la Figura 3-46, esta solución asume una condición elástica lineal y un plano de esfuerzos normal al eje del sondeo.



**Figura 3-46. Un sondeo orientado arbitrariamente bajo el sistema de esfuerzos in-situ (Salchi, 2012).**

**Fuente: Liberman [17].**

Para un sondeo orientado arbitrariamente, las coordenadas cilíndricas principales se describen en las ecuaciones 3-26 a 3-30.

$$3-26 \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \left(1 + \frac{r_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \tau_{xy} \left(1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4}\right) \sin 2\theta - p_w \frac{r_w^2}{r^2}$$

$$3-27 \quad \sigma_{zz} = \sigma_z - \nu \left[ 2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \frac{r_w^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \frac{r_w^2}{r^2} \sin 2\theta \right]$$

$$3-28 \quad \tau_{r\theta} = \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \left(1 - 3 \frac{r_w^4}{r^4} + 2 \frac{r_w^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy} \left(1 - 3 \frac{r_w^4}{r^4} + 2 \frac{r_w^2}{r^2}\right) \cos 2\theta$$

$$3-29 \quad \tau_{\theta z} = (-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2}\right)$$

$$3-30 \quad \tau_{\theta z} = (\tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta) \left(1 - \frac{r_w^2}{r^2}\right)$$

Donde,  $\sigma$  es el esfuerzo normal,  $\tau$  es el esfuerzo cortante,  $r_w$  es el radio del sondeo,  $r$  es la distancia desde el sondeo y los subíndices,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $r$  y  $\theta$ , denotan las direcciones definidas en la Figura 3-46. Las ecuaciones 3-26 a 3-30, representan un caso genérico para un sondeo orientado arbitrariamente a una dirección de esfuerzos cualquiera. Cuando se tiene un sondeo vertical, donde el ángulo  $\theta$  es medido desde el esfuerzo horizontal máximo hasta el mínimo ( $\sigma_H$ ,  $\sigma_h$ ) del sondeo vertical, con un campo distante de esfuerzos con el mismo esfuerzo horizontal máximo y mínimo.

$$3-31 \quad \sigma_{rr} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4} - 4 \frac{r_w^2}{r^2}\right) \cos 2\theta - p_w \frac{r_w^2}{r^2}$$

$$3-32 \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{r_w^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - p_w \frac{r_w^2}{r^2}$$

$$3-33 \quad \sigma_{zz} = \sigma_V - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$$

$$3-34 \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4} - 2 \frac{r_w^2}{r^2}\right) \sin 2\theta$$

$$3-35 \quad \tau_{\theta r} = \tau_{rz} = 0$$

En la pared del sondeo  $r_w$  es igual a  $r$ , lo que reduce las ecuaciones 3-31 a 3-35 a:

$$3-36 \quad \sigma_{rr} = p_w$$

$$3-37 \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - p_w$$

$$3-38 \quad \sigma_{zz} = \sigma_V - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta$$

$$3-39 \quad \tau_{\theta r} = \tau_{rz} = \tau_{r\theta} = 0$$

Las ecuaciones 3-36 a 3-39, están indicando que el esfuerzo máximo y mínimo en una pared de un sondeo, tiene lugar en la orientación del esfuerzo máximo y mínimo, por consiguiente:

$$3-40 \quad \sigma_{\theta\theta\text{mín}} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_w - \mu$$

$$3-41 \quad \sigma_{\theta\theta\text{máx}} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w - \mu$$

Estas ecuaciones pertenecen a un sondeo de paredes impermeables, lo que significa que se ha formado una sección compacta, lo que previene que los fluidos entren a la formación. Teniendo en cuenta esto, se llega a:

$$3-42 \quad P_{frac} = 3\sigma_H - \sigma_h - \mu + T_0$$

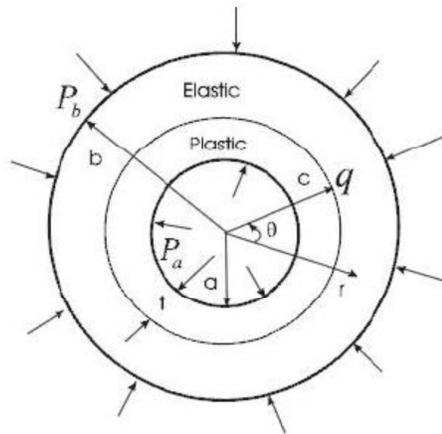
Y para una formación permeable que tiene una comunicación completa entre el sondeo y la presión de poros, la presión de fractura se describe como:

$$3-43 \quad P_{frac} = \frac{3S_h - S_H - \alpha \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu}\right) \mu + T_0}{2 - \alpha \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)}$$

Donde  $\alpha$ , es el coeficiente de Biot y  $\nu$  es el coeficiente de Poisson.

#### *Modelo Elasto-Plástico [17]*

Aadnoy et al., (2004) realizó una suposición de que la pared del sondeo tiene una zona plástica como se describe en la Figura 3-47.



**Figura 3-47. Esquema de la pared de un sondeo, en la cual se asume una zona plástica (Addnoy, 2004).  
Fuente: Liberman [17].**

Este modelo asume que la presión de la fractura es más grande a lo previsto en la “solución de Kirsch”. Esto asumiendo que ni la barrera del fluido, ni la pared del sondeo se comportan plásticamente. El concepto detrás de esta idea está basado en que la presión del sondeo es el límite interior de la condición de la zona de plasticidad, con una presión que es igual en la interface de la región plástica y elástica, donde el esfuerzo in-situ actúa como una condición límite tendiendo hacia el infinito. El esfuerzo tangencial es el factor de control para el proceso de fracturamiento. En la ecuación 3-44, se muestra la solución del esfuerzo tangencial.

$$3-44 \quad \sigma_{\theta} = -P_b + \frac{c^2}{r^2} - (q - P_b) - P_a + \frac{2Y}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{r}{a}\right) + \frac{2Y}{\sqrt{3}}$$

El término de la zona plástica en la ecuación 3-44, está siendo representado por los dos últimos términos. Debido a que la zona plástica de este modelo, puede presentarse un incremento en la presión debido a la resistencia de la deformación de la roca. Para poder definir la causa de la falla, debido a la carga del esfuerzo tangencial que sobrepasa el esfuerzo a tensión de la roca. A continuación se expresa de la siguiente forma:

$$3-45 \quad \sigma_{\theta} - P_0 \leq -\sigma_t$$

Por consiguiente, la presión de la fractura para el modelo elasto-plástico es presentada en la ecuación 3-46.

$$3-46 \quad P_{frac} = 3\sigma_h - \sigma_H + \sigma_t - P_0 + \frac{2Y}{\sqrt{3}} \ln\left(1 + \frac{t}{a}\right)$$

Se realizaron ensayos en muestras permeables con diferentes fluidos de inyección. Cuando las muestras fueron ensayadas con agua, como elemento de inyección, mostraron una buena correlación con el modelo poro-elástico (Aadnoy, 2004).

$$3-47 \quad P_{frac} = \sigma + (1 - 2\nu)(\sigma - P_0) + (1 + \nu)\sigma_t$$

Esta ecuación 3-47, solo funciona cuando se utiliza el agua como elemento de inyección.

*Modelo de la resistencia de la fractura, basado en la zona no invadida [17]*

Salehi (2012), modifico la solución analítica de Abe et al. (1976), para las fracturas en forma de moneda en un medio infinitamente extendido. El modelo fue desarrollado, asumiendo que la punta de la fractura estaba siendo sujeta a un esfuerzo normal que separa las caras simétricamente. La presión de la fractura puede ser descrita por la siguiente expresión:

$$3-48 \quad P_{frac} = (\lambda + 1)\sigma_h - \lambda\mu$$

Este modelo asume que la fractura está sujeta al esfuerzo horizontal mínimo y a la existencia de una zona no invadida en la punta de la fractura (Figura 3-48). Esta zona no invadida, ha sido documentada por experimentos realizados por Moria et al. (1990). Basado en la longitud de la zona de no invasión, se puede crear la siguiente expresión:

$$3-49 \quad \lambda = \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R_1}{R}\right)^2}} * \sqrt{1 - \left(\frac{R_1}{R}\right)^2}$$

Donde  $\lambda$  es el factor de eficiencia causado por la zona de no invasión, la cual tiene un valor de 0 a 1,5.

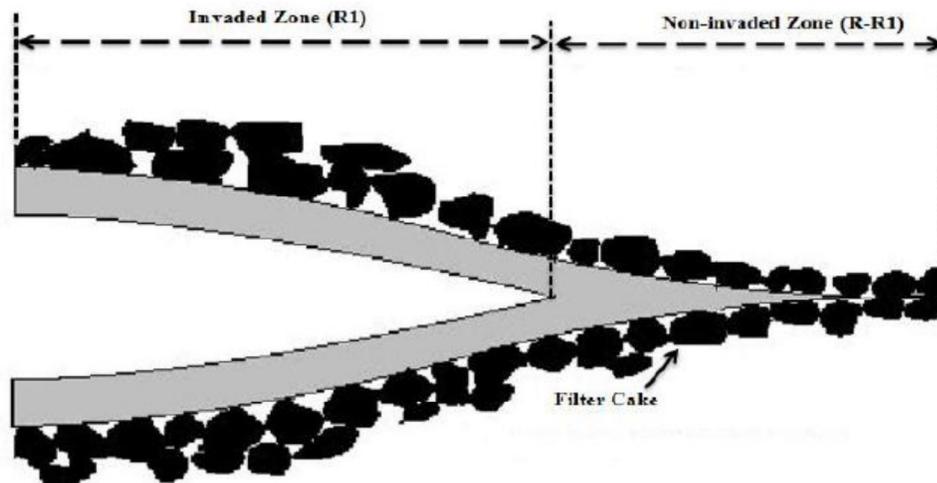
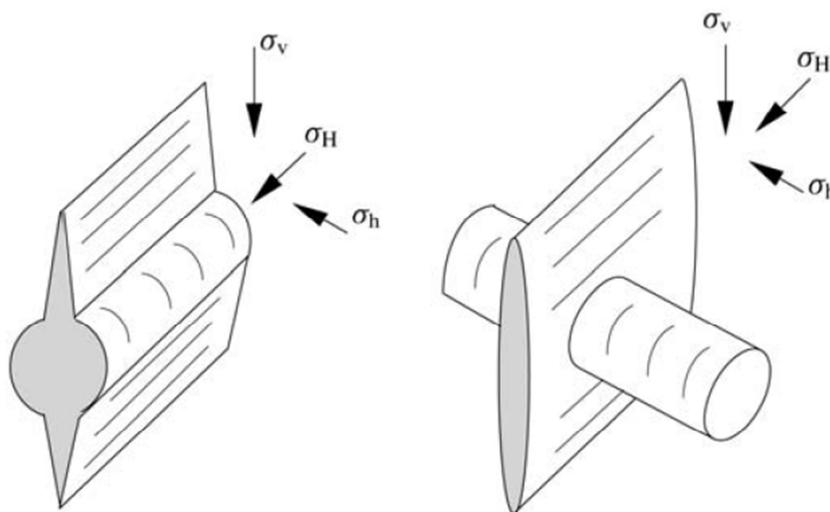


Figura 3-48. Zona invadida y no invadida, en una fractura en un ambiente normal (Salehi, 2012).

Fuente: Liberman [17].

- Orientación de la fractura

En un comienzo se creía que las fracturas en un ensayo de fracturamiento hidráulico, eran siempre horizontales. No fue sino hasta el año 1956 donde los autores Anderson y Stahl demostraron que no todas las fracturas eran horizontales, pero que sí la gran mayoría.



**Figura 3-49. Ilustración de una fractura paralela (izquierda) y una perpendicular (derecha) al sondeo.**

**Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics [13].**

Mediante experimentos se ha podido comprobar que cuando la fractura puede crecer libremente, esta puede llegar a ser vertical, horizontal u oblicua, todo dependiendo del estado de esfuerzos encontrado en el sitio.

El plano a lo largo del cual se inicia la fractura está en el sentido perpendicular al plano del menor esfuerzo. Esto implica que la fractura que sea horizontal, es porque el esfuerzo mayor es horizontal y el menor en el vertical. Y por el contrario, cuando la fractura es vertical cuando crece en el mismo plano del máximo esfuerzo vertical y perpendicular al esfuerzo mínimo horizontal. Esto se observa en la Figura 3-49.

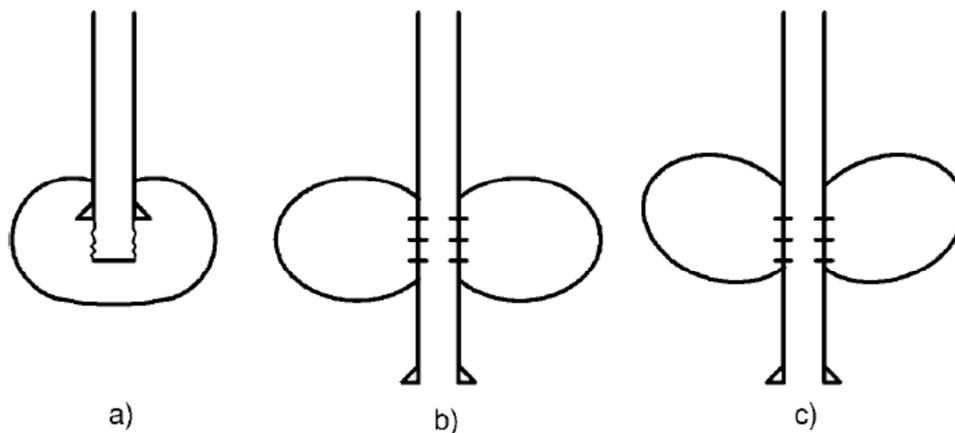
En el caso donde el sondeo no este alineado con alguna dirección del esfuerzo principal, la fractura comenzará a crecer en la dirección de la menor resistencia encontrada, con ciertas características no planares. Esta dirección de la fractura, no necesariamente debe coincidir con la dirección del menor esfuerzo principal in-situ. Por consiguiente la fractura puede que no comience a crecer en una dirección y termine torciéndose hasta eventualmente llegar a ser normal al esfuerzo principal menor in-situ.

Cuando el esfuerzo horizontal es el menor, la fractura generada va a ser siempre una fractura vertical. En situaciones especiales, cuando el esfuerzo vertical es el menor, la

fractura generada debe ser horizontal. Y en áreas de actividad tectónica el esfuerzo principal puede estar inclinado, con respecto a la dirección horizontal o vertical. Entonces la fractura también va a ser inclinada.

- Crecimiento y confinamiento de la fractura

Una fractura que se expande desde un punto de inicio en una roca isotrópica, en un campo de esfuerzos homogéneo, su crecimiento será igual en todos los sentidos, formando así una fractura circular. Cuando una fractura se crea desde un sondeo, la geometría puede ser modificada por la configuración del mismo sondeo, como se indica en la Figura 3-50. Existe una tendencia a que las fracturas salgan para arriba, como se muestra en la Figura 3-50 (c), cuando los esfuerzos gravitacionales son reducidos en esta dirección.



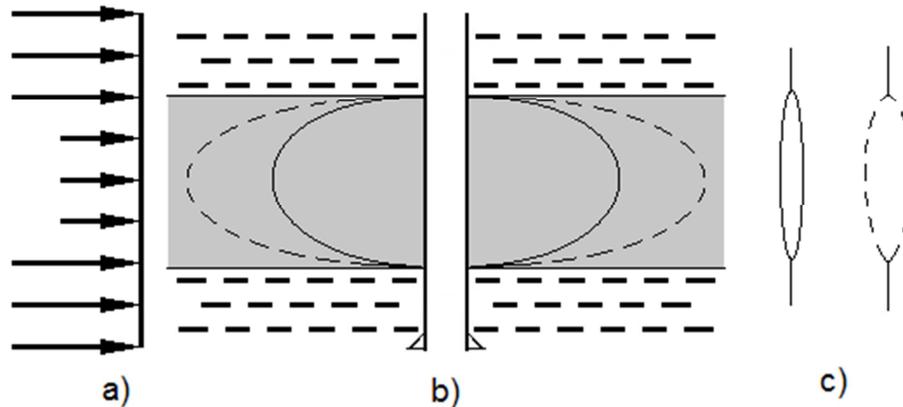
**Figura 3-50. Efectos del sondeo en la geometría del crecimiento de la fractura. Tipo zapata (a), típico sondeo (b) y de gravedad (c).**

**Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics [13].**

Aunque el esfuerzo de sobrecarga normal se incrementa con la profundidad, el esfuerzo horizontal puede variar de acuerdo a las condiciones topográficas o litológicas, como se mostró en el capítulo 3.4. Este contraste en los esfuerzos horizontales es muy importante cuando se considera el confinamiento en formaciones estratificadas. La diferencia en las propiedades elásticas y de resistencia, pueden también afectar la propagación de la fractura de un estrato a otro, pero en contraste con el esfuerzo in-situ, este es mucho más determinante.

El fracturamiento en una arenisca estratificada, entre un estrato superior e inferior de esquisto, se puede ver en la Figura 3-51. La diferencia entre el esfuerzo horizontal principal menor, está indicado en la parte (a) de la Figura. Esta diferencia puede ser tan pronunciada que la fractura no se va a propagar en los estratos de esquisto. Esto resultará en una fractura elíptica como la ilustrada en la parte (b) de la figura. Para

extender dicha fractura, las paredes se tienen que ampliar hacia el exterior, incrementando así al ancho de la fractura, como se ve en la parte (c) de la figura.



**Figura 3-51. Confinamiento de una fractura entre estratos de un esfuerzo mayor.**

**Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics [13].**

La presión requerida para extender la fractura se divide en tres partes:

1. Presión requerida para mantener la fractura abierta hacia el esfuerzo mínimo.
2. La presión requerida para que el fluido pueda fluir dentro de la fractura.
3. La presión requerida para romper la resistencia de la punta de la fractura y así creando un nuevo volumen de la fractura.

Estas tres partes se pueden simplificar en la ecuación 3-50.

$$3-50 \quad p_c = p(\sigma_h) + p(\text{flujo}) + p(\text{punta})$$

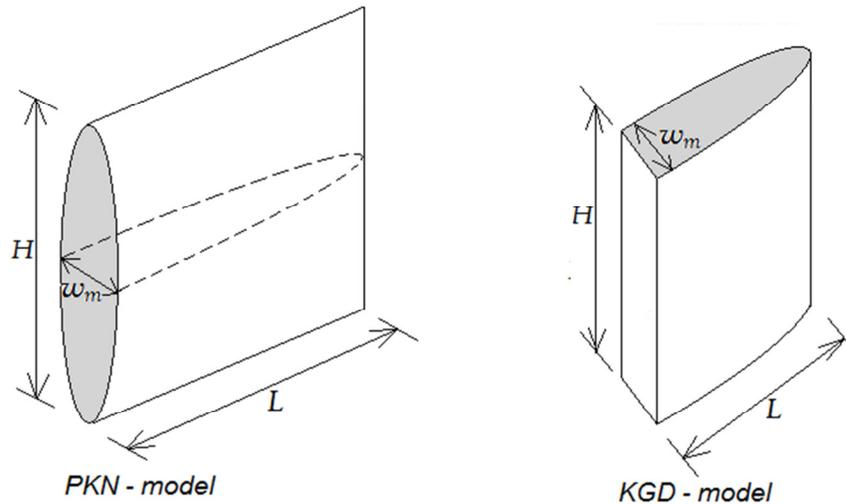
Este término representa el esfuerzo in-situ mínimo y la presión adicional requerida para mantener la apertura de la fractura. Para fracturas pequeñas y estrechas con un fluido de viscosidad baja, la extensión de la presión va a permanecer relativamente constante. Para fracturas grandes y usando fluidos viscosos, o con fluido de fracturación o “propante”, la resistencia del fluido se incrementara y por consiguiente también la presión para la propagación de la fractura.

- Tamaño y forma de la fractura

La modelación clásica y analítica de las fracturas en dos dimensiones, comienza con la solución de una línea de una grieta en un plano infinito y elástico. Combinando esto con la mecánica de fluidos para el flujo en la fractura y que posiblemente se den filtraciones hacia la formación, el principio del balance de la masa puede ser usado para derivar la expresión analítica de la longitud, ancho y presión interna de la fractura.

Existen dos modelos para representar la geometría en dos dimensiones de la fractura, el modelo llamado PKN (Perkins-Kern-Nordgren) y el modelo KGD (Kristianovitch-

Geertsma-de Klerk). Los dos modelos asumen condiciones de deformación plana. El modelo KGD asume la deformación confinada en el plano horizontal, mientras que el modelo PKN, asume una deformación en el plano vertical. Una ilustración esquemática se puede ver en la Figura 3-52.



**Figura 3-52. Confinamiento de una fractura entre estratos de un esfuerzo mayor.**  
Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics [13].

Otras suposiciones de ambos modelos son:

- La altura de la fractura es constante e independiente de la longitud de la fractura.
- La malla de presiones en la punta de la fractura es igual a cero.

El modelo PKN es el más apropiado para radios más grandes que uno, mientras que el modelo KGD es más apropiado para radios menores.

El máximo ancho para una fractura ( $w_m$ ) para el modelo KGD está dado por la ecuación 3-51.

$$3-51 \quad w_m = \frac{2(1-\nu)}{G} = \frac{4(1-\nu^2)Lp_e}{E} = \frac{4Lp_e}{E'}$$

Donde  $p_e$  es la malla de la presión de la fractura (la presión en la fractura menos el esfuerzo in-situ más pequeño),  $L$  es la longitud media de la fractura,  $\nu$  es el Poisson y  $G$  es el módulo cortante.  $E$  es el módulo de Young y  $E'$  es el plano de tensión del módulo

Ya que el valor del módulo es muy grande en comparación con la presión de la fractura, el valor del ancho es mucho menor que la longitud de la fractura. La malla de la presión

depende de la resistencia del flujo en la fractura y por consiguiente de la viscosidad y la velocidad de inyección.

La ecuación del ancho máximo en el modelo PKN está dada por la sustitución de  $L$  por  $H/2$ . Un ancho de fractura promedio, puede encontrarse al asumir la fractura como un contorno elíptico. Esto lleva a la ecuación 3-52.

$$3-52 \quad \bar{w} = \frac{\pi(1-\nu)Lp_e}{2G} = \frac{\pi(1-\nu^2)Lp_e}{E} = \frac{\pi L p_e}{E'}$$

Con esta expresión se puede encontrar el volumen requerido para el ensayo de fracturamiento hidráulico.

### 3.7.4 Procedimiento para realizar ensayos de fracturamiento hidráulico.

El procedimiento para realizar el ensayo se puede dividir en las siguientes etapas:

- Perforación de un pozo hasta la profundidad deseada
- Selección de la ubicación del ensayo
- Instalación de la herramienta de fracturamiento
- Presurización del sistema
- Ciclos de presurización
- Impresión de la o las fracturas generadas
- Ensayos para determinar la resistencia al fracturamiento,  $R_f$ .
- Análisis e interpretación de los resultados

A continuación se describirá cada etapa.

- *Perforación de un sondeo hasta la profundidad deseada*

Una vez dispuesto el equipo necesario para realizar la perforación, se dispone a llegar a la profundidad deseada. Si se requieren de más mediciones en más de una perforación, es recomendable que la primera perforación sea vertical y la siguiente sería recomendable que se perforara de manera perpendicular a la dirección del esfuerzo máximo obtenido en la primera perforación. La inclinación del segundo pozo permitirá que se obtenga una nueva estimación del esfuerzo máximo y que además se obtenga la

inclinación en que este actúa dentro de un plano vertical. En la perforación vertical, el esfuerzo máximo se medirá en el plano horizontal, pero el esfuerzo máximo no necesariamente se encuentra en este plano. En resumen si se desea tener una estimación de los esfuerzos verticales actuando en un determinado punto, la perforación debe realizarse horizontalmente. Y si por el contrario se desea conocer la dirección en que actúan los esfuerzos principales en el plano horizontal, la perforación debe realizarse verticalmente. También es posible realizar perforaciones inclinadas para revisar y/o verificar posibles estados de esfuerzos en dicho plano perpendicular al sondeo.



**Figura 3-53. Fotografía de un equipo de perforación.**  
Fuente: Ingetec S.A.

- *Selección de la ubicación del ensayo*

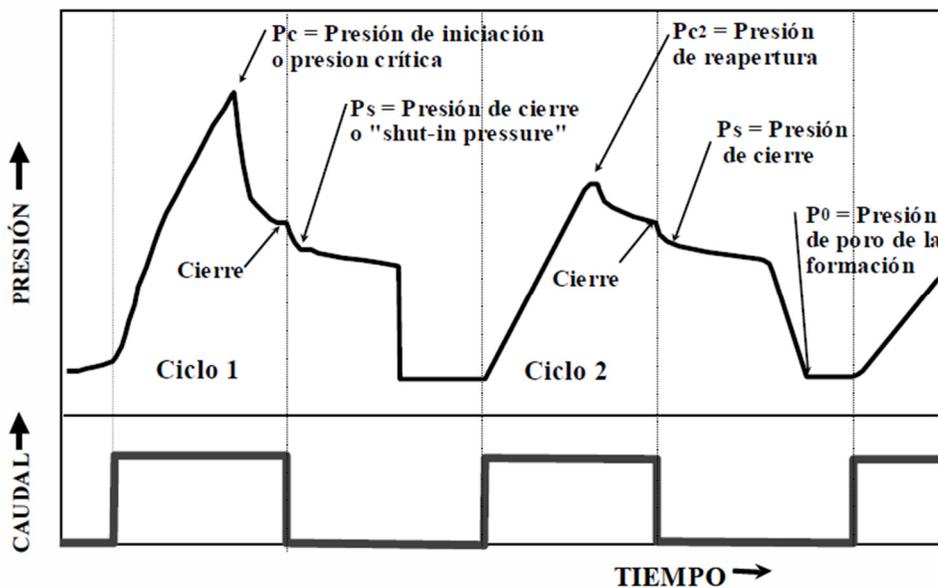
La selección adecuada del lugar en donde realizar el ensayo o los ensayos en la perforación, depende de una inspección adecuada de los testigos de la perforación. Para esto es fundamental una buena perforación y tener un tratamiento adecuado a los testigos.

- *Instalación de la herramienta de fracturamiento.*

La herramienta para realizar el ensayo, es debidamente instalada a la profundidad escogida y se mantiene en esa posición inicialmente con una presión leve de los packers, presión que además permite aislar inicialmente la zona de ensayo.

- *Presurización del sistema*

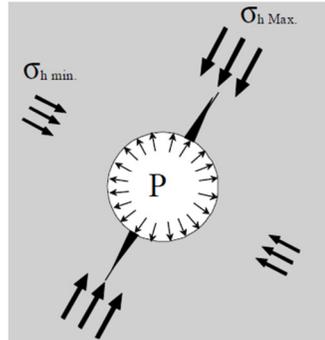
Para presurizar el sistema se tiene que presurizar en forma paralela los packers y el ensayo, manteniendo la presión de los packers levemente (1-2 MPa) sobre la presión del ensayo. Si inicialmente solo se presuriza los packers, con el objetivo de aislar el ensayo, se corre el riesgo de fracturar la roca con presión del packer, lo que hace que se dificulte la interpretación de los registros. La presión para cuando se inicia la fractura de la roca, lo cual es evidente en el registro, al verse una caída rápida en la presión del ensayo. En la Figura 3-54, se muestran los ciclos típicos de presurización del ensayo.



**Figura 3-54. Curva presión vs tiempo junto con la tasa de flujo, para el método de Fractura Hidráulica.**

**Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes [9].**

El ciclo completo incluye la determinación de la presión de cierre,  $P_s$ , que corresponde a la presión donde se equilibra el sistema. Luego la presión se libera y se produce una presión de rechazo (rebound pressure), que es un aumento de la presión en el ensayo debido al cierre de la fractura. Y finalmente se libera casi totalmente la presión tanto en el ensayo como en los packers, para así poder iniciar otro ciclo de presurización. En la Figura 3-55 se muestra de manera esquemática los esfuerzos que actúan en el ciclo de presurización en el ensayo.



**Figura 3-55. Fractura formada y tensiones principales en el plano normal al sondeo.**  
**Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes [9].**

- *Ciclos de presurización*

Ya al terminar el primer ciclo y que la grieta inicial se halla dado, se realizan nuevos ciclos de presurización, pueden ser dos o tres, de la misma forma como se realizó el ciclo inicial. Al estar ya la grieta abierta, a causa del primer ciclo, la presión para reabrir la grieta,  $P_{c2}$ , es menor. En todos los ciclos es importante mantener un ritmo constante de presurización, el cual puede ser del orden de 3,5 MPa/min. La finalidad de estos ciclos adicionales es extender la grieta y conectarla con las fisuras o grietas que tiene el macizo rocoso.

- *Impresión de la o de las fracturas generadas*

Como paso siguiente, se realiza un registro de la fractura, mediante las herramientas de impresión. Normalmente, para optimizar el ciclo de operación, la impresión de las grietas no se efectúa después de concluidos los ciclos de presurización, sino que primero se efectúan ensayos a otras profundidades dentro de la perforación y una vez terminados todos los ensayos de fracturamiento se imprimen todas las grietas en forma sucesiva. La utilización de esta herramienta se muestra más adelante en el documento.

- *Ensayos para determinar la resistencia al fracturamiento,  $R_f$*

La última etapa en la realización del ensayo en sí, corresponde con las pruebas para determinar la resistencia al fracturamiento de la roca. Esta resistencia se efectúa con el mismo equipo. Estas pruebas deben realizarse con posterioridad, ya que se requiere una preparación de las muestras. Estas muestras corresponden a testigos de las perforaciones de donde se realizaron los ensayos de fracturamiento hidráulico. La muestra de la perforación es cortada a un largo del orden de 2-3 veces el diámetro de perforación. Luego de efectuar el corte deseado, se efectúa una perforación central, de 5 mm de diámetro y de una profundidad cercana al 70% del largo de la muestra. La muestra es montada en la prensa del ensayo y se presuriza la perforación central con el mismo líquido y a la misma velocidad que se realizó el ensayo en el terreno, hasta que se

produce la falla. El ensayo que se realiza en la probeta corresponde a uno sin confinamiento, con lo que se obtiene una medida directa de la resistencia al fracturamiento.

### 3.7.5 Normas

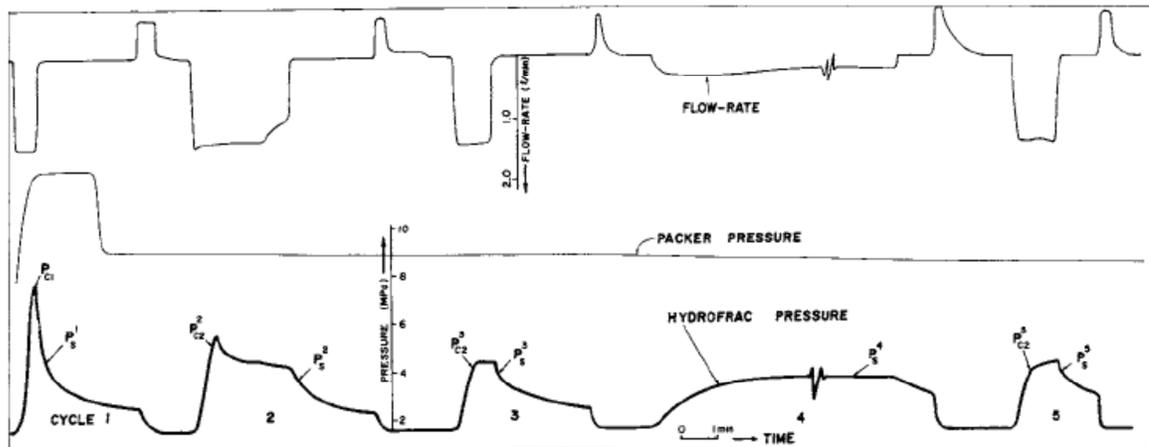
El ensayo del fracturamiento hidráulico está regulado por la norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales de pruebas estándar (ASTM por sus siglas en inglés), ASTM D4645 – 08 [9]. También como referencia se puede encontrar en la Revista Internacional de Mecánica de Rocas y Ciencias de la Minería (ISRM por sus siglas en inglés), Métodos sugeridos para la estimación de la tensión en la roca-Parte 3: fracturación hidráulica (HF) y/o prueba hidráulica de fracturas pre-existentes (HTPF) [11].

- Norma ASTM

Una sección del pozo de sondeo se aísla mediante la presurización de dos obturadores de goma inflables. Entre estos dos obturadores la presión del fluido es sellada y se eleva mediante el bombeo de fluido a una velocidad controlada hasta que se produce una fractura en la pared del pozo. El bombeo se detiene y se deja que la presión en el intervalo se estabilice. La presión se reduce entonces al nivel de la presión de poros de la formación de roca, y el proceso de presurización se repite varias veces manteniendo la misma velocidad de flujo. Los ciclos de presión adicionales pueden llevarse a cabo a diferentes velocidades de flujo. Las magnitudes de los esfuerzos principales se calculan a partir de los diversos valores de presión y caudal obtenidos. Se detecta la orientación de la fractura con el fin de determinar la orientación de las tensiones principales transversales. Se registra una presión típica en función del tiempo y la tasa de flujo con el tiempo para un intervalo.

#### *Procedimiento*

Seleccionar las zonas de prueba de roca fracturada sólida dentro del agujero perforado. Para sellar el intervalo de prueba, se debe bajar el obturador a la profundidad predeterminada de la prueba y presurizar hidráulicamente con el fin de inflar los obturadores sobre la pared del pozo del sondeo. La presurización, típicamente se realiza usando agua, que se realiza en la superficie por una bomba de alta presión y se transporta al obturador por medio de la tubería o manguera flexible.



**Figura 3-56. Resultados típicos de la presión-tiempo y caudal-tiempo, durante el ensayo.**  
Fuente: Norma ASTM D4645 – 08 [9].

Con los obturadores bien anclados a las paredes laterales (con una presión de 3 MPa en los obturadores es generalmente suficiente en esta etapa de la prueba), se comienza a presurizar hidráulicamente (típicamente usando agua) el intervalo de prueba entre los obturadores a un caudal constante. Esta tasa puede cambiar de un orificio de prueba al siguiente, dependiendo de la permeabilidad de la roca (entre más alta la permeabilidad, más alta es la tasa). El principio general es afectar el hidrofracturamiento dentro de un minuto más o menos desde el comienzo del aumento de la presión a intervalos. A lo largo del intervalo de presurización, se debe mantener la presión del obturador a un nivel de aproximadamente 2 MPa mayor que la presión de intervalo, para asegurar que no se produzcan fugas. A medida que el hidrofracturamiento se va dando en la roca, se está llegando a la presión de disgregación. Si el bombeo se detiene sin ventilar la tubería hidráulica, la presión de repente caerá y se ubicará en un nivel inferior, lo cual se llama presión de shut-in. Se repite el mismo procedimiento del ciclo de presurización usando la misma velocidad de flujo, para así producir la presión secundaria de la fractura (la presión necesaria para volver a abrir un hidrofracturamiento preexistente), y los valores adicionales de la presión de cierre shut-in.

Se debe grabar de forma continua todo el proceso de presurización tanto como la presión en función del tiempo, como la tasa en función del tiempo de flujo.

Al término de la prueba, se ventila la presión del obturador para permitir que estos regresen a su diámetro original. Todo el conjunto obturadores puede entonces moverse a la siguiente zona de ensayo o sacarlos para el siguiente pozo.

La herramienta más común para determinar la orientación del fracturamiento hidráulico es el de la impresión orientada. Se baja el obturador en el sondeo después de hidrofracturamiento y se infla a una presión superior a la presión de disgregación secundaria o la presión de cierre shut-in (lo que sea mayor). Esto asegura que el empacador se abrirá ligeramente en la hidrofractura y así permitir que el recubrimiento de

goma genere una buena impresión de la fractura. Una herramienta de brújula magnética (o giroscópica) muestra el azimut de un punto fijo en el obturador. Después de unos 30 minutos de la presurización, se debe desinflar y recuperar el obturador de impresión. Trazar la impresión de la fractura y determinar su orientación con respecto al punto fijo en el obturador de modo que también se puede orientar con respecto al norte.

### *Cálculos*

El cálculo de los esfuerzos principales in-situ, está enfocado para los pozos de prueba verticales de uso común. El registro de presión-tiempo, que salen del ensayo, se utiliza para obtener los resultados de las pruebas necesarias para el cálculo; es necesario el conocimiento del comportamiento de la fractura hidráulica en la pared del sondeo para que las ecuaciones sean empleadas y para la correcta interpretación del cálculo.

Fractura Vertical: Si el esfuerzo vertical no es el esfuerzo principal mínimo, los resultados de las pruebas son para una fractura vertical. En este caso, la tensión vertical sólo puede ser estimada a partir del peso de la roca por encima del horizonte de prueba, de la siguiente manera:

$$3-53 \quad \sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i D_i$$

Dónde:

$\sigma_v$  = Esfuerzo vertical

$\gamma_i$  = Unidad de peso unitario de la roca en el horizonte  $i$  que recubre la prueba.

$D_i$  = espesor de la capa de roca  $i$

$n$  = número total de capas por encima del horizonte de la prueba

Esfuerzos horizontales: Los dos esfuerzos principales horizontales se pueden calcular de la siguiente manera:

$$3-54 \quad \sigma_h = P_s$$

$$3-55 \quad \sigma_H = T + 3\sigma_h - P_{c1} - P_0$$

Dónde:

$\sigma_h$  = esfuerzo horizontal menor in-situ.

$\sigma_H$  = esfuerzo horizontal mayor in-situ.

$P_s$  = presión shut-in en el ensayo.

$P_{c1}$  = presión de rompimiento en el ensayo.

$P_0$  = presión de poros en el ensayo.

$T$  = esfuerzo a la tracción de la roca hidrofracturada.

Se alcanza la presión de rompimiento ( $P_{c1}$ ) cuando se induce la fracturación hidráulica, y está representado por el pico de la curva de presión-tiempo en el primer ciclo de presurización. Después del rompimiento, la fractura se abre, entra el fluido y la presión cae repentinamente. Al bombear, cesa la presión de cierre (shut-in,  $P_s$ ), la cual se obtiene presentando la presión que se alcanza cuando la fractura se cierra de nuevo. Los siguientes ciclos de bombeo se continúan durante un corto período de tiempo (del orden de 1 min) después de que la fractura se ha reabierto. La fractura se considera suficientemente larga, las presiones de cierre son más representativas y la presión es menos horizontal. A menos que la fractura se cruce con juntas abiertas existentes o no pase por culpa de elementos obturadores, la presión de cierre se mantendrá aproximadamente constante de un ciclo a otro.

La resistencia a la tracción ( $T$ ) no es un parámetro constante y varía con la tasa de carga, tamaño de la pieza, tamaño de grano y el modo de prueba. La resistencia a la tracción se puede determinar en el laboratorio y se puede utilizar con correlaciones conociendo las incertidumbres. No hay forma directa de determinar  $T$  en el sondeo de prueba. Sin embargo, se puede suponer con certeza que la hidrofractura de la roca se cierra de nuevo por completo al final de un ciclo de presión, la presión requerida para abrir de nuevo la fractura en el segundo ciclo de presurización (presión reapertura de la fractura,  $P_{c2}$ ) se puede utilizar en lugar de  $P_{c1}$  en la ecuación 3-55, como sigue:

$$3-56 \quad \sigma_H = 3\sigma_h - P_{c2} - P_0$$

Las dos ecuaciones son idénticas, excepto que en la ecuación 3-55, se supone que  $P_{c2} = P_{c1} - T$  sabiendo que la resistencia a la tracción de la roca después de fracturarse (que se ha producido en el primer ciclo) es cero. Si la fractura está cerrada completamente, la pendiente de la curva de presión-tiempo será idéntica a la que en el primer ciclo hasta que la fractura se abre y se identifiquen los cambios de pendiente. El punto de cambio de pendiente se toma como el valor de  $P_{c2}$ . Si la fractura no se cierra completamente, la pendiente presión-tiempo nunca es la misma que en el primer ciclo y esta técnica de determinar indirectamente  $T$  no se puede utilizar. Se recomienda que el valor de  $P_{c2}$  se determine sólo desde el segundo ciclo durante el cual la hidrofractura es fresca y se haya producido poca erosión del aflojamiento del grano.

Las direcciones de los esfuerzos horizontales se obtienen de las siguientes igualdades:

$$\sigma_H \text{ dirección} = \text{golpe vertical de la fractura}$$

$$\sigma_h \text{ dirección} = \text{dirección normal al golpe vertical de la fractura}$$

Esto se basa en la suposición de que la fractura inicia y se extiende a lo largo del camino de menor resistencia, es decir, perpendicular al esfuerzo menor.

Fracturas horizontales y verticales - Cuando  $\sigma_v$  es el menor esfuerzo principal, la orientación de la hidrofractura, lejos del sondeo de prueba, debe ser horizontal. En la pared del sondeo. Sin embargo, la distribución de la tensión del macizo de roca intacta favorece una fractura vertical en la dirección de  $\sigma_h$ . Por lo tanto, la hidrofractura inicial será vertical y en el primer ciclo de la curva de presión-tiempo se comportará de la misma forma como se describe anteriormente en la fractura vertical. En los ciclos siguientes, sin embargo, como la fractura tiende a menudo a reorientarse y ser perpendicular al esfuerzo principal menor, es decir, que se convierta en una fractura horizontal. La respectiva presión de cierre se disminuirá a un valor aproximadamente igual al esfuerzo vertical. La impresión del obturador o el registro de televiwer sonic, confirmarán la existencia de ambas fracturas verticales y horizontales. Esta configuración de la fractura hidráulica permite el cálculo directo de los tres esfuerzos principales:

$$3-57 \quad \sigma_h = P_{s1}$$

$$3-58 \quad \sigma_H = T + 3\sigma_h - P_{c1} - P_0$$

O

$$3-59 \quad \sigma_H = 3\sigma_h - P_{c2} - P_0$$

$$3-60 \quad \sigma_v = P_{s2}$$

Dónde

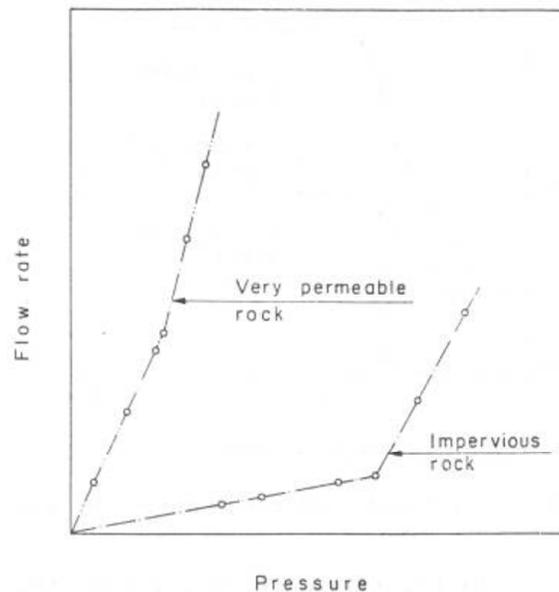
$P_{s1}$  = primera presión de shut-in

$P_{s2}$  = segunda presión de shut-in

### 3.7.6 Aspectos Geotécnicos para el ensayo

Para programar un ensayo de fracturamiento hidráulico, para obtener los parámetros del esfuerzo in-situ, es preferible conocer previamente las propiedades mecánicas de la roca y del macizo rocoso, como la permeabilidad y el esfuerzo a tensión.

Para el propósito de determinar el esfuerzo normal mínimo, un fluido es inyectado al macizo rocoso. Este esfuerzo puede ser o de valor bajo y puede estar existiendo en el macizo donde el caudal durante la inyección es alta o puede ser alta en un macizo donde el caudal es bajo. El primer caso corresponde a rocas permeables y el siguiente caso corresponde a rocas impermeables. La Figura 3-57, muestra una gráfica de presión versus caudal de una roca permeable y una impermeable.



**Figura 3-57. Tendencia típica para macizos rocosos permeables e impermeables.**  
Fuente: Marulanda, Gutierrez y Vallejo 1990, [20].

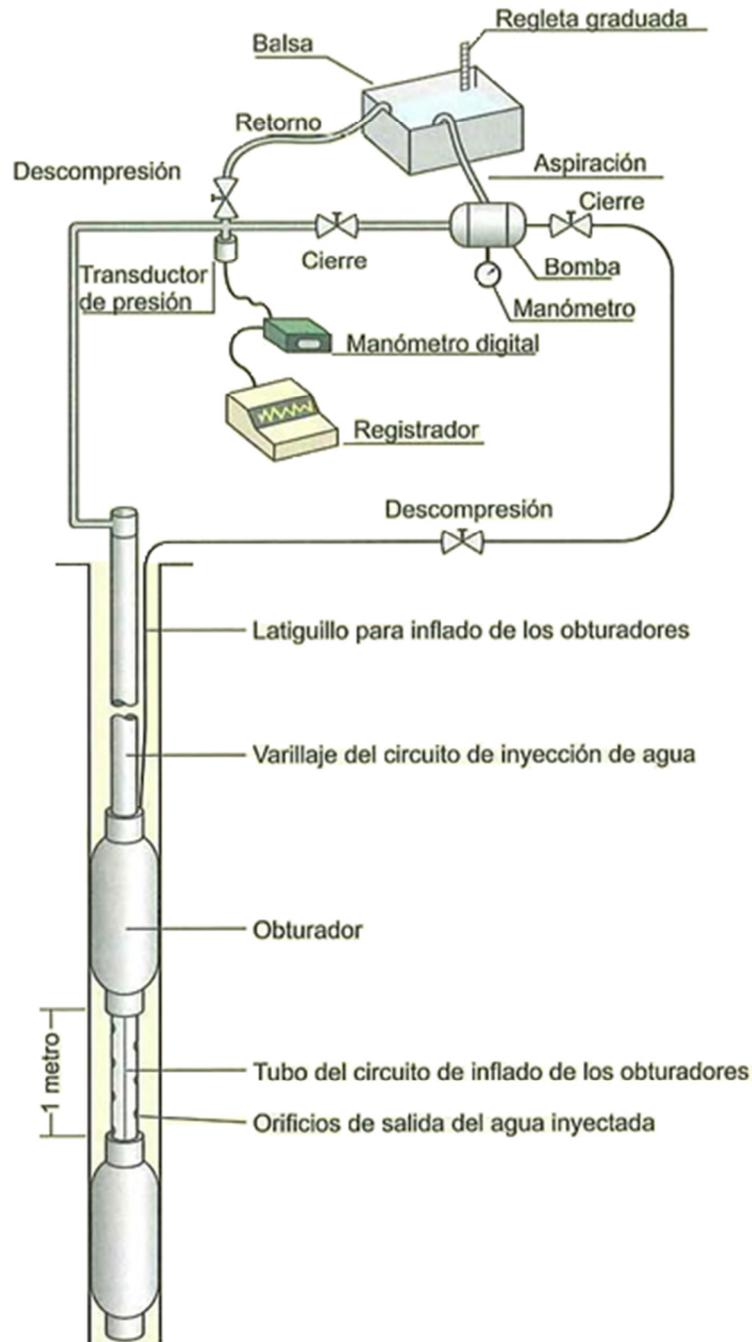
Otro aspecto importante para tener en cuenta en la definición de los componentes a utilizar, es que los equipos deben ser suficientemente rígidos como para que se eviten flujos inestables y pérdidas de presiones como, por ejemplo, cuando se da la dilatación radial.

### 3.7.7 Descripción del equipo y personal requerido

Los equipos necesarios para realizar este ensayo son los mostrados en forma típica, en la Figura 3-58. Estos equipos deben ser simples, móviles, robustos, confiables. Además deben estar definidos en concordancia con las necesidades y su adaptación a trabajos difíciles, porque ni un solo dispositivo, ni un solo equipo es útil para todas las condiciones del sitio (Marulanda, Gutierrez y Vallejo 1990, [20]).

- Equipo en superficie:

Un equipo de perforación o un trípode rígido, es colocado sobre la abertura del sondeo donde se va a realizar el ensayo, esto para poder bajar las herramientas necesarias para realizar el ensayo. La selección entre la plataforma o un trípode rígido se encuentra en función de lo pesado de la instrumentación que conforma el montaje del ensayo, incluido el peso del sistema wire line, teniendo en cuenta que el trípode rígido soporta menos peso que una plataforma, siendo este último más útil en la industria petrolera. El área que debe ser destinada para la disposición de los equipos y demás es de aproximadamente 16 m<sup>2</sup>.



**Figura 3-58. Esquema del equipo utilizado para el ensayo de fractura hidráulica.**  
**Fuente: Ingeniería Geológica [2].**

Se requiere un sistema hidráulico en la superficie, para que se efectúe la inyección de agua y se pueda controlar la presurización de los obturadores y en la zona de los ensayos o cámara donde se realiza el ensayo propiamente dicho.

El sistema hidráulico está conformado por un depósito de agua, la bomba hidráulica, el tablero de control desde el cual se controla el ensayo, las líneas hidráulicas del by-pass, de recirculación de la cámara y de los obturadores.



**Figura 3-59. Fotografía del equipo en superficie.**  
Fuente: Ingetec S.A.

- Obturadores o Packers:

Los obturadores o Packers son unas membranas de caucho inflables utilizados para sellar el tramo donde se va a efectuar el ensayo, los cuales están espaciados generalmente a una distancia igual a 6 veces el diámetro de la perforación. Estos se conectan hidráulicamente a una bomba mediante un sistema separado (Véase Figura 3-58), como es lo recomendado para llevar los registros, e igual al sistema que inyecta caudal en el tramo del ensayo. Se debe revisar el diámetro externo máximo del obturador, el cual debe ser introducido en la tubería de revestimiento o en el diámetro de la perforación (usualmente NQ) según sea el caso. Aunque se considere conveniente dejar por lo menos 4 mm de diferencia para su instalación, existen obturadores con un diámetro de 42 mm marca Bimbar o similar que facilitan su instalación en perforaciones NQ.



**Figura 3-60. Fotografía de un packer u obturador.**

**Fuente:** [http://publications.iodp.org/proceedings/319/102/102\\_f18.htm](http://publications.iodp.org/proceedings/319/102/102_f18.htm)

- Tubo a presión:

Generalmente el inflado de los obturadores y la presurización del tramo ensayado son concebidos desde superficie, aunque como es común en la industria del petróleo la bomba se ubica directamente en los obturadores inflables, remotamente controladas. El fluido se lleva a través de la perforación usando una tubería de acero inoxidable, mangueras flexibles o usando el mismo sistema de varillaje de la perforación (también sirve para descender el equipo). Las tuberías o mangueras requieren de una ayuda adicional para la inserción y el desmonte, a través de los varillajes de perforación o el sistema wireline. Adicionalmente se ubica una tubería de alimentación que contiene los acoples y accesorios necesarios para conectar los dos obturadores y así se mantienen bajo la misma presión de inflado. Pueden ser de un diámetro de 3/4 pulgada (19 mm) con uniones rectas para alta presión.

Dependiendo de la longitud de la perforación y su dirección, hacia arriba o hacia abajo, es recomendable hacer la tubería con mangueras (Marulanda, Gutierrez y Vallejo 1990, [20]). Es importante considerar, en la selección del material para el tubo a presión, las pérdidas de presión debido al diámetro interno, a la rugosidad y a los accesorios instalados a lo largo de la tubería; sí mayor es el diámetro y menor es la rugosidad, menor es la pérdida de la cabeza de presión. Por consiguiente, en casi todos los casos es mejor utilizar mangueras para la tubería de presión.

- Tubería de revestimiento:

En caso de ser necesario se deberá disponer de esta tubería para estabilizar las paredes del sondeo. Su diámetro interior mínimo deberá superar en por lo menos 4 mm el diámetro exterior máximo del obturador o packers. En sectores inestables no revestidos se puede realizar cementación, lo que evitará que se desprendan fragmentos de roca que impidan la recuperación de los obturadores.

- Medidores de presión, transductores de presión y medidores de flujo:

Los medidores de presión se usan para visualizar en tiempo real la presión hidráulica inducida, los cuales pueden adaptarse en superficie o pueden ubicarse dentro de la perforación para disminuir el efecto de las pérdidas por velocidad o por las condiciones de la tubería. Los transductores son usados para monitorear y transmitir los datos de

presión a un equipo computacional. Lo recomendado es monitorear independientemente las membranas y el tramo ensayado.



**Figura 3-61. Fotografía de un medidor de caudales.**  
Fuente: Ingetec S.A.



**Figura 3-62. Fotografía de un sistema de válvulas.**  
Fuente: Ingetec S.A.

Para grandes profundidades, al igual que el medidor de presión, es mejor tener los transductores cercanos al lugar del ensayo, lo que genera una mayor precisión en la medición de los intervalos de presión. El medidor de flujo se utiliza para medir el flujo dentro del intervalo del ensayo (usualmente un dispositivo en superficie), donde es más

importante la precisión que tiene al estimar la tasa de flujo (incremento) que el volumen introducido. El medidor de flujo se puede establecer en función de su capacidad de contar litros (cuenta litros) con graduaciones de centésimas de litro (precisión). La calidad de los controles es muy importante los cuales deben ser calibrados antes de la campaña de mediciones, donde los equipos deben ser verificados en conformidad con sus especificaciones.

- Generadores de presión:

Comúnmente la presión hidráulica se genera desde superficie a través de bombas. Para ensayos profundos, tal y como se mencionó anteriormente, existen equipos donde la bomba se ajusta al sistema de que aísla el tramo a ensayar. Algunas bombas son capaces de proveer arriba de 100MPa o más, de un típico flujo en un rango de 1-10 l/min. La bomba puede ser eléctrica, neumática (para los obturadores) o se usa por combustión de diesel. Aunque proyectos de ingeniería típicos requieren de una energía de bomba menor, dada su profundidad, donde es suficiente 20MPa, con una producción de flujo hasta 20 l/min dado el fracturamiento existente del macizo rocoso. Estas especificaciones deben ser calibradas.

Investigaciones recientes han demostrado que las bombas con sistema positivos de desplazamiento, son los más adecuados para la prueba de fracturamiento hidráulico, debido al flujo alto y constante, que pueden entregar independientemente la presión (Marulanda, Gutierrez y Vallejo 1990, [20]).



**Figura 3-63. Fotografía de una bomba y motor.  
Fuente: Ingetec S.A.**

El sistema de bombeo debe ser capaz de inyectar al menos dos veces el valor necesario de caudal. Generalmente, esta capacidad está cercana a 1,5 veces el caudal necesario, esto se debe a las pérdidas por la eficiencia de las bombas. La presión máxima nominal debe ser más alta que 1,5 veces la presión esperada más el esfuerzo esperado en el macizo rocoso (Marulanda, Gutierrez y Vallejo 1990, [20]).

- Equipo de registro:

El sistema de registro de datos consta de un acondicionador de señales, un “data-logger”, una tarjeta PCMCIA para la transmisión de datos digitales a un ordenador portátil y un software para la visualización y captura de datos. El sistema electrónico permite el registro de los resultados en tiempo real con buena precisión y resolución.



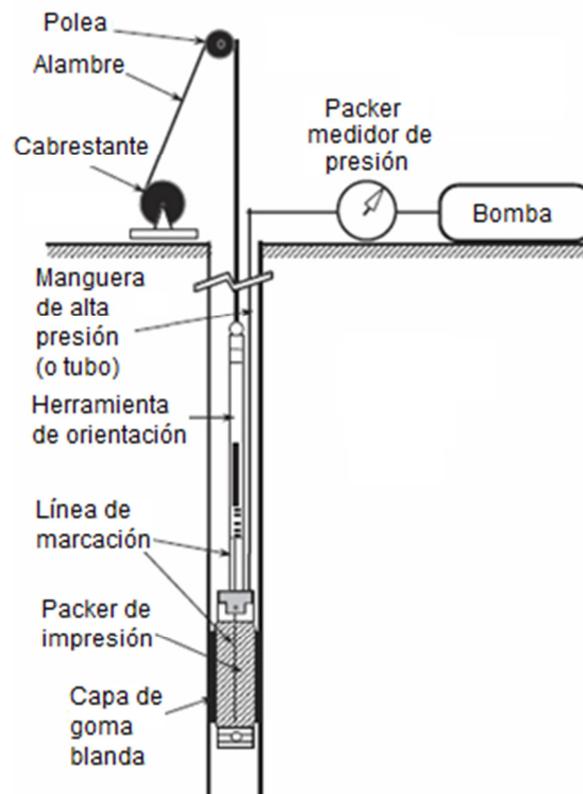
**Figura 3-64. Fotografía una consola de registro con su computador.**  
**Fuente: Ingetec S.A.**

La necesidad del registro del ensayo, depende del método del ensayo que se va a llevar a cabo. Cuando se realiza un ensayo con el método clásico, tres datos son necesarios para los cálculos; la presión en la fractura la presión de reapertura y la presión de “shut-in” (Marulanda, Gutierrez y Vallejo 1990, [20]).

- Dispositivos para la medición de las fracturas:

*Packer u obturadores de impresión:* Una imagen de la pared del sondeo en el intervalo donde se realiza el ensayo, puede ser obtenido comúnmente por medio de un obturador de impresión. Este obturador funciona con una membrana inflable, la cual generan una imagen de las paredes de la perforación, con una capa externa de goma muy suave (poco rígida). Esta membrana se lleva hasta el centro del tramo ensayado y se infla a una presión ligeramente mayor a la de SHUT-IN registrada, manteniéndola por cerca de 30 minutos. Esto produce una ligera abertura de la fractura, donde la delgada membrana penetra para realizar el registro. Se estima un tiempo para que la fractura quede de forma permanente en la membrana. Durante el período de inflado, se activa una cámara que es montada en la herramienta de orientación atada a la membrana de impresión en un tiempo programado, la cual toma la fotografía de la cara del compás magnético, la referencia respecto a una línea trazada en la membrana. Así, la impresión es orientada respecto al norte magnético, encontrando la orientación de cualquier fractura.

La impresión de HF sobre la membrana es trazada de forma relativa a una marca de orientación sobre una hoja plástica transparente envuelta. Las trazas pueden ser digitalizadas para un desarrollo estadístico del azimut y el buzamiento de las fracturas inducidas (Véase Figura 3-65).



**Figura 3-65. Esquema del equipo utilizado para el packer de impresión de fracturas.**  
**Fuente: HAIMSON, B.C.; CORNET, F. H. (2003) [11].**

*Técnica geofísica de imagen:* La comparación entre núcleos, acústico e imagen eléctrica muestran que, cuando las fracturas son cerradas, el espesor se pierde sobre la imagen geofísica. De todas formas, en profundidades fuertemente desviadas, el uso de membranas no es recomendado. En núcleos, no es claro si la fractura observada son de significancia in-situ. Pero a su favor, la zona ensayada puede exhibir múltiples fracturas, y las técnicas geofísicas han sido desarrolladas para identificar la única fractura que ha sido ensayada hidráulicamente.

La técnica de imagen eléctrica provee eficientemente la imagen de fractura abierta hidráulicamente en todos los tipos de roca excepto en arcillas y en ambientes salinos por su propiedades eléctricas. Investigaciones recientes han demostrado que sí se adapta la salinidad del fluido a la del medio, se obtienen mejores imágenes.

*Técnica video televiewers:* Esta técnica utiliza una cámara de video para tomar imágenes en tiempo real de la fractura.



Figura 3-66. Fotografía de televiever.

Fuente: [http://es.made-in-china.com/co\\_ivyzhang918/product\\_2000m-Water-Well-Inspection-Borehole-Camera-360-Degree-Rotary-Monitoring-Camera\\_esoyuyuhq.html](http://es.made-in-china.com/co_ivyzhang918/product_2000m-Water-Well-Inspection-Borehole-Camera-360-Degree-Rotary-Monitoring-Camera_esoyuyuhq.html)

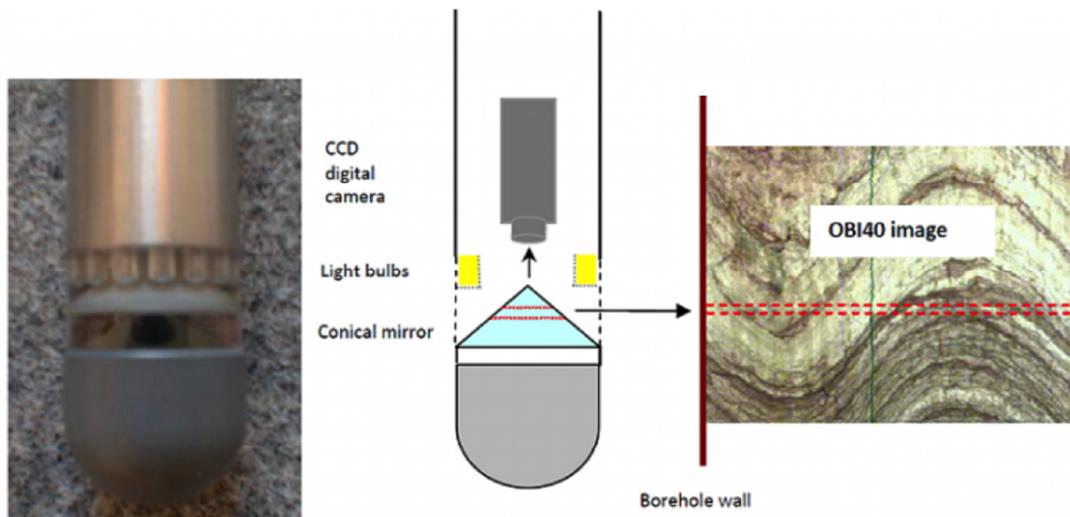
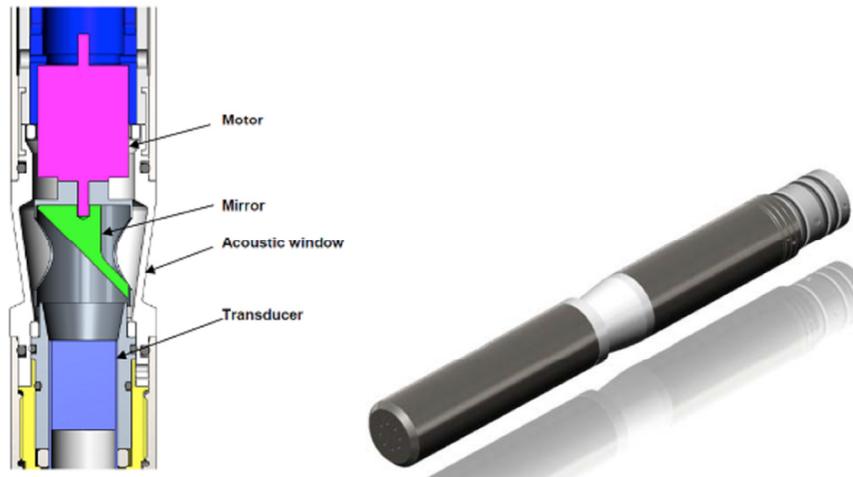


Figura 3-67. Diagrama de cómo funciona el televiever óptico.

Fuente: <http://acsmining.com/q40-obi-1000-optical/>

*Técnica de televievers acústicos:* Esta técnica muestra una imagen acústica de la pared del sondeo por medio de pulsos ultrasónicos de un sensor rotativo. Este graba la amplitud y el tiempo de desplazamiento de las señales reflejadas en las paredes.



**Figura 3-68. Diagrama de cómo funciona el televiver acústico.**

Fuente: <http://acsmining.com/q40abi-1000-acoustic/>

Es preferible relacionar la membrana de impresión para proyectos superficiales (hasta 1500), de ingeniería, con pequeños diámetros y el uso de técnicas geofísicas para ensayos profundos, luego que son costosos pero representan un mayor beneficio en profundidad.

*Herramienta para determinar la orientación:* Esta herramienta está adherida a la membrana como un instrumento de orientación, el cual puede ser magnético o giroscópico. La herramienta magnética provee una cámara para fotografiar el norte magnético en las paredes de la perforación, siendo más fácil y económico que la herramienta de giroscopio, pero de poco uso en rocas magnéticas como el basalto, algunos gneises, entre otros. Las herramientas geofísicas, como cámaras de perforación, televivers (dispositivo sónico) o sistemas de imagen eléctrica están disponibles para determinar la orientación. Cuando el sistema eléctrico de imagen es directamente montado en el sistema de membranas inflables, la misma herramienta provee el reconocimiento inicial, sin necesidad de muestreo, posición exacta en los en profundidad de los tramos a ensayar e imagen en tiempo real de la fractura abriéndose y cerrándose.

- Personal de perforación:

Buenos perforadores son esenciales para obtener núcleos útiles y perforaciones altamente alineadas, por lo que se debe contar con personal experimentado. También son requeridos para la inserción y desmonte del equipo, y para la operación de la plataforma por si alguna interferencia llega a presentarse. Se encuentran encargados del lavado de la perforación, ya que se asume que la presión se aplicará de forma directa en las paredes de la perforación y no sobre el material residual de excavación.

### 3.7.8 Tipos de ensayos

En el ensayo del fracturamiento hidráulico existen dos métodos de realización, el método clásico (Fractura Hidráulica) y el método moderno (Reapertura Hidráulica). Estos dos métodos se describen a continuación.

- Método Clásico (Fractura Hidráulica)

Se conoce cómo el método clásico debido a que así se concibió inicialmente el ensayo, denominado por sus siglas en inglés como el método HF (Hydraulic Fracturing). Los resultados del ensayo proporcionan la dirección y el estado de esfuerzos in-situ de la roca, en el plano perpendicular al eje de perforación. Debido a que el fracturamiento se realiza sobre la roca intacta, se debe seleccionar un tramo para el ensayo donde no existan sistemas de discontinuidades tales como diaclasas, fallas, estructuras heredadas.

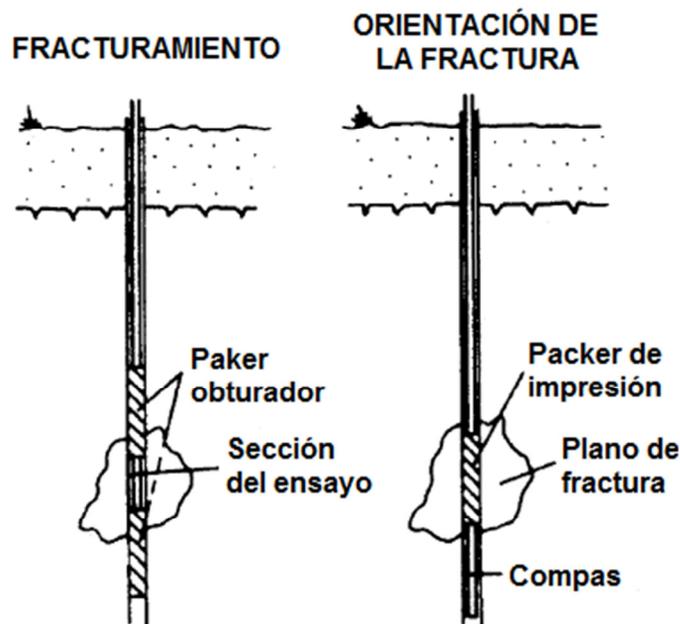
La teoría del modelo se basa en que el plano de fractura ocasionado por el ingreso de agua en el tramo seleccionado y aislado, será perpendicular al esfuerzo in-situ menor que actúa en la dirección radial al eje de la perforación (Véase Figura 3-55). Luego, para que este esfuerzo sea el principal menor  $\sigma_3$ , el eje de la perforación deberá corresponder a un eje principal, al conocer que los ejes principales son ortogonales entre sí.

Si se encuentra dentro del alcance del ensayo el encontrar el esfuerzo  $\sigma_3$ , se debe orientar la perforación de forma paralela a un eje principal ( $\pm 15^\circ$ ) y si llegase orientarse en el eje donde actúa  $\sigma_3$  la fractura será horizontal al eje de perforación. Para realizar la planeación de la forma en cómo se va a orientar el ensayo, se recurren a métodos de interpretación que permiten deducir la dirección de estos ejes principales, tal como se describieron en el numeral 3.3 de este estado del arte:

- Análisis de estructuras tectónicas: Interpretación de los campos de paleo-esfuerzos.
- Análisis de mecanismos focales de terremotos: Mediante el análisis de ondas sísmicas, que permite calcular la dirección de los esfuerzos actuantes en el sismo.
- Observación de la orientación de los planos de rotura en las paredes de un sondeo: Se ubican las fracturas producidas por el sondeo, las cuales se encuentran en la misma dirección del esfuerzo máximo horizontal.
- Medidas de relajación de tensiones en afloramientos: Analizando la relajación de los esfuerzos al reperforar un testigo de gran diámetro.

De cualquiera de estas formas se puede programar el ensayo para intentar perforar de la forma pretendida, además, con los resultados encontrados se le daría validez a la interpretación.

El método para este ensayo es el mismo descrito en el numeral 3.7.4 de este estado del arte. Pero adicionalmente luego de que la presión de poros alcanza su valor original, al esperar un tiempo, se repite el ciclo de presurización al menos tres veces, con la misma tasa de flujo. Esta tasa debe ser suficientemente alta para impedir la percolación en la fractura cerrada suceda antes que la abertura mecánica. La presión pico del nuevo ciclo es menor debido a que se reabre la fractura, y no se requiere vencer la resistencia tensional de la roca. Esta opción es recomendada sólo en HF y no se debe aplicar en el método moderno puesto que éste puede generar una fractura hidráulica real cuando el objetivo es ensayar una fractura preexistente.



**Figura 3-69. Esquema del ensayo por el método clásico.**  
**Fuente: LJUNGGREN, C.; CHANG, Y.; JANSON, T.; CHRISTIANSSON, R. (2003) [12].**

- Método Moderno (Reapertura Hidráulica)

La aplicación del método HF ha tenido extensiones, como lo es el ensayo hidráulico de fracturas existentes HTPF (por sus siglas en inglés, Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures). El método proporciona las seis componentes del tensor de esfuerzos, independientes de la orientación de la exploración y de las propiedades del material. Cuando es posible realizar los dos métodos, estos se combinan para optimizar los resultados, dado el desarrollo teórico requerido por el método HF. A diferencia del método clásico, el método moderno busca que el tramo a ensayar tenga una fractura preexistente, la cual debe tener una orientación que permita su reapertura antes que se dé la fractura de la roca intacta.

La orientación de la fractura debe ser conocida antes de realizar el ensayo y debe ser lo más cercana posible a la fractura que se esperaría si el tramo estuviera sin discontinuidades, además, estas orientaciones deben ser lo suficientemente variadas para poder llegar al tensor total de esfuerzos. Los resultados obtenidos de este método identifican los esfuerzos normales a los planos de fracturas pre-existentes y con varios ensayos se pueden deducir el tensor de esfuerzos completo.

El desarrollo de este método es similar al del HF, pero luego al incremento de la opción clásica en HF, se utiliza una tasa de flujo baja hasta que la presión se conserve constante. Luego se aumenta la tasa para encontrar otro valor de presión constante en el tiempo. Usualmente cada aumento dura aproximadamente 5 minutos. Una vez que la fractura se ha reabierto se evidencia una caída en el monitoreo de presión. Esto provee un valor adicional de presión "shut in". En el método de HTPF, se debe hacer al menos dos veces o más, para que al comparar con la de abertura, se escoja el valor mínimo evidenciado en los ciclos.

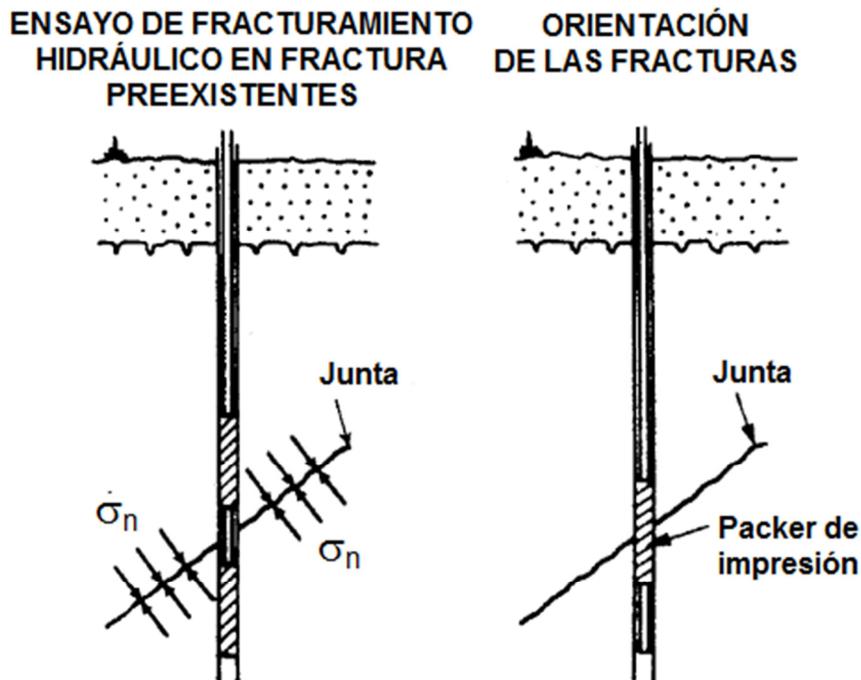


Figura 3-70. Esquema del ensayo por el método moderno.

Fuente: LJUNGGREN, C.; CHANG, Y.; JANSON, T.; CHRISTIANSSON, R. (2003) [12].

### 3.7.9 Obtención de parámetros

Para hallar la presión de caída o breakdown ( $P_b$ ), se toma del pico del primer ciclo y se representa la fractura hidráulica HF y la apertura de la fractura en el método HTPF. Luego de alcanzar el pico, la presión decae así el bombeo continúa en la tasa inicial.

La presión de cierre o “shut-in” ( $P_s$ ) es el punto de ascenso de los siguientes ciclos, donde la pendiente empieza a decrecer respecto a la mantenida en el primer ciclo. La pendiente decrece porque se presentan infiltraciones de la fractura reabierta para la misma tasa de flujo en el método HF, tal y como se observa en la Figura 3-54, según lo mencionado para la reapertura de la fractura.

La presión SHUT-IN ( $P_s$ ) es cuando se cierra la fractura luego de que se impide el ingreso de flujo, pero este valor no es la tendencia constante ya que interfiere la permeabilidad de la roca, por lo que se analizan las pendientes y los puntos de inflexión. Existen varios métodos propuestos por diversos autores, donde obtienen esta presión de forma gráfica, tal como se observan en la Figura 3-71, Figura 3-72, Figura 3-73, Figura 3-74, Figura 3-75 y Figura 3-76.

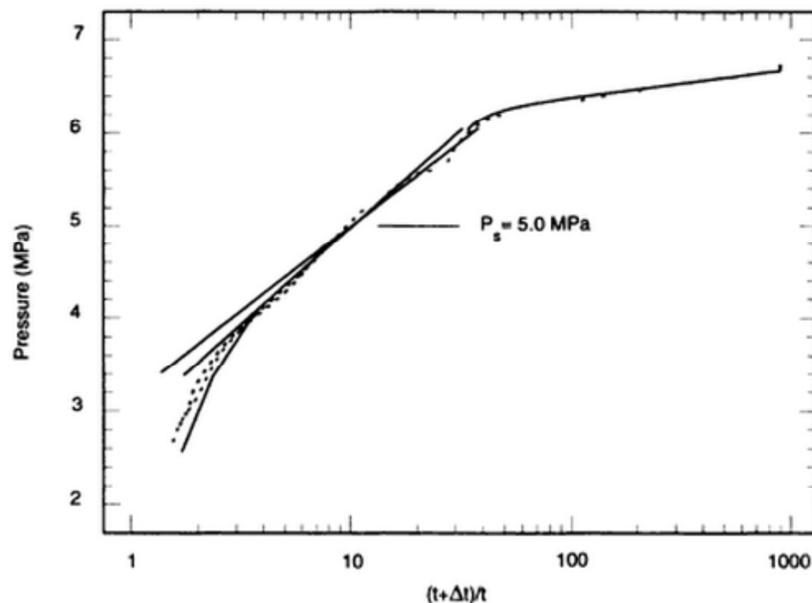


Figura 3-71. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de McLenan y Roegiers.

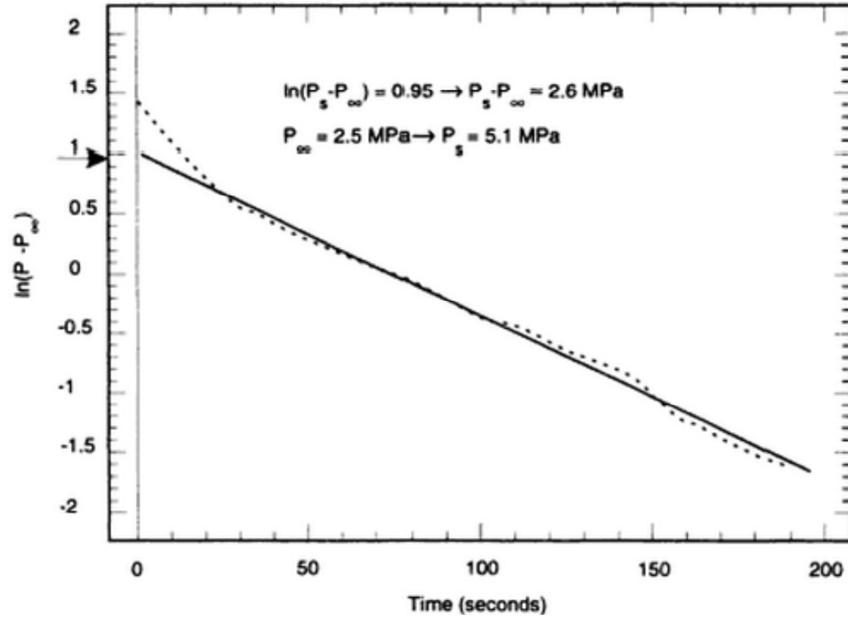


Figura 3-72. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de la curva de decaimiento exponencial.

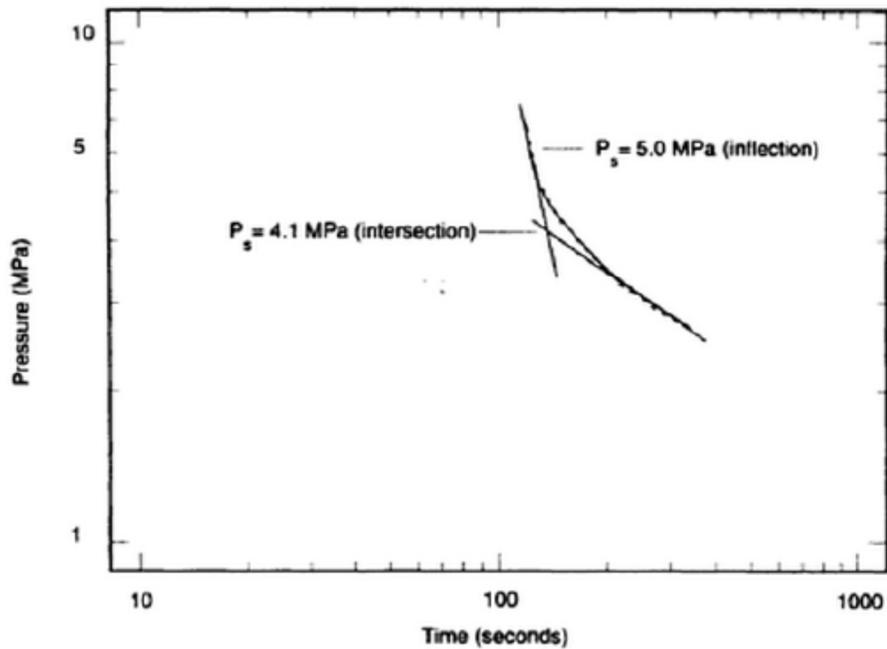


Figura 3-73. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de la curva Log (presión) vs. Log(tiempo).

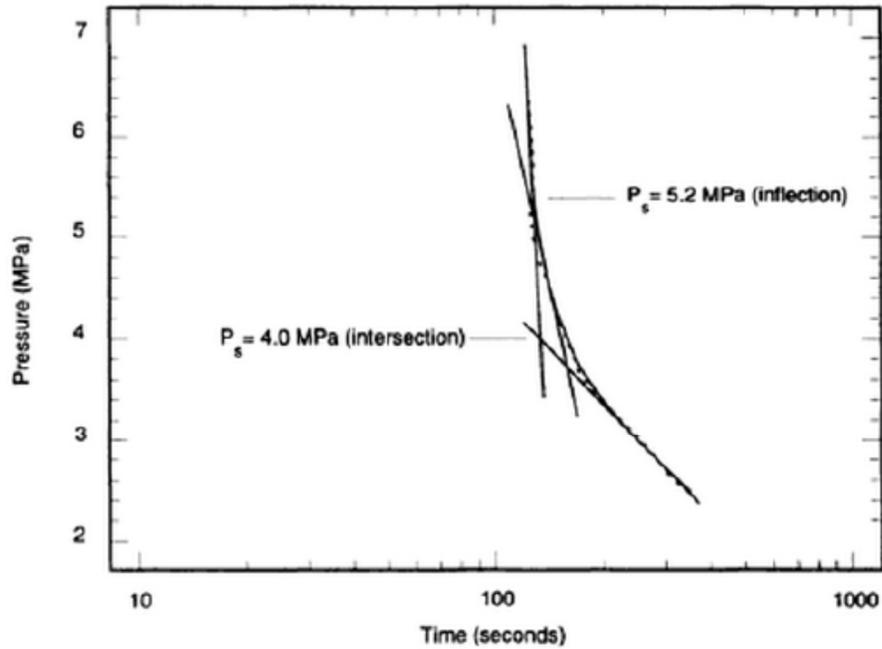


Figura 3-74. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de la curva de Presión vrs Log (tiempo).

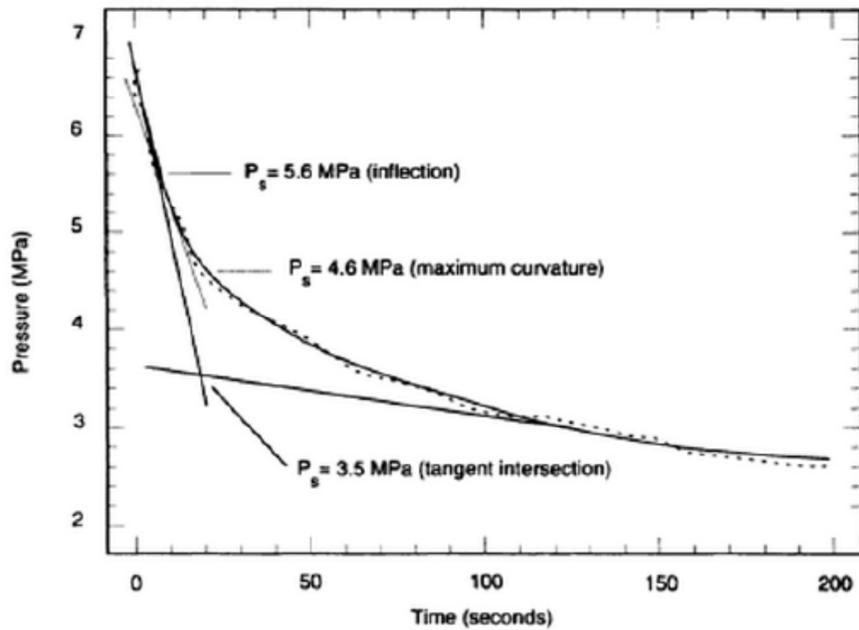
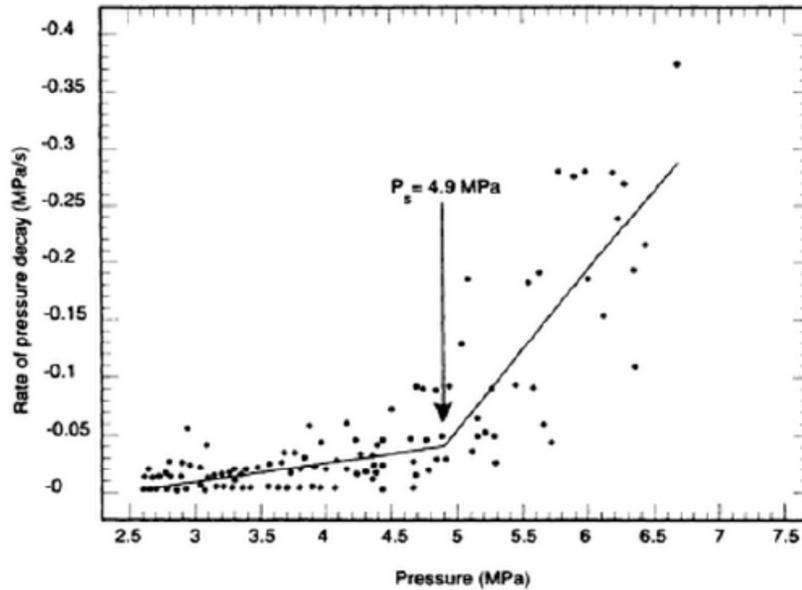


Figura 3-75. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método de la curva de Presión vs. Tiempo.



**Figura 3-76. Solución gráfica para encontrar la presión “Shut-in” por el método bilineal de tasa de decaimiento de presión.**

Es altamente recomendado usar al menos dos métodos independientes para obtener el crucial parámetro  $P_s$  o se pueden usar varios de los métodos y se realiza un desarrollo estadístico. Si los valores no coinciden, se debe realizar un estudio del procedimiento y del tipo de roca, el cual proporcionará más o menos una magnitud. Actualmente se utiliza más a menudo, el método bilineal de Trunbridge, de la tasa de decadencia de presión (Amadei y Stephansson, 1997).

### 3.7.10 Interpretación de resultados

La formulación depende si es para el método clásico o el método moderno (según lo señalado en la ISMR [11]):

- Método Clásico (Fractura Hidráulica)

Basado en la idea que la fractura se extiende en un plano perpendicular al esfuerzo principal menor, cuya magnitud es  $P_s$  (véase Figura 3-54):

El esfuerzo horizontal menor a la perforación es  $\sigma_h$ , igual a:

$$3-61 \quad \sigma_h = P_s$$

La dirección del  $\sigma_h$ , se obtiene directamente desde el azimut de la HF, entonces:

$\sigma_h$  dirección = dirección normal a la fractura hidráulica vertical.

El cálculo esfuerzo horizontal mayor a la perforación es  $\sigma_H$ , es basado en la suposición de la elasticidad lineal y en el efecto insignificante de la infiltración de un fluido en una fractura. Con la ausencia de fluidos en los poros del macizo rocoso, la magnitud del esfuerzo horizontal principal mayor es igual a:

$$3-62 \quad \sigma_H = T + 3\sigma_h - P_c$$

Donde  $T$  es la resistencia a tracción de la roca y  $P_c$  es la presión de inicio de fractura o "Breakdown".

Para rocas saturadas y de baja permeabilidad, en donde no hay percolación del fluido de fracturación en la formación antes de la apertura de la fractura, a menudo se supone que la presión de poros no se ve afectada por el estado de esfuerzos y que el concepto de los esfuerzos efectivos de Terzaghi se aplica a las rupturas de tracción. En este caso llegamos a la siguiente ecuación:

$$3-63 \quad \sigma_H - P_0 = T + 3(\sigma_h - P_0) - (P_c - P_0)$$

Entonces:

$$3-64 \quad \sigma_H = T + 3\sigma_h - P_c - P_0$$

Como se observa, según las fórmulas 3-62 y 3-64, para conocer el esfuerzo principal mayor en el plano horizontal a la perforación, se considere o no el efecto de la presión de poros, se debe obtener la resistencia a la tracción de la roca. Este valor se puede obtener de ensayar núcleos en el laboratorio, donde el ensayo más común es conocido como "el ensayo de tracción brasilero", pero este no simula correctamente el efecto de la fractura hidráulica, y su validez para este uso aún no ha sido establecida. Otra forma de llegar a la resistencia a la tracción es adoptando criterios de falla, como lo es el criterio de Hoek-Brown, realizando una extrapolación hasta donde corta esta curva con el eje de las abscisas. También se puede encontrar restando los valores de abertura inicial y de reapertura, lo cual tiene sentido según la teoría inherente al método, ya que al momento de la reapertura no se presentan esfuerzos de tensión, lo que justifica el descenso del pico en la gráfica Presión vs tiempo.

Cuando no se puede extraer un núcleo, o la magnitud de la tensión arroja valores desviados, o no se puede realizar el ensayo de laboratorio; se puede considerar otra alternativa, donde se usa la presión de reapertura ( $P_{c2}$ ) ya que la resistencia a la tensión allí no se encuentra presente:

$$3-65 \quad \sigma_H - P_0 = 3(\sigma_h - P_0) - (P_{c2} - P_0)$$

Entonces:

$$3-66 \quad \sigma_H = 3\sigma_h - P_{c2} - P_0$$

Esta ecuación es ampliamente usada, pero su confiabilidad se ve controvertida en los casos siguientes:

- La fractura no se cierra completamente luego del ciclo o la presión de poros no retoma su valor original.
- El valor de  $P_{c2}$  no ha sido identificado objetivamente sobre el registro presión-tiempo.
- Se bombea un volumen mayor comparado con el consumo requerido para una ligera abertura, donde el correcto valor de  $P_{c2}$  no es realmente identificado. De allí la necesidad de un personal calificado.

Luego, debido a la incertidumbre asociada con la estimación de la resistencia a tensión y la identificación de puntos sobre la curva, es de mayor complejidad el encontrar el esfuerzo horizontal mayor respecto al esfuerzo horizontal menor.

El esfuerzo vertical se asume cómo la sobrecarga, y si el plano de la fractura se registra perpendicular respecto al eje de perforación, este eje se encuentra paralelo al esfuerzo principal menor.

- Método Moderno (Reapertura Hidráulica)

Se debe parametrizar el campo de esfuerzos y definir una función con las desviaciones entre los datos visualizados y los computados (modelados). Se requiere de un mayor número de ensayos respecto al anterior, dado que en este método no se encuentran los esfuerzos mínimos, sino los esfuerzos normales requeridos para la apertura de las fracturas a considerar. Así, a pesar de que se oriente la perforación en un eje principal, la lectura de la presión no se hará sobre un plano perpendicular a este eje.

Se requiere de al menos seis parámetros para conocer el estado de esfuerzos en un punto. Luego, una completa determinación de los esfuerzos teóricamente requieren de al menos 6 ensayos, sobre la fractura, con diferentes orientaciones y buzamientos en búsqueda de resolver el sistema lineal provisto por:

$$3-67 \quad \sigma_n^m = \sigma(X_m)n_m n_m$$

Donde  $m$  refiere al número del ensayo,  $X_m$  es la localización del ensayo  $m$ ,  $\sigma_n^m$  refiere al esfuerzo normal soportado por la fractura con normal  $n_m$  y  $\sigma(X_m)$  es el tensor de esfuerzos en  $X_m$ .

Por cada ensayo completado se miden los valores del esfuerzo normal y el plano de orientación de la fractura.

Se pueden tener grandes distancias entre los ensayos por lo que se debe considerar un gradiente de esfuerzos. Se ha encontrado conveniente parametrizar asumiendo una

variación lineal a lo largo del eje de la perforación, donde los valores se encuentran con la siguiente función:

$$3-68 \quad \sigma(X_m) = \sigma(X_0) + (X_m - X_0) \propto$$

Siendo  $\propto$  el gradiente a lo largo de la perforación (en profundidad).

Dependiendo de lo que se asuma en el modelo teórico del ensayo, se requerirán entre 3 y 14 ensayos para determinar por completo el tensor de esfuerzos in-situ. La función de desviación define las diferencias entre los valores observados y los computados que determina el modelo de esfuerzos. La solución es definida para minimizar las discrepancias y adaptar de forma más cerrada los valores al modelo. La función envuelve los errores en los esfuerzos normales y en la orientación de los planos de falla.

Integrando HTPF con HF, se ve conveniente combinar los dos métodos, en especial cuando la perforación se hace de forma paralela a un esfuerzo principal. HF aportaría el valor del esfuerzo principal menor y su orientación, y HTPF ayudaría a encontrar la magnitud del esfuerzo horizontal mayor y las componentes del estado de esfuerzo vertical, sin requerir la consideración de presión de poros o de la resistencia a tracción. De esta forma un número mínimo de tres ensayos son requeridos para consideraciones de redundancia.

### 3.7.11 Aplicaciones y Ventajas del ensayo de fracturamiento hidráulico

- Es la única técnica viable, hasta el momento, que permite llegar a grandes profundidades (superiores a 1500m).
- En general la fractura hidráulica es muy utilizada en proyectos de construcciones subterráneas y proyectos de investigación sobre terremotos.
- Estudios para almacenamiento de residuos nucleares (depósitos subterráneos).
- Depósitos subterráneos de combustibles, tanto líquidos como gases.
- Diseño de túneles con flujo de agua p.e. hidroeléctricas.
- Inyecciones de restauración para el medio ambiente.

Además, el ensayo permite:

- Medir el estado de esfuerzos in situ, en el interior de un sondeo.

- Optimizar la longitud de revestimiento en blindajes en túneles a presión.
- Direccionar las estructuras adecuadamente.
- Evitar el fenómeno de la fractura hidráulica.

### 3.7.12 Comparaciones con otros métodos

Otros métodos que pueden sustituir a la fractura hidráulica son:

- Métodos de sobre-perforación (overcoring):

Mide los esfuerzos liberados al re-perforar, mediante el registro de las deformaciones producidas, donde se supone un material elástico he isotrópico. Este método requiere de ensayos de laboratorio para conocer el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de la roca, para relacionar deformaciones con esfuerzos mediante ecuaciones constitutivas y además tiene la complicación de la presencia de la perforación inicial, la cual perturba su estado de esfuerzos con respecto a su estado de esfuerzos inicial. Para determinar el estado de esfuerzos completo, se requieren dos o preferiblemente tres ensayos que no estén paralelos entre sí. El ensayo no se utiliza en grandes profundidades.

- *Métodos de presurización:*

Para el método de flatjack (gato plano) y con el eje x alineado perpendicular al flatjack, un componente normal (en este caso  $\sigma_{xx}$ ) puede ser determinado. Se entiende que, para determinar el estado completo de las tensiones, seis de las mediciones del flatjack se tienen que realizar a seis orientaciones diferentes.

Hay que tener en cuenta que, en general, los ejes de referencia no se alinean con la orientación del flatjack y se tendrán que utilizar transformaciones separadas para cada medición del flatjack, porque es la tensión normal perpendicular al plano del flatjack la que se está determinando, en lugar de un componente específico del tensor de esfuerzos. También debe tenerse en cuenta que esta técnica determina el tensor de tensiones en una pared de la excavación y por lo tanto determina la tensión inducida en lugar del esfuerzo de campo.

### 3.7.13 Suposiciones y limitaciones

El método para buscar el tensor total de esfuerzos es confiable para medios no porosos, continuos, elásticos, homogéneos e isotrópicos, lo cual deduce que se debe realizar sobre un tramo que no intercepto discontinuidades. Por esto, la formulación planteada

para este método es fuertemente cuestionada por la comunidad académica, donde se ha demostrado que no conducen a valores acertados.

Su implementación tiene problemas en rocas blandas, donde la roca presenta un comportamiento dúctil.

Las estimaciones de las pérdidas por velocidad del flujo y por las condiciones de la tubería son difíciles de estimar. Pero se puede superar si se instrumenta lo más cercano posible al tramo ensayado, y se suma la cabeza hidráulica desde donde se realiza el bombeo.

La precisión de los datos va de la mano con la calidad de los controles utilizados: válvulas, medidores, transductores. La limitación en rocas porosas o permeables se da por la capacidad de la bomba en inyectar flujo. De igual forma la capacidad en cuanto a la presión ejercida por la bomba limitaría en profundidad el ensayo, dado que se puede tener una mayor resistencia a un mayor confinamiento.

La dirección del sondeo debe coincidir con un eje principal. En el ensayo clásico, se supone dudosa la interpretación del ensayo, si el sondeo se desvía en más de 15° con respecto de la dirección del esfuerzo principal.

- Limitaciones para el ensayo clásico (HF)

El ensayo clásico no tiene un límite teórico en profundidad para las mediciones, sí se provee una perforación estable y se puede acceder a la zona de interés si la roca es elástica y rígida. El límite lo da la capacidad del equipo.

La interpretación clásica es posible si la orientación de la perforación es paralela a un esfuerzo principal. La fractura escalonada indica u horizontal indican una mala orientación. Una excesiva desviación invalida el método clásico, ya que se adoptaría la resistencia mínima horizontal y no la principal.

La dirección del esfuerzo principal se deriva de la delineada fractura que se traza en la pared de perforación y se asume que esta persiste en profundidad (radial a la excavación).

Evaluando el esfuerzo principal mayor en el plano perpendicular a la perforación, asume que la roca es linealmente elástica, homogénea e isotrópica. Esto envuelve consideraciones de efectos de presión de poros, difíciles de analizar, y requiere evaluar la resistencia a tensión de la roca.

- *Limitaciones para el ensayo moderno (HTPF):*

El ensayo moderno no tiene límite en profundidad, el límite lo da la capacidad del equipo.

Se asume un fracturamiento aislado o plano de debilidad, donde las fracturas no estén alineadas en un estrecho rango de dirección e inclinación, y que la fractura sea mecánicamente abierta con el ensayo hidráulico. Cuando el tramo contiene múltiples fracturas, es necesario verificar que sólo una fractura se abre, luego que la abertura de una fractura pre-existente cambia el campo de esfuerzos local.

En el ensayo moderno se asume que la orientación de la fractura persiste luego de la perforación.

Para el tensor completo, el método requiere de al menos seis ensayos, sobre la fractura preexistente y no paralela; pero un ensayo adicional es recomendado para corregir incertidumbres. Además, cuando se combina con el HF sólo se requieren de tres o cuatro resultados de HTPF para la determinación de los componentes del máximo esfuerzo vertical y horizontal.

Este método es válido para cualquier orientación. Es independiente de los efectos de presión de poros y no requiere de la determinación de propiedades del material.

Se asume que la roca es homogénea en el volumen de interés. Cuando la fractura ensayada se distancia de otra en más de 50m, una hipótesis de gradientes de esfuerzos es requerida.

- Limitaciones en la medición de las fracturas:

En cuanto al trazado de las fracturas, las membranas de impresión ofrecen problemas en perforaciones profundas y poco alineadas. La orientación magnética tiene problema cuando se trata con rocas magnéticas como el basalto, algunos gneises, entre otros.

Los métodos geofísicos son más costosos y el eléctrico presenta problemas en ambientes salinos y con propiedades eléctricas específicas. Se ha considerado una nueva forma de realizar el ensayo en grandes profundidades, que consiste en realizar el ensayo en un tramo pequeño y extraer mediante un diámetro más grande, el tramo ensayado.

En algunas circunstancias sólo se utilizará un obturador, donde se presenta una incertidumbre dada la concentración de esfuerzos en la base de la perforación.

### **3.7.14 Factor de seguridad contra el fracturamiento hidráulico en túneles con flujo de agua a presión**

Según Marulanda (2006) [14], para poder establecer el factor de seguridad contra el fenómeno de fracturamiento hidráulico, se requiere determinar el esfuerzo principal menor medido in-situ ( $\sigma_3$ ) en la masa de roca. La comparación entre el esfuerzo menor in-situ determinado en la medición, versus la presión hidráulica interna del túnel, define el

factor de seguridad contra fractura hidráulica en un lugar específico dentro del macizo. Utilizando esta metodología en varias perforaciones y a diferentes profundidades, es posible establecer con las pruebas un perfil mínimo de esfuerzos para optimizar la longitud de blindaje del acero o reubicar los conductos a presión. El factor de seguridad mínimo recomendado en la práctica internacional contra la fractura hidráulica en el diseño de túneles y/o conductores con flujo de agua a presión, con base en mediciones de fractura hidráulica es de 1,3.

### **3.7.15 Presentación de resultados en ensayos de fracturamiento hidráulico**

A continuación se muestran los requisitos mínimos para un informe completo y utilizable, según la norma ASTM D4645 – 08 [9]. Más detalles se pueden añadir en su caso, y el orden de los elementos puede cambiar si es necesario:

- **Introducción:**
  - ✓ El propósito de las pruebas; Ejemplo: son para el túnel o caverna de diseño, diseño de revestimiento de un túnel de presión, la caracterización del ambiente tectónico.
  - ✓ Los detalles de la ubicación del sitio, incluyendo un mapa (de preferencia topográfico) y la latitud y longitud.
  - ✓ Razones para la selección de la ubicación del sitio y el propósito de las pruebas.
  - ✓ Los detalles del sondeo de la prueba, tales como la inclinación del agujero, el diámetro, la profundidad, el método de perforación, la disponibilidad de núcleo, manto freático en el agujero y presiones de fluido inusuales en el agujero, si se sabe que existen.
  - ✓ Sitio de prueba geología, incluyendo un resumen de la geología regional y local, el tipo de roca o rocas encontradas en el sondeo de prueba, geología detallada en el intervalo de prueba e inmediatamente por encima y por debajo del intervalo de prueba, así como una descripción de las características geológicas generales de la estructura tales como fallas, diaclasas, plegamientos y el ambiente tectónico.
- **Método de prueba:**
  - ✓ Describir en detalle el equipo y el equipo de configuración que incluye un diagrama y la lista por nombre, número de modelo, las especificaciones básicas de cada pieza importante y la más reciente calibración.

- ✓ Describir en detalle el procedimiento efectivamente utilizado para la prueba que incluyen las tasas de flujo, número de ciclos de presurización y el volumen de líquido utilizado por ciclo. También incluir aquí el número de pruebas y la base para la selección de las profundidades de las pruebas específicas.
- ✓ Si el equipo o procedimiento real varía de los requisitos contenidos en este método de ensayo, observe cada variación, la razón para ello, y discutir el efecto sobre los resultados de las pruebas.
- Antecedentes teóricos:
  - ✓ Claramente presente y definir todas las ecuaciones utilizadas para reducir los datos. Tenga en cuenta los supuestos inherentes a las ecuaciones o limitaciones en sus aplicaciones y discutir el efecto sobre los resultados.
  - ✓ Discuta el grado en que las condiciones reales en el lugar de prueba se ajustan a los supuestos contenidos en las ecuaciones de reducción de datos. Explicar ampliamente los posibles factores o métodos aplicados a los datos para corregir una discrepancia en condiciones.
- Resultados:
  - ✓ Uso de los datos de presión – tiempo y flujo - tiempo, para la construcción de una tabla que contiene el número de prueba, la profundidad, la presión de poros, el número de ciclos y la respectiva presión de ruptura, la presión de reapertura de la fractura, la tasa de presión de cierre y flujo. Coloque una copia del registro original en el apéndice. Claramente explicar y justificar el método (s) utilizado para determinar las diferentes presiones necesarias para el cálculo del esfuerzo.
  - ✓ Utilice el registro de impresión de la fractura para construir una tabla que indica el número de la prueba, la profundidad y la inclinación de la fractura hidráulica y la dirección. Incluir en el Apéndice réplicas exactas de la impresión de la fractura del packer o impresión de fotografías del registro televiwer sónica (dependiendo del método utilizado).
  - ✓ Anote todos los esfuerzos verticales y horizontales principales y una tabla resumen que incluya el número de la prueba, la profundidad del ensayo, la presión de poros, presión de disgregación seleccionado o presión reapertura de la fractura, o ambos, la presión de cierre (shut-in, s) y la resistencia a la tracción (en su caso) , junto con el esfuerzo vertical calculado, el esfuerzo principal horizontal menor, el esfuerzo principal horizontal mayor y la dirección del esfuerzo horizontal más grande para cada prueba.

- ✓ Es recomendable presentar una gráfica de las magnitudes y direcciones de los esfuerzos principales.
- ✓ Otros tipos de análisis y presentaciones de datos pueden ser incluidos, tal como el estado de los esfuerzos en cada una de las formaciones rocosas sometidas al ensayos (si hay más de uno), la variación de los esfuerzos con la profundidad, la relación del estado medido de estrés a la estructura geológica local o regional, o ambos, incluyendo el tipo de fallas, la relación del esfuerzo medido en el plano de falla local o regional de terremotos, o ambos y otros.
- Error estimado:
  - ✓ Evaluar el error asociado a la incertidumbre de los dispositivos electrónicos y la correcta determinación de las diferentes presiones, como PC1, PC2 y Ps.
  - ✓ Calcular el efecto de los errores de medición que tienen en el esfuerzo calculado y el estado en los valores de presión absolutos o en porcentaje, o ambos, de las magnitudes de los esfuerzos que se presentan.
  - ✓ Se recomiendan que esto se realice en dos apéndices: uno que contiene todos los datos de campo recogidos durante el fracturamiento hidráulico, es decir, la presión - tiempo, de caudal – tiempo y la otra información que contiene la hidro delineación de la fractura en la pared del sondeo, incluida la orientación de la fractura con respecto al norte.

Según lo señalado en la ISMR [11] se puede prever que el informe de presentación de resultados debe enmarcar los siguientes aspectos:

- Introducción:
  - Definición del propósito del ensayo, donde se define el alcance y las estructuras ingenieriles con las cuales tiene relación.
  - Detalles del sitio, incluyendo acceso, topografía y localización en un mapa de la región.
  - Descripción geológica regional del sitio con su configuración tectónica y las estructuras esperadas en el macizo.
  - Razones de selección del sitio, partiendo del propósito planteado.
  - Litología de la perforación, incluyendo los tipos de rocas y las estructuras encontradas.
  - Diámetro y longitud de la perforación (perfil de la perforación).

- Número y profundidades seleccionadas para ensayar, en base a registro de imágenes de núcleos o técnicas geofísicas.
- Método del ensayo:
  - Configuración del equipo, incluyendo diagramas, especificaciones y su última calibración.
  - Procedimiento del ensayo, incluyendo el número y la duración de los ciclos de presión, caudal por ciclo.
  - Registro de desviaciones o inconvenientes percibidos durante el ensayo.
- Bases teóricas:
  - Lista de ecuaciones utilizadas para encontrar el estado de esfuerzos.
  - Comentarios sobre lo que se asume de forma inherente a la teoría y su interpretación con la perforación.
  - En caso de diferencias entre lo asumido y lo encontrado en el sitio, explicar las correcciones que se deben realizar.
  - Explicación sobre el método asumido para evaluar los resultados, donde las incertidumbres deben ser especificadas.
- Los resultados:
  - Gráfica de la presión en el tramo vs tiempo, tasa de flujo vs tiempo para cada ensayo.
  - Imágenes trazadas en las membranas de impresión donde se indique correctamente la orientación de la fractura.
  - Representación gráfica de las diferentes técnicas donde se encontraron las magnitudes correctas de la presión de reapertura y SHUT-IN, desde los datos
  - presión-tiempo (por más de un método).
  - Tabular las presiones identificadas: presión de poros, Breakdown, Shut-in y de reapertura de fractura para cada ensayo.
  - Tabular la orientación de las fracturas inducidas o pre-existentes por cada ensayo realizado.

- Graficar las magnitudes y direcciones de los esfuerzos principales para diferentes localizaciones.
- Discusión de resultados:
  - Discusión sobre las incertidumbres contempladas relacionadas con las presiones críticas, la orientación de las fracturas y los resultados de la evaluación de esfuerzos.
  - Discusión sobre la implicación de la heterogeneidad y discontinuidad sobre la dispersión de los resultados.
  - Discusión sobre la validez de las hipótesis y las consideraciones en el modelo teórico. Dado el caso de presentarse diferencias, justificar e identificar el error.

## **4. ASPECTOS QUE INTERFIEREN EN LA INTERPRETACIÓN**

### **4.1 Permeabilidad y macizos rocosos fracturados**

La interpretación de la curva de presión versus velocidad de flujo en ensayos realizados a macizos de roca permeables, puede presentar alguna dificultad debido a diferentes aspectos que se enumeran a continuación (Marulanda, Gutierrez y Vallejo 1990, [20]):

1. La permeabilidad del macizo rocoso influye en la determinación de la presión crítica o presión a la cual las discontinuidades de cierran, debido al alto caudal de presión y a la pérdida de fluido. Es probable que existan pequeños bloques o material de llenado entre fisuras que se está moviendo hacia los canales del flujo, lo que resultaría en una discontinuidad que este siempre abierta alrededor del macizo rocoso. Este fenómeno puede producir una caída de presión abrupta lo cual dificultaría la obtención de los parámetros del ensayo.
2. La capacidad de bombeo en ciertas ocasiones no es suficiente para sobrellevar las pérdidas de fluido debido a la permeabilidad. Algunas veces es conveniente inyectar lechada al macizo rocoso, antes de la realización del ensayo, para así disminuir la permeabilidad y reducir el bombeo necesario para el ensayo.
3. En macizos de roca muy permeables la presión de inyección debe ser monitoreada en el sitio del ensayo y no en la superficie. Esto debido a que la presión desde el momento en que se comienza a inyectar en la superficie hasta que llega al sitio del ensayo, tiene pérdidas sustanciales en su presión hidráulica. Lo ideal es tener el transductor de presión abajo en la perforación, cerca al sitio del ensayo.

### **4.2 Macizos rocosos impermeables o poco fracturados**

Para macizos rocosos impermeables o poco fracturados con un nivel de esfuerzo mínimo, el equipo para realizar el ensayo debe ser capaz de gravar con precisión y efectividad la presión y el caudal durante la ejecución del ensayo. Si la placa del orificio del medidor de flujo se va a utilizar en tales condiciones, estas deben ser cuidadosamente definidas, ya que la medición depende en gran medida del coeficiente de pérdida e indirectamente en las propiedades de los fluidos, tales como la viscosidad y la temperatura. Por consiguiente las mediciones pueden llegar a estar alteradas. Por tal motivo, es recomendable (Marulanda, Gutierrez y Vallejo 1990, [20]), utilizar equipos con turbinas de flujo o medidores de flujo ultrasónicos.

### 4.3 Transporte hidráulico en las rocas

- Ley de Darcy

Las propiedades de transporte de fluidos de una roca dependen de la interconexión entre los espacios vacíos en la roca. La deformación del espacio poroso, el cierre o la creación de microfisuras o deposición de partículas pueden influir en las propiedades de transporte. Estos efectos se pueden estudiar mediante el monitoreo de la permeabilidad en los fluidos y su conductividad eléctrica.

La permeabilidad se puede determinar observando el transporte de agua como fluido de poros a través del espacio vacío de una muestra de roca. Se utilizan tres métodos de medición: 1. Para un caudal dado, la caída de presión de poros sobre la muestra se mide en condiciones de estado estacionario, es decir, velocidad de flujo constante y la presión diferencial constante [Bear 1988]. 2. Se analiza la respuesta de la presión de poros transitoria de una roca a un cambio de presión de poros repentina. 3. Se evalúa la respuesta de la presión de poros de una roca en función de la presión oscilante [Fischer 1992]. A continuación, se explicará el método de estado estacionario.

Bajo la compresión triaxial, en general, existe una correlación positiva entre los cambios en el espacio de poros y la permeabilidad, esta se observa debido al cierre de las microfisuras o deformación elástica del espacio poroso [Paterson y Wong 2005]. Con la aparición de la dilatancia, se invierte la tendencia y el aumento de la permeabilidad con el espacio de los poros recién creado. La creación de espacio de poros se correlaciona con un aumento en la actividad de emisiones acústicas. En roca porosa, estas correlaciones no están tan bien definidas. Zhu y Wong [1997] presentaron datos de muestras porosas de arenisca que muestran una disminución de la permeabilidad con el inicio de la dilatancia. Heiland y Raab [2001] han demostrado que una piedra arenisca Flechtingen bien consolidada bajo condiciones de prueba triaxial tiene una disminución de la permeabilidad antes y después de un aumento del punto de fluencia.

Para velocidades de flujo bajas, la relación entre el vector de velocidad de flujo  $Q$  y la presión de poro  $P_p$  en el caso anisotrópico en general viene dada por la ley de Darcy [Darcy 1856]:

$$4-1 \quad q = \frac{k}{\eta} \nabla (P_p - \rho_f g x)$$

Donde  $k$  es el tensor de permeabilidad de segundo orden,  $\eta$  es la viscosidad del fluido dinámico y el término  $\{\rho_f g x\}$  representa la fuerza gravitacional del fluido;  $\rho_f$  indica la densidad del fluido [Bear 1988]. Suponiendo un sistema de coordenadas principal con  $x' = \{x', y', z'\}$  para el tensor de permeabilidad y descuidando las fuerzas gravitatorias, la ley de Darcy se puede reescribir en forma escalar:

$$4-2 \quad q_{x'} = -\frac{k_{x'y'}}{\eta} \frac{\delta P_P}{\delta x'}$$

$$4-3 \quad q_{y'} = -\frac{k_{y'z'}}{\eta} \frac{\delta P_P}{\delta y'}$$

$$4-4 \quad q_{z'} = -\frac{k_{z'z'}}{\eta} \frac{\delta P_P}{\delta z'}$$

Bajo el supuesto de que el vector de velocidad de flujo depende sólo de la gradiente de presión en una dirección, que es generalmente el caso en experimentos de laboratorio, la ley de Darcy se puede emplear para el cálculo de la permeabilidad con esta fórmula:

$$4-5 \quad k = \eta \frac{Q}{A_S \Delta P_P} \frac{\Delta l}{\Delta P_P}$$

Donde  $Q$  es el caudal,  $A_S$  es el área de la sección transversal de la muestra de roca y el cociente diferencial de la presión de poro se sustituye mediante cociente de diferencias  $\Delta P_P / \Delta L$ . La permeabilidad se expresa en  $m^2$  en unidades del S.I., pero muy frecuentemente la unidad de Darcy (D) se utiliza, en donde 1 es igual a  $0,987 \text{ Darcy } 10^{12} m^2$ . Los siguientes supuestos se han de cumplir para la validez de la ley de Darcy:

1. Las fuerzas de inercia se pueden despreciar.
2. Condiciones de flujo en estado estable son válidas.
3. El medio es isotrópico y totalmente saturado con un fluido de fase única.
4. El fluido son homogéneo y contiene sólo una fase.

En rocas sedimentarias fracturadas, dos direcciones principales de la permeabilidad pueden encontrarse en los planos de estratificación y el tercero es perpendicular a los planos de estratificación. Típicamente, la permeabilidad en los planos de estratificación es más grande que la normal a ellos. En rocas (duras) fracturadas las direcciones principales del tensor de permeabilidad coinciden con la dirección de los conjuntos de fracturas.

- Flujo de No-Darcy

Según Basak [1977], el flujo a través de medios porosos se puede clasificar en tres zonas de flujo diferentes, dependiendo de la velocidad del fluido local dentro del espacio vacío. Las zonas de flujo se conocen como:

- Zona de pre-Darcy donde el aumento de la velocidad de flujo es desproporcionadamente alto en comparación con el aumento de gradiente de presión.
- La zona de Darcy donde el flujo es laminar y la ley de Darcy es válida.

- Y la zona de post-Darcy donde el aumento de la velocidad del flujo es menos proporcional al aumento del gradiente de presión (comparar la Figura 4-1). La transición entre estas zonas de flujo es suave.

Estas diferentes zonas de flujo se pueden caracterizar usando números de Reynolds [Bear 1988]:

$$4-6 \quad Re = \frac{\rho_f V_o d_o}{\eta}$$

Donde  $V_o$  es la velocidad de flujo característico y  $d_o$  el recorrido libre medio.

Los valores típicos para el número de Reynolds se dan en la Tabla 4-1 [Fand et al. 1987].

Límites para los regímenes de flujo. Fand et al. [1987] definir los regímenes de flujo por los límites superior e inferior de número de Reynolds.

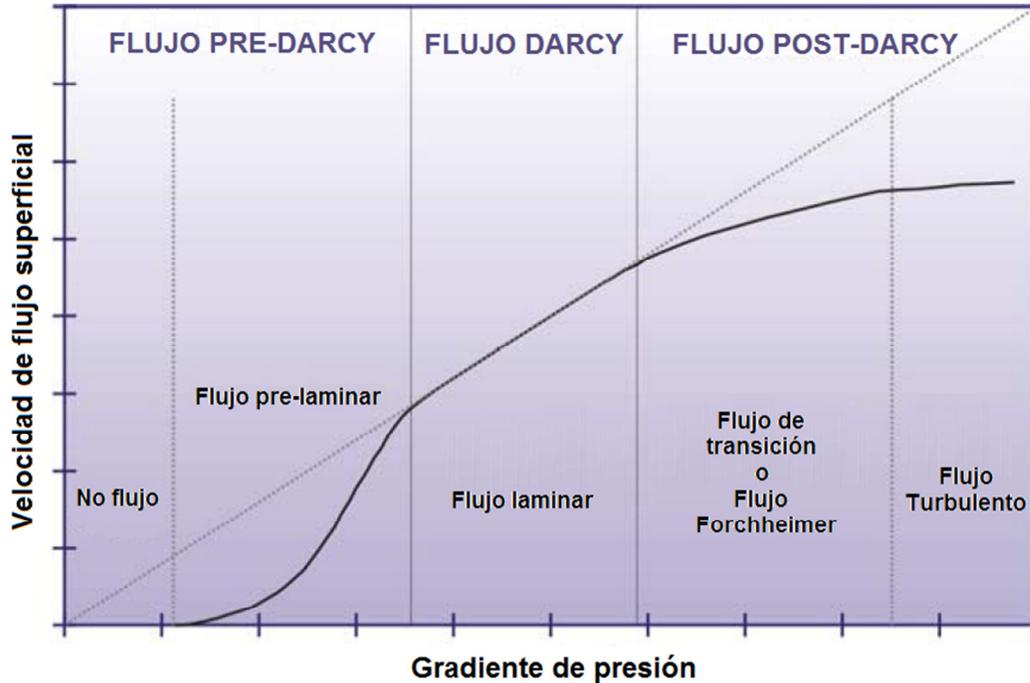
**Tabla 4-1. Límites para los regímenes de flujo. Fand et al. [1987] definir los regímenes de flujo por los límites superior e inferior de número de Reynolds.**

ZONA	REGIMEN DE FLUJO	NÚMERO DE REYNOLDS
Pre-Darcy	Sin flujo	Re<10-5
	Flujo prelaminar	
Darcy	Flujo laminar	10-5<Re<2,3
Post-Darcy	Flujo Forchheimer	5<Re<80
	Flujo turbulento	120<Re

Una explicación razonable de por qué el flujo no sigue la ley de Darcy para gradientes de presión muy pequeñas, puede ser dada por la teoría de capa límite [Schlichting 1968]. Esto debido a las fuertes interacciones de sólidos y líquidos, las fuerzas viscosas en las interfaces de cuello son mucho más fuerte que en el centro de los cuellos de poros. Con la disminución del gradiente de presión, el espesor de esta capa límite aumenta. Los radios de gargantas de poros, por ejemplo, en areniscas estrechas pueden ser pequeños con radios menores de 100 nm. En la misma roca, los radios más grandes de cuello de poros pueden ser ~ 10.000 nm. Como resultado, el agua sólo puede fluir a través de, los 100-veces más grande, cuellos de poros, siempre y cuando los pequeños cuellos de poros estén bloqueados por la capa límite [Wu et al. 2008]. Con el aumento del gradiente de presión (por ejemplo, tasa de flujo más alta), los poros pequeños empiezan a tomar parte en el transporte de flujo que conduce a un aumento de la permeabilidad. En la zona de Post-Darcy (altas tasas de flujo), las fuerzas inerciales comienzan a controlar la velocidad de flujo y el campo de flujo no es laminar.

Traducido a la escala de un yacimiento, los regímenes de flujo se pueden encontrar en el campo cercano y el campo lejano alrededor de la perforación y de la fractura hidráulica, respectivamente. Los regímenes de flujo que se presentan en la Figura 4-1, pueden tener

una influencia considerable en el transporte de fluidos en un depósito. Cerca de y dentro de la boca de la perforación, el flujo de fractura puede ser turbulento. En los alrededores del pozo o de la fractura, el gradiente de presión cumple con la ley de Darcy. En distancia suficiente desde la perforación o fractura, el gradiente de presión disminuye potencialmente por debajo del umbral pre-Darcy y la permeabilidad disminuye también.



**Figura 4-1. Flujo en zonas de medios porosos. El flujo a través de medios porosos se puede clasificar en tres zonas de flujo diferentes, dependiendo de la velocidad del fluido local dentro del espacio de los poros [Basak 1977].**

Fuente: REINICKE, A.[21].

- La ecuación Forchheimer y la corrección del flujo No-Darcy

Cuando la velocidad de flujo es demasiado alta y los efectos inerciales empiezan a controlar el flujo, la ley de Darcy ya no es aplicable. Por lo tanto, Forchheimer [1901] agregó un término no Darcy  $\{\rho_f V^2\}$  a la ley de Darcy que encierra el flujo de la velocidad  $V$ :

$$4-7 \quad \nabla P_p = \frac{\eta}{k} V + \beta \rho_f V^2$$

Donde  $\beta$  es el número Forchheimer. Con respecto a los montajes de laboratorio, la ecuación 4-7, se reformula para el caso donde se incorpora la velocidad del flujo superficial del fluido  $V_d = Q/A_s$ :

$$4-8 \quad \frac{\Delta P_p}{\Delta l} = \frac{\eta}{k} V_d + \beta \rho_f V_d^2$$

La ecuación de Forchheimer se puede utilizar para corregir las permeabilidades aparentes medidas  $k_a$  en pruebas con altas velocidades de flujo. La ecuación 4-8, se combina con la ecuación 4-5, resultando en:

$$4-9 \quad \frac{1}{k_a} = \frac{1}{k} + \beta \frac{\rho_f V_D}{\eta}$$

Bear [1988] o Whitaker [1996] afirman que la interrelación no lineal entre la velocidad de flujo y la caída de presión por encima de la zona de flujo de Darcy no es debido a la turbulencia, pero sí debido a los efectos inerciales.

La turbulencia es iniciada en el campo de flujo no antes de un  $Re > 120$ . En esta fase, la alta velocidad de flujo genera remolinos, que toman energía del campo de flujo principal.

El flujo en un medio rocoso no necesariamente es dominado por la ley de Darcy, ya que dependiendo de la ubicación del flujo del fluido, este puede ser pre-laminar, de transición y turbulento.

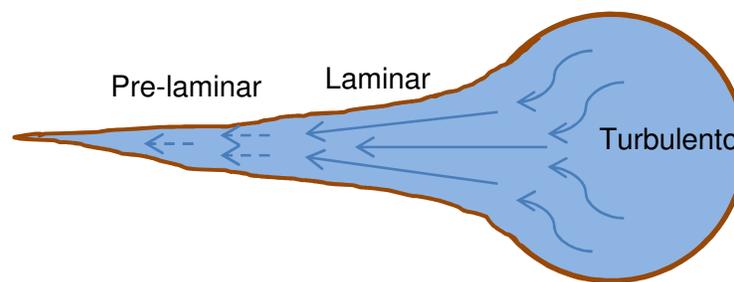


Figura 4-2. Flujo en zonas de la perforación.

## 4.4 Influencia de la inelasticidad

El comportamiento elástico y/o inelástico no lineal, tal como la microfisuración o vacío en las uniones, se produce en la zona de la evolución de la fractura, esto debido a la significativa concentración de esfuerzos cerca de la región de la punta. En la fractura elástica lineal (LEFM, por sus siglas en inglés), el análisis de la intensidad de las tensiones como un criterio de propagación, generalmente requiere que la zona de propagación sea pequeña en comparación con las dimensiones de la fractura y la muestra. La influencia probable de la discrepancia, como la alta presión de la malla observada, ha sido estudiado por muchos investigadores (por ejemplo, Shlyapobersky et al, 1988; Palmer & Veatch, 1990; Gardner, 1992). Cuando estos efectos se hacen grandes, un método alternativo basado en análisis de energía (por ejemplo, McClintock y Irwin, 1965; Rice, 1968a, 1968b) necesita ser utilizado.

De Pater et al. (1994) realizó pruebas de laboratorio sobre la propagación de las fracturas en bloques de cemento, en donde dominaron los mecanismo de falla frágil - elástico. Los

resultados de las pruebas coincidieron con las simulaciones numéricas basadas en un modelo elástico. Van Dam et al. (2002) examinaron las pruebas de diferentes rocas, la diatomita y yeso blando, en comparación con el cemento. Se encontró que el nivel de plasticidad se determina con la fragilidad de la roca, en lugar de la fuerza. El cemento y la diatomita fueron consistentes con el modelo elástico, aunque la diatomita era muy débil, pero en ensayos de tracción realizados, la diatomita se rompió de una manera frágil. El yeso blando era muy dúctil en ensayos de tracción y extensión triaxial y mostró desviaciones significativas de un comportamiento elástico en ensayos de fractura hidráulica. Una gran deformación plástica en un ensayo de tracción o de extensión parece ser un buen indicador de la importancia de la plasticidad. El mecanismo de la aparición de la plasticidad se resume (Van Dam et al., 2002) como sigue. La roca se caracteriza por una resistencia a la tracción muy baja en comparación con su resistencia a la compresión. A menudo, la fracturación en la tracción prevalecerá si la roca se ha cargado hasta la ruptura. Esto también se espera para las fracturas de líquido inyectado, en el que las altas presiones de fluido darán lugar a una cabeza de carga extensible por delante de la punta de la fractura. Hacia adelante de la grieta, los esfuerzos se van a cero, pero en algún desplazamiento desde el plano de fractura, el esfuerzo disminuye fuertemente en la dirección perpendicular al plano de fractura, mientras que la tensión a lo largo será mucho más alta. Esta carga induce al cizallamiento de la roca. La propagación de la fractura, dependiendo las propiedades del material, es esperada al crear deformación plástica alrededor de la punta de la fractura.

En la roca, especialmente con alta plasticidad, tal como la piedra arenisca débil o lutita, arcilla, es menos probable que la zona plástica sea lo suficientemente pequeña como para justificar el modelo elástico. Entonces se requiere una descripción apropiada de la irreversible deformación. Papanastasiou y Thiercelin (1993) y Papanastasiou (1997, 1999) hicieron simulaciones numéricas utilizando la teoría de la plasticidad e investigaron las posibles influencias en el proceso, tal como fue revisado más adelante. Cuando la fractura se propaga, las zonas plásticas se descargan elásticamente detrás de la grieta de avance y la nueva zona cerca de la punta se deforma plásticamente. En resumen, el control de la masa de roca de la fractura puede deformarse elásticamente, mientras que la región cerca del cuerpo de la fractura puede deformarse plásticamente y, finalmente, se descarga elásticamente después de que la fractura haya avanzado. La plastificación se lleva a cabo en el área cerca de la punta, que se caracteriza por una alta concentración de tensión. Las zonas plásticas tienen forma de los llamados 'orejas de conejo'. El tamaño está influenciado por el contraste de la magnitud de las tensiones de campo lejanas, la fuerza de la roca, el módulo de Young efectivo, la viscosidad del fluido de fracturación, y la velocidad de propagación. En general se reconoce que la presencia de material producido alrededor de la punta, tiene el efecto de proyección de las cargas remotas que reduce el nivel de intensidad de la tensión. Por lo tanto, la plastificación cerca de la punta de una fractura que se propaga, proporciona un blindaje efectivo. Idénticos resultados fueron observados por Van Dam et al. (2002) en sus pruebas de laboratorio y simulaciones numéricas. Ellos señalan lo importante del efecto que la

plasticidad, en el blindaje de la carga de líquido de la punta de la fractura. Una carga más fuerte (más cerca de la punta) fue presentada durante la propagación. Esto implicaba una importante influencia en la geometría de la fractura, es decir, el perfil de la anchura y la fractura creada es más ancha y más corta para un cierto volumen de inyección. Sin embargo, la carga más fuerte cerca de la punta, no necesariamente causa alta presión de inyección. Van Dam et al. (2002), incluso observó una presión de inyección más pequeña con respecto a la predicción del modelo elástico. Una razón obvia era el gradiente más pequeño en el cuerpo de la fractura debido a la anchura más grande.

Además de la posible influencia de la alta presión de la punta, las presiones netas aparentemente altas también pueden ser explicadas por la subestimación del módulo de la roca. El valor (especialmente en roca blanda) puede ser subestimada por un factor de dos a tres (Van Dam et al., 2002). En aplicaciones de campo otras posibles razones podrían ser que el comportamiento de la roca puede regirse por la anisotropía, las heterogeneidades a gran escala y las fracturas naturales (De Pater et al., 1994).

## 4.5 Retraso del fluido

Retraso en el fluido, significa que en el frente del fluido de fracturamiento, no llega a la punta de la fractura. Este fenómeno se observa a menudo en roca competente. Esto influye en el perfil de presión del fluido y el ancho del perfil. El retraso es usualmente considerado como la formación de presión de poros por los materiales permeables, o como la presión de vapor del fluido de fracturación en formaciones de baja permeabilidad, dejando de lado la tensión interfacial. La apertura más amplia de fracturas en materiales plásticos incide en tener una longitud más corta de retraso del fluido (Papanastasiou y Thiercelin , 1993), Y también se traduce en una gota más afilada del fluido de presión cerca a la punta, esto en contraste con el retraso significativo y una gota más suave en la solución elástica (Papanastasiou , 1997) . También se encuentra (Desroches et al., 1993) que, en simulaciones numéricas, el tamaño del desfase de fluido es una función de la resistencia a la fractura, es decir, cuanto mayor sea el valor de la tenacidad a la fractura, menor será el tamaño del desfase de fluido. Si la resistencia a la fractura es lo suficientemente alta, el retraso parece desvanecerse. El retardo de fluido es por lo general un mecanismo local (cerca de la punta), que no afecta significativamente la respuesta global de la fractura.

## 4.6 Influencia de la dilatancia

La dilatancia se asocia con la aparición de deformación plástica debido a la fricción deslizante, ya sea a lo largo de partículas o micro grietas, de modo que tome efecto, junto con la influencia plástica. Papanastasiou y Thiercelin (1993) estudiaron sistemáticamente el efecto de dilatancia y encontraron que cuanto mayor es la dilatación, mayor es el tamaño de las zonas plásticas y más amplia eran las aberturas. Las

aberturas más amplias dieron lugar a un retraso menor del fluido que el de la fractura elástica. Van Dam et al. (2002) también encontraron que la dilatación llevó a un aumento del ancho de la fractura en la punta. Estos resultados contradicen la hipótesis de la así llamada dilatación. Era anteriormente asumido que la dilatación de la roca suprimía la anchura en la región de retraso de fluido, provocando de este modo un mayor retraso de fluido.

## 4.7 Rugosidad

Las superficies de las fracturas hidráulicas en general, no son suaves, al contrario, muestran rugosidad. La rugosidad de la fractura se tiende a descuidar en muchos modelos de fracturamiento hidráulico. Mientras que esto puede ser correcto en algunas situaciones, hay casos en los que la rugosidad de la superficie de las fracturas es un factor importante.

La superficie rugosa de una fractura influye en el comportamiento mecánico y la conductividad de las mismas. La rugosidad de la superficie de una fractura, enfrentada con otra superficie rugosa pero un poco desplazada entre el uno y el otro, provoca el cierre imperfecto debido a que las superficies no coinciden. Esto conlleva a un espacio residual después del cierre. Este espacio residual conduce a una conductividad de la fractura que puede ser lo suficientemente grande para que los volúmenes de inyección se puedan reducir significativamente.

Otro efecto en que la rugosidad afecta el ensayo de fracturamiento hidráulico, es que puede aumentar el gradiente de presión del fluido en la fractura, cuando la amplitud de la rugosidad es del mismo orden de la magnitud del ancho promedio de la fractura. Por otra parte, la presencia de un espacio residual significativo influye en la presión de la perforación durante la reapertura de una fractura hidráulica.

La rugosidad de la fractura refleja el proceso de fractura, por lo que la comprensión de la rugosidad de las fracturas hidráulicas se relaciona con la comprensión del proceso de fracturación en el pico de la fractura hidráulica.

## 4.1 Efectos térmicos [13]

Una fractura térmicamente inducida se puede observar durante la inyección del agua, especialmente cuando hay una diferencia considerable en la temperatura del agua (fría) y el macizo (caliente). La respuesta típica en estos casos es el repentino aumento en la inyección después de un cierto periodo de estabilidad en la inyección. Esto refleja que la roca ha sido gradualmente enfriada durante la inyección del agua fría. El macizo rocoso se encoje debido al enfriamiento y eventualmente el esfuerzo menor in-situ, es reducido a un nivel por debajo de la presión de inyección del sondeo. El resultado de este proceso es el de la creación de una fractura que provee una mayor área de contacto con la

formación y por consiguiente un incremento dramático en la inyección. La longitud de la fractura está limitada a la extensión de la zona enfriada. Este proceso es normalmente referenciado como una fractura térmicamente inducida.

En un comienzo con la inyección con agua fría, este efecto, era considerado inesperado y no deseado. Pero actualmente este efecto es tenido en cuenta en el proceso del ensayo y es utilizado activamente. Para tal efecto hay que tener en cuenta la localización del sondeo, la capacidad de la bomba, el patrón desplazamiento de desplazamiento del fluido, etc.

Este proceso difiere del modelo de fracturamiento hidráulico, en cuanto a la viscosidad del fluido, la escala de tiempo del proceso, los cambios en la presión de inyección que afectan a la presión de poros, los daños en la formación debido a las partículas de agua, la heterogeneidad de la formación, la variación de las propiedades del fluido, la interacción con el sondeo etc.

Perkins y Gonzales (1984), expusieron una expresión analítica en el cambio del esfuerzo resultante desde un cilindro de determinada altura que es enfriado. En el límite de una pequeña relación del diámetro a la altura ( $d/h \rightarrow 0$ ), se encontró expresión mostrada en la ecuación 4-10.

$$4-10 \quad \Delta\sigma_r(\Delta T) = \Delta\sigma_\theta(\Delta T) = \frac{E}{2(1-\nu)} \alpha_T (T_{frio} - T_0)$$

Donde  $T_0$  representa la temperatura de la formación y  $T_{frio}$  es la temperatura de la región enfriada.

Para el caso límite opuesto ( $d/h \rightarrow \infty$ ), donde es aplicable la situación después de algún tiempo, cuando la región enfriada ha crecido considerablemente en el macizo, se llega a la ecuación 4-11.

$$4-11 \quad \Delta\sigma_r(\Delta T) = \Delta\sigma_\theta(\Delta T) = \frac{E}{1-\nu} \alpha_T (T_{frio} - T_0)$$

Estas expresiones demuestran que el esfuerzo es reducido considerablemente al ser enfriado el líquido de inyección, por consiguiente facilita el crecimiento de la fractura. Adicionalmente dependiendo del aspecto del radio de la elipse, la orientación del campo de esfuerzos puede ser alterado, ya que inicialmente la reducción del esfuerzo horizontal mayor, va a ser más grande, que la reducción inicial del esfuerzo horizontal menor. Perkins y Gonzales sugirieron que la dirección del esfuerzo principal puede invertirse, llevando a una posible generación de fracturas ortogonales a las iniciales.

El cambio en la presión de poros, también afecta los esfuerzos del macizo. De la relación entre la termoelasticidad y la poro-elasticidad, se llega a las ecuaciones 4-12 y 4-13.

$$4-12 \quad \Delta p_f \leftrightarrow \Delta T$$

$$4-13 \quad (1 - 2\nu)\alpha \leftrightarrow E\alpha_T$$

Durante la inyección de un fluido caliente o frío, el transporte del calor es principalmente por convección. Adicionalmente, la conducción térmica desde o hacia una formación rocosa, contribuye en la dirección del movimiento del fluido. La posición del frente se puede estimar desde las consideraciones del balance de energías. Para inyecciones radialmente simétricas, el patrón de la inyección se puede expresar en la ecuación 4-14.

$$4-14 \quad \frac{R_{frío}}{R_{flujo}} = \sqrt{\frac{\phi p_w C_w}{(1-\phi)p_s C_s + \phi p_w C_w}}$$

Donde  $R_{frío}$  es el radio de la zona fría,  $R_{flujo}$  es el radio de la zona de flujo,  $p_w$  y  $C_w$  son las densidades específicas de la capacidad de calor del fluido de inyección y finalmente,  $p_s$  y  $C_s$  se aplican al macizo rocoso.

## **5. RECREACIONES O SIMULACIONES DE ENSAYOS DE FRACTURAMIENTO HIDRAULICO EN EL LABORATORIO**

Existen diversas recreaciones del ensayo de fracturamiento hidráulico a escala en laboratorio en todo el mundo. En el presente capítulo se mostrarán los diferentes equipos y metodologías, que son más acordes a ejecutar el ensayo de fracturamiento hidráulico en el laboratorio.

### **5.1 FRACTURAS HIDRAULICAS EN ARENA DE CONTENCIÓN**

#### **5.1.1 Introducción**

Esta investigación tuvo como objetivo capturar la física básica del proceso de iniciación y propagación de la fractura hidráulica en materiales blandos y de alta permeabilidad, y promover la contención de la fractura en muestras estratificadas.

Una serie de ensayos con modelos de laboratorio se llevan a cabo en primer lugar usando muestras de arena. La arena se eligió como un caso extremo de materiales altamente permeables. Las pruebas se realizaron en diversos esfuerzos de confinamiento, los cuales son comparables con las condiciones in situ. Luego se investigó el mecanismo de fracturación hidráulica, el cual incluyó la presión de inyección, la geometría de la fractura, la característica de su propagación y la presión de cierre.

Por lo general, la geometría de la fractura no puede ser observada directamente, ya sea en aplicaciones de campo o las pruebas de laboratorio. La medición acústica de la geometría de la roca durante la inyección, ha sido muy exitosa, pero esto es difícil de aplicar con materiales blandos. La mayoría de inspecciones visuales en pruebas de laboratorio, se realizan sólo mediante la excavación de la muestra después del experimento, para observar cómo se rompió por el fluido de fracturación. Sin embargo, se pierden detalles de propagación de la fractura. En este estudio, utilizando un escáner de tomografía computarizada de rayos X, proporcionó la visualización en tiempo real de la fractura durante la inyección. Esta técnica ayudó a revelar el mecanismo de la fractura. Además, la inyección también se llevó a cabo con diferentes líquidos para investigar la influencia en el comportamiento de la fractura.

También fue necesario entender cómo la fractura se propagó a través de una interfaz de formaciones de capas. Para este fin se llevó a cabo otra serie de pruebas en muestras que consisten en dos capas. Las capas tienen un contraste en, ya sea la resistencia o la

permeabilidad. Esto se realizó mediante la adición de cemento a la arena para adquirir resistencia o mediante la adición de limo para reducir la permeabilidad. En los ensayos, un esfuerzo límite uniforme se aplicó sobre toda la muestra para que se examinara la influencia de las propiedades del material en la contención de la fractura.

### **5.1.1 Materiales**

Al estudio se centró en los materiales de permeabilidad bajos y altos. Se emplearon para realizar las pruebas de inyección, los siguientes materiales:

- Arena (la arena cuarzosa),
- Arena + limo (la arena cuarzosa con aditivo de limo de cuarzo)
- Arena + cemento (la arena cuarzosa con aditivo de cemento).

La Tabla 5-1, lista las propiedades físicas de la arena y también los aditivos. La arena sin cohesión se tomó como un caso extremo de materiales blandos. Es un material limpio, natural del río Maas, en Holanda. Los exámenes microscópicos indicaron que las partículas de arena son de forma sub-angular. La porosidad que se puede lograr para una muestra no sometida a esfuerzo fue desde 39,1% a 48,6%, correspondiente a densidades máximas y mínimas, respectivamente.

La preparación de las mezclas, con diferentes aditivos, cambiaron las propiedades. Para preparar una mezcla de arena + cemento, se añade 3% de cemento en la arena (3 g de cemento en 100 g de arena) y se deja curar durante veinticuatro horas. La arena se convierte en cementado en cierta medida y la variación deseada en las propiedades mecánicas del material, es la fuerza. Además, se reduce la permeabilidad. La mezcla de la arena con un aditivo de 10% de limo (10 g sedimentos en 100 g de arena) también disminuye la permeabilidad, pero la resistencia a la tracción sigue siendo cero. Este tipo de material se conoce como arena + limo. Bajo condiciones de prueba, el limo 10% disminuye la permeabilidad al mismo nivel que la arena + cemento.

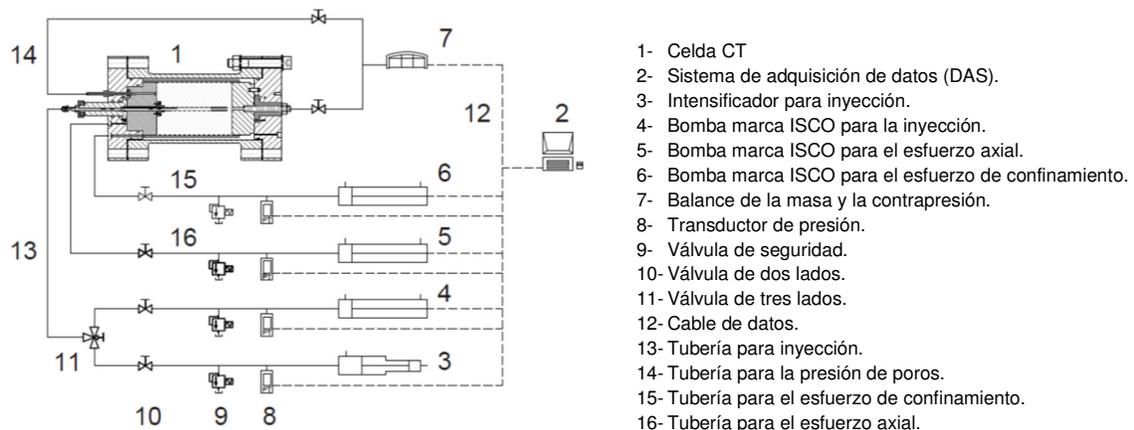
El fluido saturante es el agua. Se utilizó no sólo para la saturación de la muestra, sino también para el llenado del sistema de presión de retorno.

**Tabla 5-1. Características de la arena y sus aditivos.**  
Fuente: DONG [15].

Material	Componente	Tamaño grano $D_{50}$	Coefficiente de uniformidad $D_{60}/D_{10}$	Gravedad específica Gs
Arena	98,9% SiO <sub>2</sub>	105	1,2	2,65
Silt	98,9% SiO <sub>2</sub>	15	6,7	2,65
Cement	CEM I 52,5 R	10	10	3,15

### 5.1.2 Aparato de inyección

El montaje para los ensayos de inyección, contiene una celda CT, un sistema de inyección, un sistema de control de presión, un sistema de presión de respaldo y un sistema de adquisición de datos (DAS por sus siglas en inglés). La Figura 5-1 muestra el esquema del montaje del ensayo.



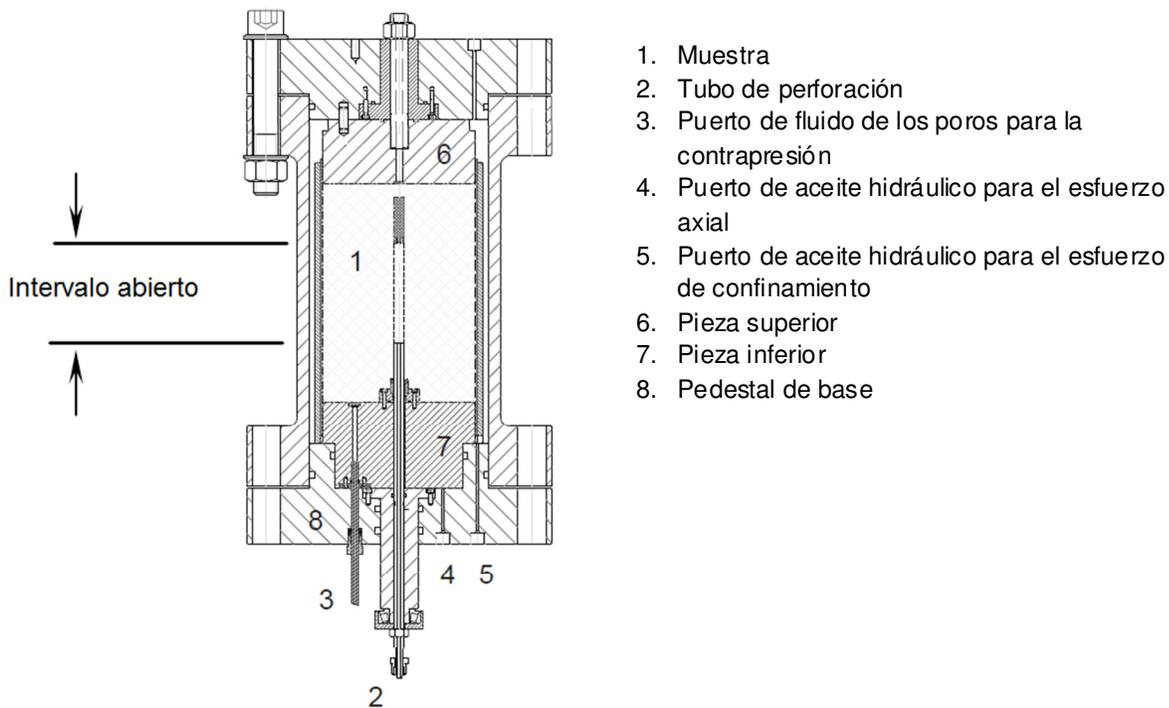
**Figura 5-1. Figura esquemática del montaje del ensayo.**  
Fuente: DONG [15].

La celda CT fue diseñada originalmente por Cook et al. (1993) para ensayos de colapsos en perforaciones. La Figura 5-2, se muestra el esquema de la celda CT, la cual fue modificada para que satisfaga el ensayo de fracturamiento hidráulico. Las partes modificadas fueron la pieza superior e inferior y en particular el tubo de perforación. La celda se hizo de aluminio de alta resistencia, para resistir las altas presiones de hasta 20 MPa y fue transparente a los rayos X.

La muestra tuvo una forma cilíndrica con un diámetro de 152 mm y altura de 217 mm. Estuvo envuelta en una membrana elástica impermeable de 2 mm de espesor. Tuvo una coraza rígida de PVC de diámetro ligeramente mayor, colocado afuera de la membrana

elástica. Esta ayudó a soportar la manga mientras la muestra fue preparada. El espacio entre la membrana elástica y la coraza de aluminio, fue llenado con aceite hidráulico, para proveer el esfuerzo de confinamiento (véase Figura 5-3).

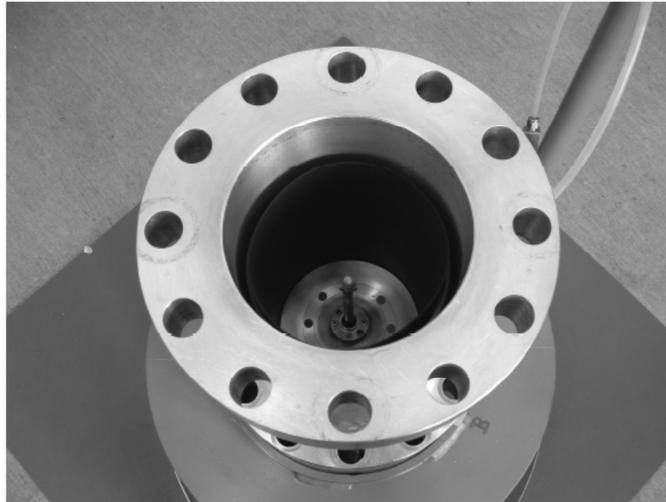
El sistema de inyección incluyó un tubo de perforación dentro de la muestra, las bombas de inyección y sus respectivas líneas hidráulicas. En el tubo de la perforación hubo un tornillo en la superficie del mismo (véase Figura 5-4). La rotación de un conjunto de tuercas especiales en el tornillo, creó un movimiento relativo del tubo con respecto al pedestal de base y por lo tanto el tubo pudo ser retirado para una determinada distancia. Los mejores resultados se obtuvieron colocando el tubo de la celda para la preparación de la muestra y la extracción antes de la inyección. Esta técnica incluyó una perforación de 10 mm de diámetro y una profundidad de 100 mm. Adicionalmente un par de ranuras de 3 mm de espesor, opuestas en el tubo de la perforación, proporcionó que al extraerlo de la muestra se generarán cortes en la perforación que controlaban la dirección de las fracturas generadas durante la inyección.



**Figura 5-2. Figura esquemática de la celda CT modificada con un intervalo abierto.  
Fuente: DONG [15].**

Hubo dos bombas para la inyección, la bomba ISCO y un intensificador. La bomba ISCO, usualmente es usada para múltiples ciclos de inyecciones, esto dio una precisión de máximo 25 cc/min de velocidad de inyección y alrededor de 100 cc de volumen de inyección. Mientras que el intensificador, usado para una sola inyección, fue capaz de dar una velocidad de inyección mayor y un volumen de 600 cc.

El sistema de control de inyección consistió de dos bombas ISCO. Estas controlaron el esfuerzo axial y de confinamiento. Una bomba inyectó el aceite de presión en la pieza inferior, generando así el esfuerzo axial. La otra bomba proporcionó el esfuerzo de confinamiento sobre la membrana. Durante el ensayo la muestra fue sometida a una condición de esfuerzo en el borde que le permitió deformarse en la dirección radial y axial.



**Figura 5-3. Fotografía de la estructura del ensayo CT.**  
Fuente: DONG [15].



**Figura 5-4. Fotografía del tubo de perforación, la pieza inferior y el pedestal de base.**  
Fuente: DONG [15].

El sistema de presión trasera, localizadas en las conexiones de drenaje en la parte superior e inferior, se conectaron con un recipiente a presión en donde hubo que medir un balance entre la masa agua de la presión de poros y la bomba de aire comprimido.

- Mediciones

El esfuerzo axial y de confinamiento se mantuvieron constantes durante la inyección por medio de las bombas ISCO. En si la bomba tuvo la función de registrar la presión. Adicionalmente, las presiones hidráulicas del aceite fueron medidas independientemente por medio de unos transductores, que estuvieron conectados con las líneas de las bombas. Las mediciones se presentaron constantes con la bomba ISCO.

La deformación de la muestra en la dirección axial, fue medida por un transformador diferencial de variación lineal (LVDT por sus siglas en ingles). Este es un dispositivo eléctrico que funciona como un tipo de transformador eléctrico utilizado para medir desplazamientos diferenciales. Este dispositivo fue adherido al puerto de fluido de la presión de poros. Este tubo está localizado en la pieza de fondo y pasa al pedestal de base. Cuando la pieza de fondo se movió debido a la deformación de la muestra, el tubo tiene un desplazamiento relativo con respecto a la base del pedestal y entonces el LVDT mide la deformación axial. El sistema de control de presión dio el monitoreo de deformación para la muestra. Las bombas ISCO grabaron la cantidad de aceite hidráulico que fluyó para adentro y para afuera de la cámara. Por consiguiente la deformación axial y radial se pudo derivar. Ellos presentaron el promedio de la deformación sobre toda la muestra.

Ya que es imposible colocar un transductor en el intervalo abierto, la presión de fracturamiento hidráulico sólo se pudo medir desde afuera de la cámara. Durante la inyección, la presión del fluido fue medida sobre diferentes ubicaciones alrededor de la tubería de inyección. Primero fue medida por un transductor localizado al final del tubo de perforación, lo más cerca posible al intervalo abierto dentro de la muestra. Segundo, en la ubicación más cercana a la bomba de inyección, se colocó otro transductor de inyección. Y finalmente, la bomba ISCO trabajo como una bomba de inyección que adicionalmente proporcionó una medida de la presión. Comparando la presión medida en estos tres puntos, se observó poca diferencia durante la ejecución del ensayo. La línea de inyección fue de 1,5 m de longitud. El tubo de la perforación fue de 0,45 m de longitud, lo cual, es relativamente corto. Por consiguiente, se asumió que no hubo pérdidas de la presión a lo largo del tubo de la perforación. Entonces, la presión medida fue idéntica a la presión del intervalo abierto. Este fenómeno se pudo explicar por medio de las propiedades de fracturamiento del fluido. Este fenómeno fue descrito por el modelo reológico de Herschel y Bulkley y así la pérdida de la presión significativa no fue esperada una vez comenzó el ensayo.

La velocidad de inyección fue constante en el período de bombeo y derivado desde el cambio de volumen de bombeo del intensificador. La variación del volumen fue

monitoreado al medir el desplazamiento del pistón de la bomba usando un transductor Magnetostrictivo de desplazamiento lineal. Fue necesario encontrar el promedio de la velocidad de la inyección. Esto se observó con el valor promedio sobre el total del período de bombeo. La velocidad de inyección fue provista automáticamente, por medio de las bombas ISCO, que actuaron como bombas de inyección.

En el sistema de contrapresión, pesando la masa de agua de los poros que fluyó fuera de la muestra, proporcionó un monitoreo durante el período de la inyección, con el volumen cambiante en la muestra y también el desplazamiento del fluido de fracturamiento.

Todos estos datos necesarios para el monitoreo y ejecución del ensayo, fueron obtenidos por el sistema análogo de datos (DAS) cada dos segundos.

- Correcciones

Una corrección fue realizada para la medición del esfuerzo axial de la muestra. El sistema DAS tomó como el esfuerzo axial aplicado, la misma presión hidráulica usada en la pieza inferior de la muestra proveniente de la bomba ISCO. Esta medida asumió que la presión del aceite ocurrió en la totalidad del área de la muestra. Sin embargo esto no es completamente cierto ya que la presión aplicada sobre la muestra fue en un área menor. Esta desviación del valor se tuvo en cuenta en los resultados del ensayo. Para un ensayo típico, el valor del esfuerzo axial real fue de 9 MPa y la presión del aceite aplicada fue de 10 MPa.

Un error sistemático que ocurrió en la realización del ensayo en la derivación de la tasa de inyección, estuvo dada por el intensificador para la inyección. El pistón del intensificador fue impulsado por una presión hidráulica del aceite, la cual fue suministrada por una bomba de golpe impulsada por aire. Por tal motivo, la tasa de inyección no fue totalmente constante, sí no que tuvo ciertas oscilaciones. Esta desviación fue del orden del 5% del valor promedio.

Otro error sistemático encontrado en la tasa de inyección, fue la posible diferencia entre la medida de la tasa de inyección y la tasa efectiva de inyección. Esta diferencia fue causada por la compresibilidad del fluido. Otra razón fue que el fluido almacenado en el sistema de inyección no se mantuvo constante a causa de la deformación de la perforación y los tubos con la presión de inyección  $P$ . La tasa de flujo aplicada a la bomba difirió de la tasa de flujo que realmente fue aplicada a la perforación de la muestra. La tasa de flujo efectiva  $Q$  fue calculada como:

$$5-1 \quad Q = Q_{bomba} - \frac{dV_{f,sys}}{dP} \frac{dP}{dt}$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $Q_{bomba}$  es la tasa de flujo aplicada en la bomba y  $dV_{f,sys}$  es el volumen del fluido en el sistema de inyección. La presión del fluido en la fractura, se asumió uniforme en el sistema mencionado arriba. El volumen de fractura no estuvo

involucrado en el sistema de inyección. Van Dam (1999) examinó el efecto de la tasa de flujo y se dio cuenta que, en roca dura la diferencia era muy pronunciada, pero que en materiales blandos, el efecto de la tasa de flujo efectiva era equivalente al efecto de la tasa de flujo aplicado de la bomba.

### **5.1.3 Fluido para la fractura**

El fluido de fracturación utilizado en las pruebas de inyección fue a base de agua de borato de gel reticulado con concentración de guar de 6,0 g/l. Es un líquido muy estable, de manera que sigue siendo reticulado al estar en contacto con la arena y no se deteriora con el tiempo. El limo se añadió al gel con una concentración de 4,8 g/l. La adición de limo pudo mejorar su capacidad de creación de capas, que fue esencial para la fracturación en materiales de alta permeabilidad. Además, también se añadió otro aditivo de una pequeña cantidad de azul de metileno, como material colorante para la inspección visual de la geometría de la fractura, después de los ensayos de inyección. El gel reticulado con borato y aditivos de limo y azul de metileno, se conoce como BXLG (por sus siglas en inglés). La Figura 5-5, muestra la fotografía de la BXLG en vista macroscópica. Se observa que BXLG crea una torta de filtración externa y una torta de filtración interna durante la inyección en las pruebas. Este comportamiento fue diferente al modelo de escape convencional. La sabiduría convencional dice que después de una fase de aceleración, el gel reticulado se acumulará en la torta de filtración externa que domina la caída de presión entre el fluido de fracturación y el fluido de formación. Esto fue apoyado por la observación de que el gel se comporta como un medio poroso cuando se comprime.

La inyección con BXLG demostró que es un fluido de fracturación bastante eficiente. La capacidad de creación de la torta reticulada del gel de borato, se mejoró por el aditivo de limo, que es esencial para la fractura en un material de alta permeabilidad. BXLG produce fracturas incluso hasta en un esfuerzo de confinamiento de 39,4 MPa en, que es la tensión más alta que la de confinamiento puede proporcionar y hay una presión normalizada de 2,2 (Bohloli y de Pater, 2006). También parece que BXLG resultó en geometría de la fractura más simple, en comparación con el fluido newtoniano viscoso y suspensión de bentonita que no se acumulan en la torta de filtración.



**Figura 5-5. Fotografía del fluido BXLG.  
Fuente: DONG [15].**

#### **5.1.4 Influencia del tamaño de la muestra**

El tamaño finito de las muestras de las pruebas puede influir en la respuesta de la fractura. La muestra puede ser considerada como un medio semi-infinito si las perturbaciones del campo elástico debido a la presurización de la fractura se limitan alrededor de la fractura a una región que es menor que la muestra. O, prácticamente, se puede aceptar que la influencia se puede descuidar y que la fractura es insensible al tamaño de la muestra, cuando la longitud de la fractura es menor que el radio medio de la muestra.

#### **5.1.5 La Prueba**

El procedimiento en el ensayo de inyección, consistió en tres etapas, el abrir la perforación, cargar la muestra con el esfuerzo deseado y la inyección. Para el ensayo en una arena homogénea, la saturación de la muestra y la apertura de la perforación, se realizó a una presión relativamente baja de 1,5 MPa de esfuerzo axial y 1 MPa de esfuerzo de confinamiento. Una bomba ISCO primero incremento la presión del fluido de fractura hasta tener 1 MPa. Este fluido de fractura fue colocado con anterioridad en el tubo de la perforación de la muestra. El tubo de la perforación fue sacado de la muestra para crear una perforación abierta, mientras que la bomba ISCO se mantuvo a una presión de 1 MPa en la perforación. Esta perforación abierta se localizó en el centro de la muestra.

La inyección constó de dos períodos, el de bombear (pump-it) y el de cerrar (shut-in). En el período pump-it, el fluido de la fractura fue bombeado al intervalo abierto de la perforación, a una tasa de inyección constante, para generar fracturas. En el período del shut-in, la presión del fluido disminuyó y la fractura se cerró, hasta que se terminó el bombeo del fluido. La bomba ISCO suministró una tasa de inyección precisa de 25 cc/min pero un volumen relativamente bajo de 100 cc. Por este motivo se requirieron varios ciclos de inyección, para propagar correctamente la fractura. El siguiente ciclo de inyección, comenzó después de que todo el sistema fuera estable en el período del shut-in, lo cual, se indicó en el cierre de las fracturas y a un, más o menos constante, fluido de presión. Después de la inyección, la carga en la muestra fue liberada. La muestra fue retirada para realizar una inspección visual.



Figura 5-6. Fotografía de la preparación de la celda CT.  
Fuente: DONG [15].

### 5.1.6 Resultados

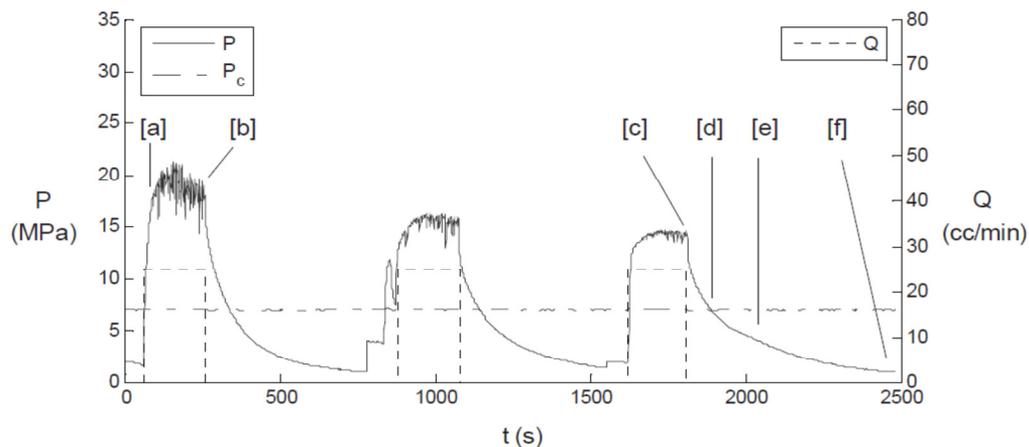
Los ensayos de inyección en la arena se llevaron a cabo con en el esfuerzo de confinamiento de 7, 14, y 20 MPa. La Tabla 5-2, lista los principales datos de la prueba, donde  $P_c$  es la presión de confinamiento,  $n_{iny}$  es la porosidad antes de la inyección,  $K$  es la permeabilidad,  $Q$  es la velocidad de inyección,  $V_i$  el volumen de inyección del fluido,  $P_{ini,n}$  es la presión de iniciación normalizada,  $P_{max,n}$  es la presión de inyección máxima normalizada,  $P_{cie,n}$  es la presión de cierre normalizada,  $\eta$  es la eficiencia de fluido y  $W_f$  es el ancho de la fractura.

**Tabla 5-2. Resumen de las condiciones iniciales y los resultados del ensayo de inyección en la arena.**

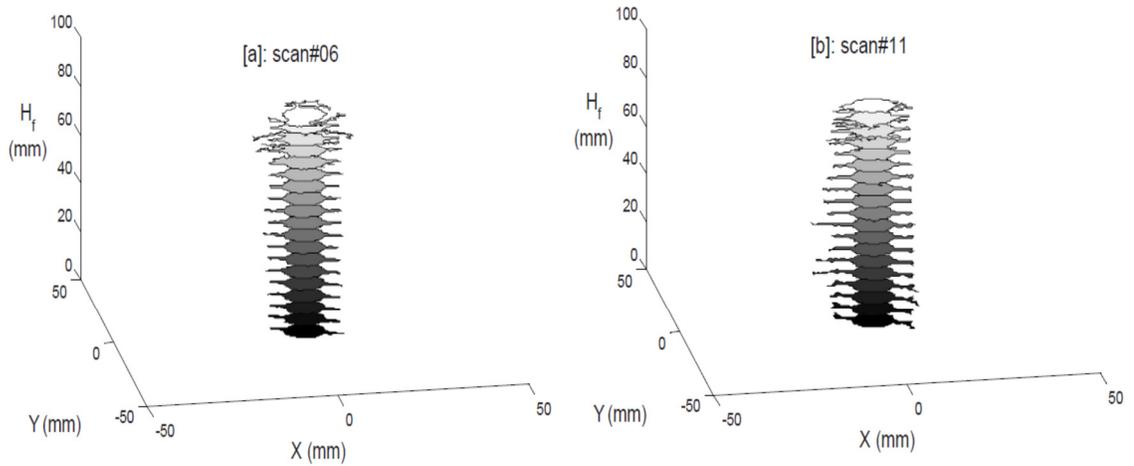
Fuente: DONG [15].

Ensayo #	$P_c$ (MPa)	$n_{iny}$ (%)	$K$ (D)	$Q$ (cc/min)	$V_i$ (cc)	$P_{ini,n}$ (MPa)	$P_{max,n}$ (MPa)	$P_{clo,n}$ (MPa)	$\eta$ (%)	$W_f$ (mm)
CTC08c	7,00	39,30	1,70	25,00	75,00	3,04	3,04	0,36	0,70	0,90
CTC08d					80,00	1,91	2,32	0,41	3,30	0,80
CTC08e					74,20	1,88	2,10	0,50	5,50	0,90
CTC14	7,00	39,70	1,70	$\approx 28,00$	281,20	2,68	2,92	0,47	2,00	0,80
CTC09c	14,00	40,70	1,90	25,00	44,60	2,29	2,44	0,29	0,10	0,30
CTC09d					73,80	2,29	2,29	0,37	1,60	1,00
CTC09e					81,70	1,69	1,85	0,23	1,80	0,90
CTC09f					75,40	1,53	1,68	0,23	2,90	0,80
CTC09g					87,10	1,44	1,57	0,21	3,70	0,80
CTC17	14,00	37,00	1,30	$\approx 37,00$	458,80	2,45	2,45	0,38	1,60	1,00
CTC12c	20,00	38,70	1,60	25,00	54,20	2,28	2,28	-	-	-
CTC12d					79,20	2,11	2,17	0,23	1,60	0,90
CTC12e					86,70	1,58	1,76	0,25	2,70	0,90
CTC12f					72,50	1,31	1,55	0,38	4,60	0,80
CTC12g					83,30	1,32	1,50	-	-	-
CTC16	20,00	36,70	1,20	27,00	351,00	2,41	2,44	0,21	1,60	1,30

Tomando como ejemplo el ensayo CTC08 a una presión de confinamiento de 7 MPa, el cual se le realizaron tres ciclos de inyección. La Figura 5-7, muestra el registro de la presión de inyección, velocidad de inyección y la tensión de confinamiento. De la Figura 5-8 a la Figura 5-10 [a] a [f], presentan la evolución de la geometría de la fractura en una serie de imágenes en tres dimensiones, que están relacionados con el tiempo de inyección en la Figura 5-7.

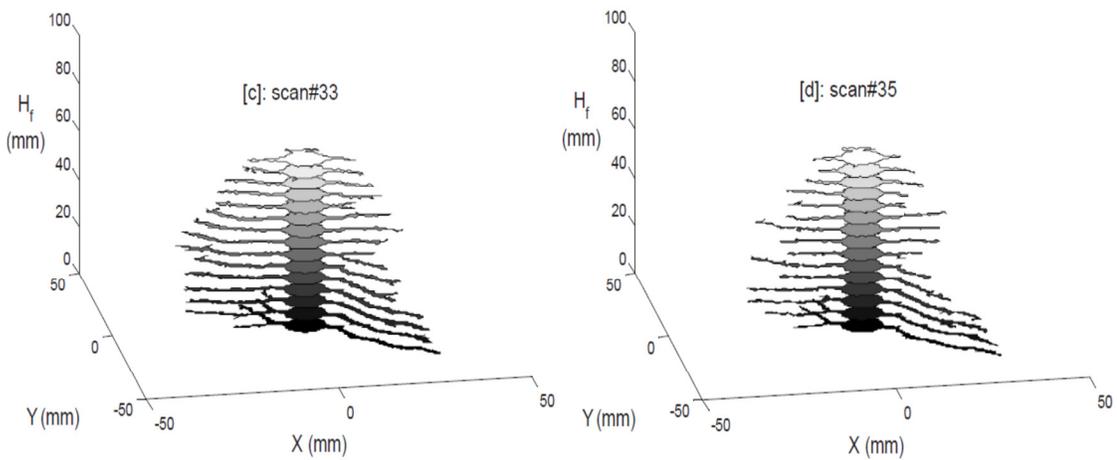


**Figura 5-7. Resultados del ensayo de inyección de la muestra CTC08.**  
Fuente: DONG [15].



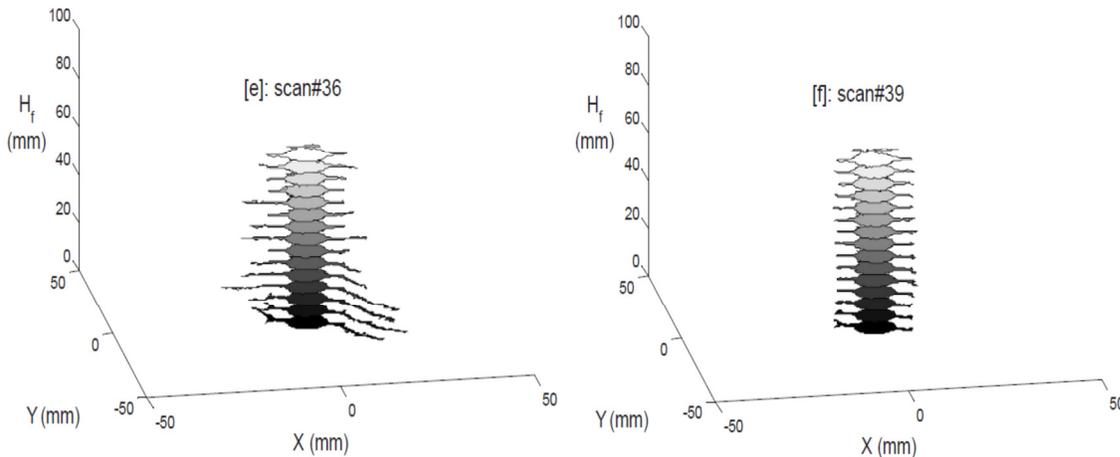
**Figura 5-8. Imagen CT en tres dimensiones mostrando la fractura en la posición [a] y [b] de la Figura 5-7.**

**Fuente: DONG [15].**



**Figura 5-9. Imagen CT en tres dimensiones mostrando la fractura en la posición [c] y [d] de la Figura 5-7.**

**Fuente: DONG [15].**



**Figura 5-10. Imagen CT en tres dimensiones mostrando la fractura en la posición [e] y [f] de la Figura 5-7.**

**Fuente: DONG [15].**

La fractura se inició en el primer ciclo de inyección. La Figura 5-8 [a] indica el estado original de la perforación junto a la muesca. La fractura no inicia todavía. Antes de la terminación de bombeo, la fractura se está iniciando, como se muestra en la Figura 5-8 [b]. El primer ciclo de inyección generalmente tiene un período de inyección relativamente corto, debido a que parte de la capacidad de la bomba de inyección se ha utilizado para presurizar el pozo de sondeo con el fin de mantenerlo estable antes del bombeo. La fractura se propagó aún más en los ciclos posteriores, y una fractura bien desarrollada se puede observar en la Figura 5-9 [c] en el tercer ciclo de inyección. La fractura fue casi simétrica con una geometría típica fractura de doble ala. Las imágenes también muestran que la fractura tendió a propagarse hacia la parte inferior. Esto se pudo explicar por la variación en la porosidad. La porosidad de la muestra fue examinada anteriormente a la inyección, lo que demostró que los cambios de porosidad de 38,0 % a 41,6 % a lo largo del eje longitudinal y la porosidad más grande aparecieron en la parte inferior.

Un cierre típico de una fractura se presenta en la Figura 5-9[d] a Figura 5-10[f]. La fractura se hizo más estrecha y más corta, inmediatamente después de la terminación de bombeo. La fractura permaneció abierta cuando la presión del fluido se hubiera reducido al esfuerzo de confinamiento, como se muestra en la Figura 5-9 [d]. La fractura se cierra mecánicamente muy por debajo del esfuerzo de confinamiento y, finalmente, la presión se vuelve estable en un valor bajo en el extremo del shut-in. En algunos lugares, sin embargo, algunas fracturas residuales cortas adyacentes a la ranura permanecieron abiertas incluso después de un período muy largo del shut-in. Esto fue causado por la deformación plástica.

En la Figura 5-11, se muestra el espécimen después de que la arena suelta se retira de la muestra intacta, la torta de filtración se mantiene, como se ve en la Figura 5-11 [b]. La

Figura 5-11 [d], muestra la sección transversal de la torta de filtración, donde la geometría de la fractura se indica en azul.

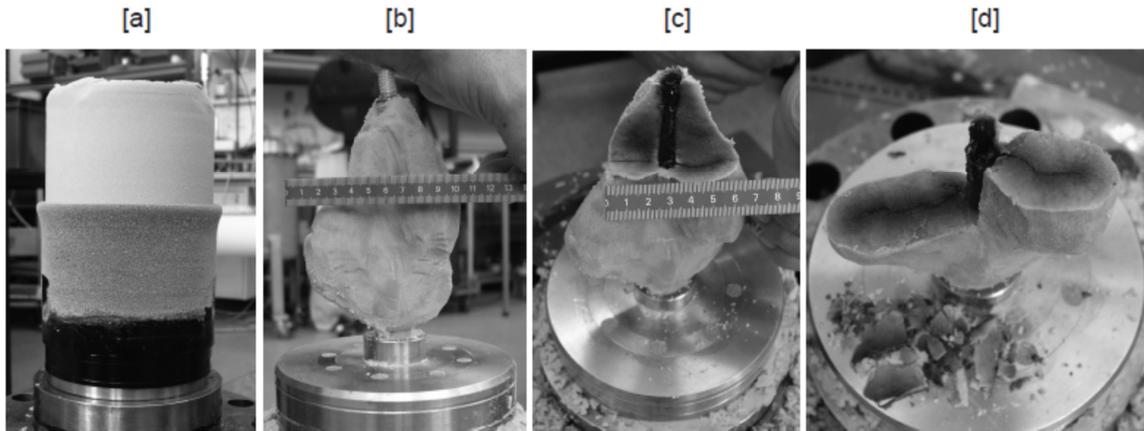


Figura 5-11. Fotografías de la muestra ensayada CTC08. [a] la muestra intacta, [b] la torta intacta, [c] parte de la torta es removida y [d] la sección horizontal de la torta donde se ve la fractura.

Fuente: DONG [15].

### 5.1.7 Conclusiones

- Las pruebas demuestran que la fracturación hidráulica está dominada por la reología del fluido, fugas y cambio asociado en la presión de poros. Aunque la fractura en la roca sea competente y apretada, puede depender sólo ligeramente en las propiedades del fluido, este supuesto no es válido para fracturar un material de alta permeabilidad. La reología del fluido tiene una fuerte influencia sobre la tendencia de la fractura.
- El mecanismo dominante para fracturar el material ligeramente cohesivo/sin cohesión, es la falla en cortante. Para el material cementado, el valor umbral es de aproximadamente 0,5 MPa en la fuerza de tracción, por encima del cual el mecanismo dominante parece ser la falla en la tensión; la fractura mecánica elástica lineal convencional es aplicable.
- La desviación más importante del comportamiento de las fracturas elásticas fue una presión más grande de inyección, anchura más grande, y la presión de cierre mucho más baja que las presiones de confinamiento.
- Para fracturar en arena, el rango de límite de presión fue desde 0,7 hasta 40 MPa, la presión de inyección normalizada observada disminuyó de 5 a 2 MPa. La dependencia del esfuerzo de la presión de inyección, estuvo de acuerdo con el mecanismo de expansión de la perforación, acompañada con la aparición de bandas de cizallamiento. La presión observada fue mucho menor, que la predicción de la teoría de la expansión de la perforación pero mayor que

cualquiera de las teorías convencionales de desglose. Es decir, la falla en la tensión de cizallamiento en la iniciación o en un material elástico lineal.

- La fractura se inició y propagó en un ángulo oblicuo. Esto es consistente con el mecanismo que se propaga en la cizalladura.
- Hay pequeñas ramas en la fractura principal. En muchos casos las ramas pequeñas se parecen más a una fractura inmadura. Cuando la fractura se propaga a dos ramas tanto en ángulo oblicuo, uno de los manojos se propaga bien y finalmente se convierte en el dominante. A veces, las dos ramas crecen de manera uniforme. La ramificación fracturada aumentaría las fugas de la fractura.
- Hay dos dimensiones de fugas, es decir, por ejemplo las fugas con BXLG son perpendiculares a la superficie de la fractura y las que fluyen en la dirección tangencial de la roca. Esto resulta que en la punta de la fractura queda rezagado el fluido. El retraso del líquido detrás de la punta de la fractura, por lo general se observa en la roca firme, por lo que, no existe.
- La recesión es importante durante el cierre de la fractura.

## **5.2 UN ESTUDIO DE LABORATORIO DE LA PRESIÓN DE RUPTURA DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN LA ROCA ARENISCA (SONG, SUH, WONG y HAIMSON [16])**

### **5.2.1 Introducción**

El ensayo de fracturamiento hidráulico, el cual determina la magnitud y dirección de los esfuerzos in-situ, consiste en la inyección de un fluido a un segmento aislado en una perforación hasta que se genere la fractura. La presión de fractura,  $P_c$ , es definida como la presión de bombeo necesaria para generar la fractura hidráulica.

Hay dos métodos clásicos del criterio de fracturamiento hidráulico para establecer las ecuaciones entre el valor del  $P_c$  y el esfuerzo horizontal principal. Uno está basado en la teoría elástica de las rocas impermeables (Hubbert y Willis, 1957) y la otra está basada en la teoría poro-elástica considerando el esfuerzo poro-elástico inducido por la penetración de un fluido en las rocas (Haimson y Fairhurst, 1967).

El criterio de Hubbert y Willis (H-W) está dado por la siguiente ecuación:

$$5-2 \quad P_c - P_o = T_{hf} - 3\sigma_h + \sigma_H - 2P_o$$

El criterio de Haimson y Fairhurst (H-F) está dado por la siguiente ecuación:

$$5-3 \quad P_c - P_o = \frac{T_{hf} + 3\sigma_h - \sigma_H - 2P_o}{2 - 2\eta}$$

Dónde:

$\sigma_h$  = es el esfuerzo principal menor.

$\sigma_H$  = es el esfuerzo principal mayor.

$P_o$  = la presión de poros inicial en la roca.

$T_{hf}$  = es la resistencia a la tracción del fracturamiento hidráulico.

$$\eta = \text{es el parámetro poro-elástico} = \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)}$$

En los dos criterios descritos anteriormente (H-F y H-W) se hicieron dos supuestos. El primero es que la tensión en la fractura ocurre cuando el esfuerzo tangencial en las paredes de la perforación llegue a la resistencia a la tracción ( $T_{hf}$ ) de la roca. Y el otro supuesto es que el efecto del fluido en los poros del esfuerzo de la roca, está gobernado por la ley de Terzaghi (1943) del esfuerzo efectivo.

$$5-4 \quad \sigma_{ij}^{eff} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}P_o$$

Donde  $\sigma_{ij}^{eff}$  es el esfuerzo efectivo y  $\delta_{ij}$  es el delta de Kronecker ( $\delta_{ij} = 1$  para  $i=j$  y  $\delta_{ij} = 0$  para  $i \neq j$ ).

Hay unos puntos que no son descritos de manera satisfactoria en los dos criterios. Primero, no hay una diferencia obvia entre las rocas permeables e impermeables. Segundo, el criterio de H-F (ecuación 5-3) no llega hacia el criterio de H-W (ecuación 5-2) cuando la permeabilidad/porosidad (correspondiente a  $\alpha$ ) se convierta en cero. Tercero, ni el criterio de H-W ni el criterio de H-F, incorporan el efecto de la velocidad de presurización en el sondeo y el tamaño del sondeo.

La velocidad de la presurización se ve muy afectada cuando se tienen rocas muy permeables ya que es indispensable aumentar la velocidad de flujo de la inyección o incrementar la viscosidad del fluido para sobreponer las pérdidas debido a las fugas entre los poros de la roca.

El objetivo primordial de este experimento fue el de conocer sí el valor del esfuerzo in-situ obtenido en el ensayo de fracturamiento hidráulico, podía ser alterado por la roca arenisca con permeabilidad muy alta.

## 5.2.2 Tipo de roca ensayada

Los experimentos de fracturamiento hidráulico se realizaron en rocas de areniscas obtenidas de un estrato por debajo de la Formación Idaho, con una edad por encima del Mioceno. La roca tenía un alto contenido de K-feldespatos y se clasificó como una arenisca arcósica.

Las propiedades mecánicas de la roca se muestran en la Tabla 5-3.

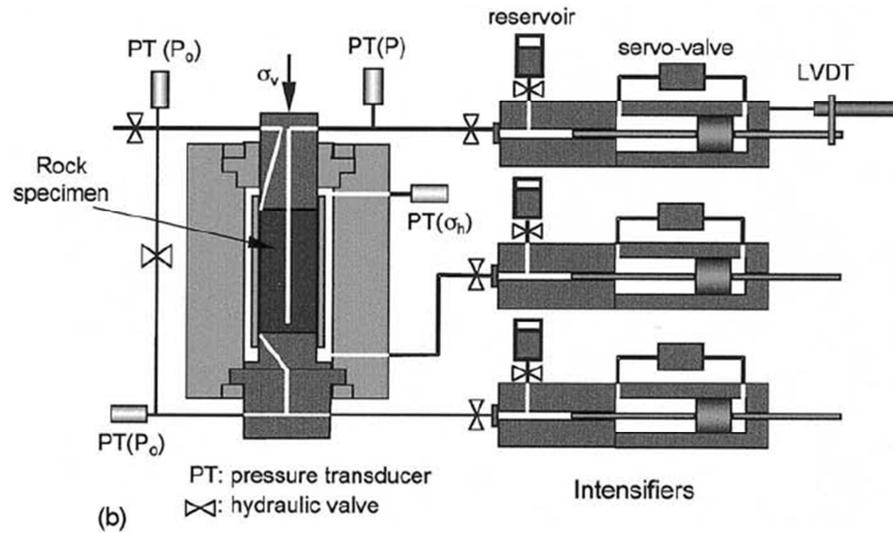
**Tabla 5-3. Propiedades físicas y mecánicas de la arenisca ensayada.**

Porosidad (%)	Permeabilidad (Darcy)	Compresión uniaxial (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo tangencial (GPa)	Relación de Poisson $\nu$	Parámetro Biot $\alpha$
26,0 ± 0,9	0,12	42,0 ± 1,0	4,4 ± 0,22	15,3	0,2	0,71

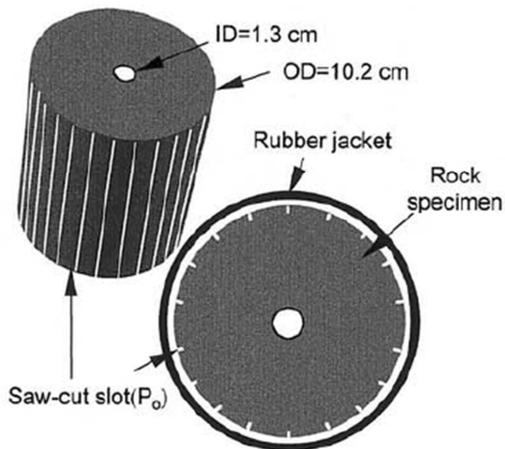
## 5.2.3 Montaje y procedimiento del ensayo

Se realizan los ensayos de hidrofracturamiento en cilindros huecos de roca con paredes gruesas, de un diámetro interno de 1,3 cm y un diámetro externo de 13,0 cm (Véase la Figura 5-13).

Las muestras fueron puestas en una cámara triaxial, sujetas a una presión de confinamiento  $P_{conf}$  ( $\sigma_h$ ), a una carga vertical ( $\sigma_v$ ) y a una presión de un fluido entre los espacios entre poros ( $P_o$ ). La aplicación del fluido que va entre los espacios de los poros se logró por medio de unas fisuras en el perímetro de la muestra (1 mm de ancho y 3 mm de profundidad), cada 20°, en dirección de la superficie externa de la muestra (véase Figura 5-13a). El control de la presión de poros en el radio externo de la muestra, permitió que se generara flujo radial cuando la muestra fue presurizada. El fluido que se utilizó en la perforación (viscosidad de 2,5 Pa s a 20°C), fue el mismo que se utilizó entre los poros. Este fue inyectado a una presión constante hasta que se llegó a la presión pico. La inyección de fluido se detuvo, en el instante en que la velocidad del flujo dejó de aumentar. Se repitieron varios ciclos de presión. El sistema de cuatro canales de servo-control, permitió un control continuo de la presión aplicada ( $\sigma_h$ ,  $\sigma_v$  y  $P_o$ ) y de la velocidad de inyección del fluido en la perforación. Un software comercial y una computadora personal, fueron equipados con convertidores de digital a análogo y de análogo a digital para poder controlar el ensayo y la adquisición de datos. Todo el proceso de carga y la presurización de la perforación fueron automatizados, incluyendo la interrupción de la inyección al presentarse el fracturamiento hidráulico.



**Figura 5-12. Montaje esquemático del ensayo.**  
**Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [16].**



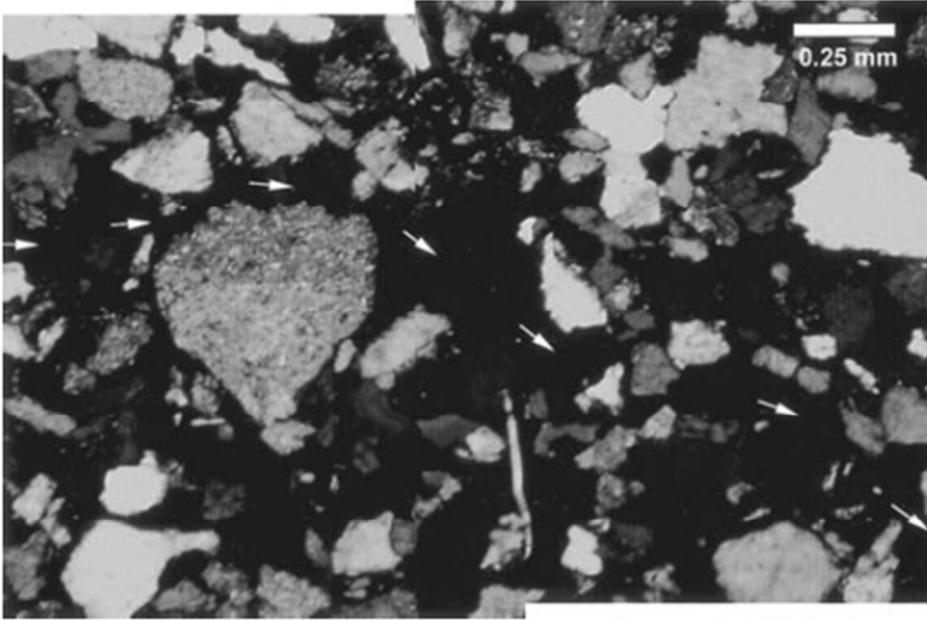
(a)

**Figura 5-13. Montaje del ensayo. Preparación de la muestra.**  
**Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [16].**

- Apariencia de las fracturas hidráulicas

Al realizar el ensayo, las fracturas que se formaban siempre eran de verticales a sub-verticales, confirmando que podía ser factible realizar un ensayo convencional de fracturamiento hidráulico, en una roca de arenisca muy porosa, siempre y cuando se utilicen los fluidos y caudales apropiados. Un análisis con un microscopio electrónico de

barrido (SEM por sus siglas en inglés), mostró que la fractura se desarrolló a lo largo de los límites intergranulares. La propagación de la grieta intergranular fue tan dependiente a la resistencia intergranular, que hasta las hidro-fracturas tomaron el camino más difícil que el de una línea recta (véase Figura 5-14).

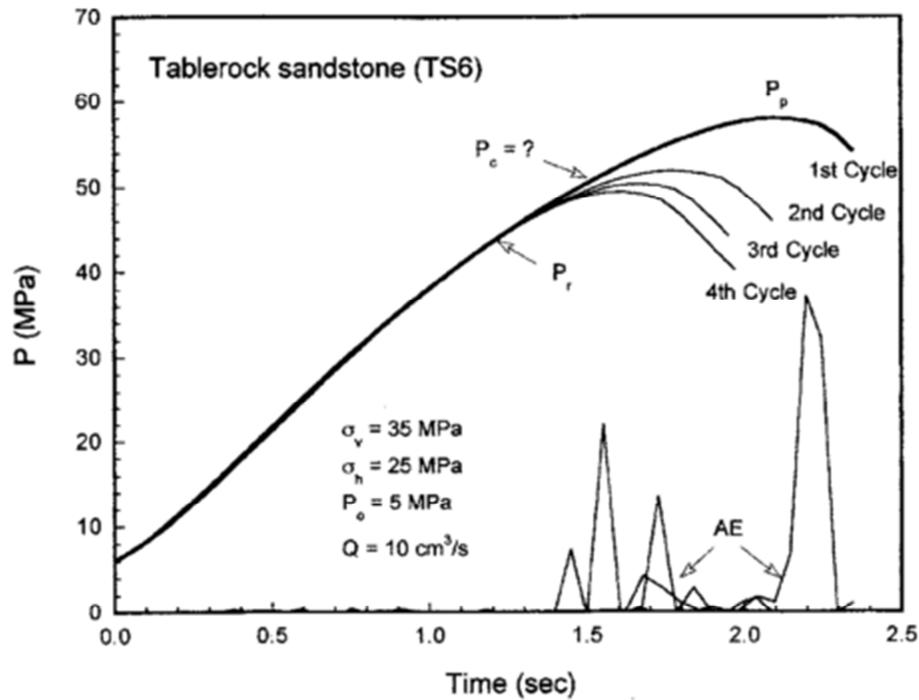


**Figura 5-14. Detalle de la sección de la hidro-fractura, en la cual se muestra el difícil camino que cogió el agua, debido a las fuerzas intergranulares.**  
Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [12].

#### 5.2.4 Análisis de las curvas presión-tiempo.

En la Figura 5-15, se muestra en detalle la curva de presión-tiempo, cuando sucede la fractura inducida y cuando se produce la reapertura. La parte de la curva ascendente del primer ciclo, está superpuesta con sus tres ciclos siguientes.

La Figura 5-15, ilustra como el segmento inicial de la curva de todos los ciclos es idéntica, como se esperaría si la presión es constante para todos los ciclos y si la fractura se cierra completamente entre cada ciclo. La presión pico ( $P_p$ ) del primer ciclo es normalmente usada como la presión de rotura. El punto donde la pendiente de la figura cambia con respecto al primer ciclo, se llama presión de reapertura ( $P_r$ ). La resistencia a la tracción del fracturamiento hidráulico obtenida de la expresión;  $T_{hf}^{p-r} = P_p - P_r$  (Haimson, 1980) da como resultado un valor promedio de 23,2 MPa, lo cual, es un valor muy elevado para este tipo de roca (de la Tabla 5-3, es de 4,4 MPa). Esto es causado probablemente porque no se tiene en cuenta la presión de reapertura.



**Figura 5-15.** El segmento ascendente del primer ciclo, superpuesto a los ciclos siguientes. Nótese las emisiones acústicas (AE) preceden a la presión pico.  
Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [12].

La Figura 5-16, muestra la representación de la parte ascendente de la curva mostrada en la Figura 5-15, en la forma de  $dP/dt$  en función de la presión y la selección de la presión de ruptura ( $P_c$ ) y presión de reapertura ( $P_r$ ) en los punto de inflexión encontrados.

En la Figura 5-16, se observa que en cierto punto, la tasa de presión se desvía de su aproximación lineal y desciende de una manera más rápida. Este es el punto donde se cree que la permeabilidad cambia repentinamente a causa de la fractura a tracción. Este método de obtención de los parámetros  $P_c$  y  $P_r$ , es más preciso y realístico que el mostrado en la curva presión-tiempo.

Ahora el recalcu de la resistencia a la tracción del fracturamiento hidráulico relacionando la presión de ruptura con la presión de reapertura. Estos valores dan un promedio de 8,0 MPa, lo cual, es un valor más aproximado a lo obtenido en la Tabla 5-3 de 4,4 MPa.

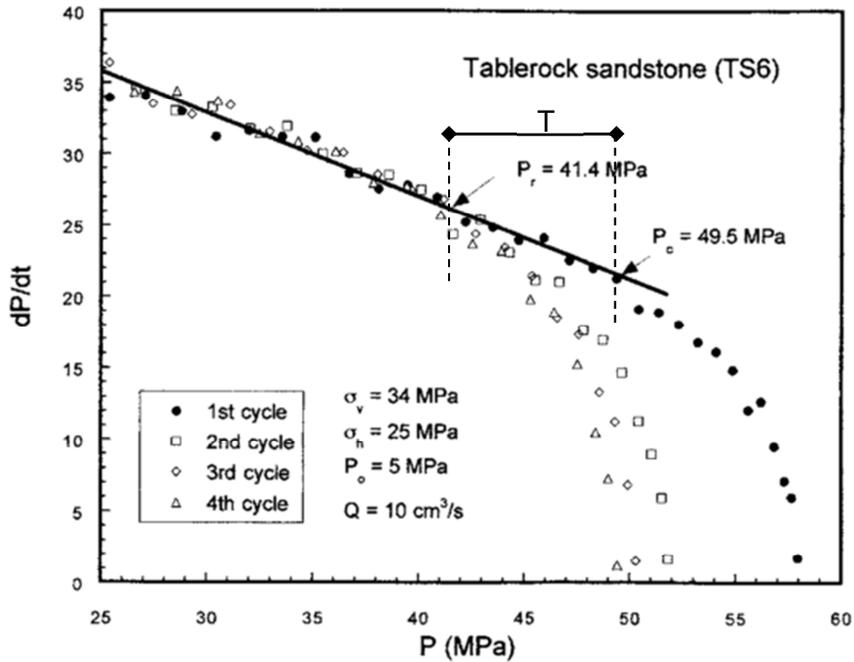


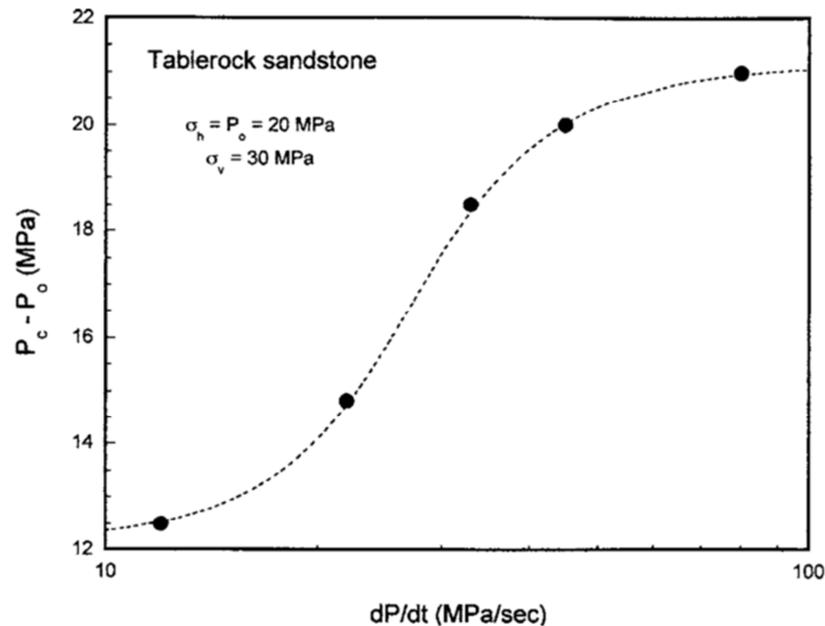
Figura 5-16. Representación de la parte ascendente de la curva presión-tiempo, en la forma de  $dP/dt$  en función de la presión.

Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [12].

### 5.2.5 Resultados del ensayo de fracturamiento hidráulico sin membrana

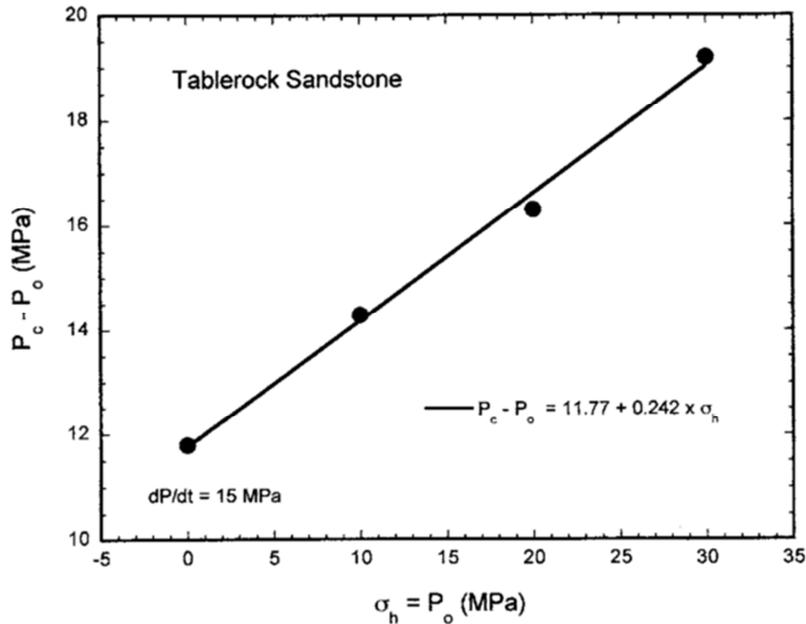
Dos series de ensayos de laboratorio, fueron realizados en muestras sin membrana de recubrimiento, donde el fluido se podía mover radialmente en libertad desde adentro de los cilindros huecos. Realizar estos ensayos con la muestra sin membrana hizo que el fluido se pudiera mover libremente, lo que produjo que las presiones iniciales fueron iguales a la presión de confinamiento ( $P_o = P_{con} = \sigma_h$ ).

Se realizaron dos series de ensayos para las muestras sin membrana. El primero se realizó con una tasa de presurización diferente ( $dP/dt$ ). Esto se logró variando la tasa de flujo entre cada ensayo y manteniendo el mismo nivel de confinamiento de la presión de poros de 20 MPa. Y la segunda serie de ensayos, se realizaron manteniendo la tasa de flujo constante ( $5 \text{ m}^3/\text{seg}$ ), pero para cada uno de los ensayos se utilizó diferentes presiones de confinamiento para los poros (0 a 30 MPa). La primera serie de ensayos fue realizada con el objetivo de poder determinar el efecto de la tasa de presurización  $P_c$ , y la segunda serie de ensayos fue para examinar el efecto de la presión de poros en el esfuerzo de la muestra. Los resultados de estas series de ensayos se representan en la Figura 5-17 y Figura 5-18.



**Figura 5-17. Ensayos de fracturamiento hidráulico en muestras sin membrana con un mismo valor de  $\sigma_h$  y variando la tasa de flujo  $dP/dt$ . Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [12].**

Según los resultados de las gráficas de los ensayos, se puede mencionar que para la primera serie (Figura 5-17), la relación  $P_c - P_o$  se incrementa significativamente cuando la tasa de presurización aumenta. Este comportamiento sugiere que el criterio clásico del fracturamiento hidráulico de Hubbert y Willis, 1957 y Haimson y Fairhurst, 1967, es insuficiente para una arenisca, ya que no se tiene en cuenta el efecto de la tasa de presurización ( $dP/dt$ ). En la segunda serie de ensayos, donde una tasa de presurización preestablecida fue utilizada, la relación,  $P_c - P_o$ , se incrementó linealmente al variar la presión de confinamiento (Figura 5-18). Esto en contraste con los valores constantes que se obtienen en los criterios clásicos elásticos y piroelásticos. En ambos criterios, el  $P_c - P_o$ , deberían ser constantes sin tener en cuenta la presión de confinamiento, porque se tiene  $P_o = \sigma_h$  en muestras sin membrana.



**Figura 5-18. Ensayos de fracturamiento hidráulico en muestras sin membrana con una tasa de flujo constante pero variando la presión de confinamiento.**  
Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [12].

Estas ambigüedades surgen entre las teorías del fracturamiento clásico a causa de la suposición de que la ruptura se caracteriza por la falla de un sistema elástico en la pared del pozo (Detournay y Carbonell, 1994). Detournay y Cheng (1992), introdujeron una escala de longitud alrededor del sondeo para proponer un modelo en que la ruptura se produce cuando la tensión circular media efectiva sobre la escala de longitud, alcanza el valor crítico  $T_{hf}$ . En su enfoque, el esfuerzo efectivo promedio fue considerado para inducir la iniciación de la falla a tensión. La distribución de la presión de poros sobre la longitud, dada por la ecuación de difusión también depende de la tasa de presurización del sondeo. El criterio de Detournay y Cheng (D-C), 1992 es:

$$5-5 \quad P_c - P_o = \frac{T_{hf} + 3\sigma_h - \sigma_H - 2P_o}{1 + (1 - 2\eta)h(\gamma)}$$

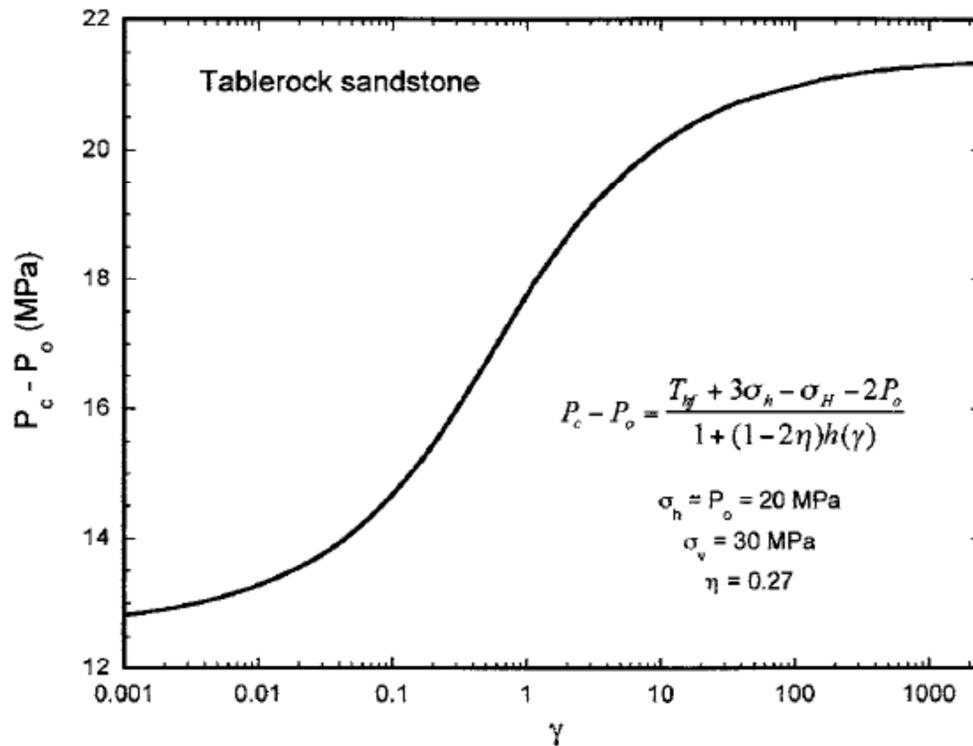
Donde el valor de  $\gamma$  es un valor de presurización adimensional dado por:

$$5-6 \quad \gamma = \frac{A\lambda^2}{4cS} \quad 0 \leq \gamma \leq \infty$$

Donde  $A$ ,  $\lambda$  y  $c$  son la tasa de presurización del sondeo, la escala de longitud de las micro grietas y el coeficiente de difusividad, respectivamente. Y  $S$  es una cantidad de esfuerzos igual al numerador del criterio D-C:

$$5-7 \quad S = T_{hf} + 3\sigma_h - \sigma_H - 2P_o$$

$h(\gamma)$  es derivado desde la ecuación de difusión que representa la distribución de la presión de poros a las inmediaciones de la perforación. El modelo D-C implica que la iniciación de la condición de falla a tensión, depende fuertemente de la tasa de presurización de la perforación, en lugar de sí la roca es impermeable o permeable (Figura 5-19).



**Figura 5-19. Modelo de hidrofracturamiento de Detounay y Cheng como una función de  $\gamma$  cuando se da la condición de esfuerzo.**  
**Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [12].**

De acuerdo con la ecuación 5-5,  $P_c - P_o$  debe ser constante para las pruebas sin membrana, independiente de la magnitud de confinamiento o presión de poros, una vez  $h(\gamma)$  es dado. Sin embargo, los resultados muestran que  $P_c - P_o$ , aumenta linealmente con la presión de confinamiento o de poros (Figura 5-19). Esta discrepancia proviene del empleo de la ley esfuerzo efectivo de Terzaghi en la teoría D-C. Se consideró una ley más general y eficaz del esfuerzo efectivo para la falla a la tracción, según lo propuesto por Schmitt y Zoback (1989):

$$5-8 \quad \sigma_{ij}^{\text{eff}} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\beta P_o \quad (0 \leq \beta \leq 1)$$

Donde  $\beta$  es el parámetro del esfuerzo efectivo dependiendo del tipo de roca. Luego se modificó el criterio de fracturamiento hidráulico de D-C, basándose en la suposición de

que la falla ocurre cuando el esfuerzo efectivo es gobernado por la ley generalizada del esfuerzo efectivo (Ecuación 5-8) y es igual a la resistencia a la tracción. Entonces el modelo de fracturamiento hidráulico de D-C es expresado como:

$$5-9 \quad P_c - P_o = \frac{T_{hf} + 3\sigma_h - \sigma_H - (1+\beta)P_o}{1 + (\beta - 2\eta)h(\gamma)}$$

Para los ensayos en una muestra sin membrana, la ecuación 5-9 se expresa así:

$$5-10 \quad P_c - P_o = \frac{T_{hf} + (1+\beta)\sigma_h}{1 + (\beta - 2\eta)h(\gamma)}$$

Se cree que la hipótesis de la tensión efectiva para la falla a la tracción de la ecuación 5-9, debe ser cierta, no sólo en la fracturación hidráulica, sino también en cualquier otra condición.

### 5.2.6 Resultados del ensayo de fracturamiento hidráulico sin membrana

Se llevó a cabo varias series de pruebas de fracturación hidráulica en especímenes con membrana. El esfuerzo horizontal uniforme aplicado se mantuvo en el intervalo de 15-45 MPa, la presión de poros fue de entre 1-20 MPa; la tasa de presurización del sondeo fue de entre 10 y 60 MPa/seg. Se plotearon los datos experimentales en el dominio de  $[P_c - P_o]$  frente a  $[\sigma_h - P_o]$  empleando el criterio D-C (Figura 5-20).

En esta figura, se pueden ver que los datos se encuentran dispersos en la escala vertical, para un esfuerzo de confinamiento dado ( $\sigma_h - P_o$ ).

Por otro lado, al plotear los datos con un dominio de  $[P_c - P_o]$  frente a  $[2\sigma_h - (1+\beta)P_o]$ , donde  $\beta=0,72$  (determinado a partir de las pruebas sin membrana), se ajustan bastante bien a una relación lineal (Figura 5-21). La pendiente es una aproximación lineal de los datos experimentales en la Figura 5-19, donde  $h(\gamma)=0,75$ , cuando  $\eta=0,27$  (de la ecuación 5-3) y  $T_{hf}=8,0 \pm 2,3$  (MPa) para la roca arenisca.

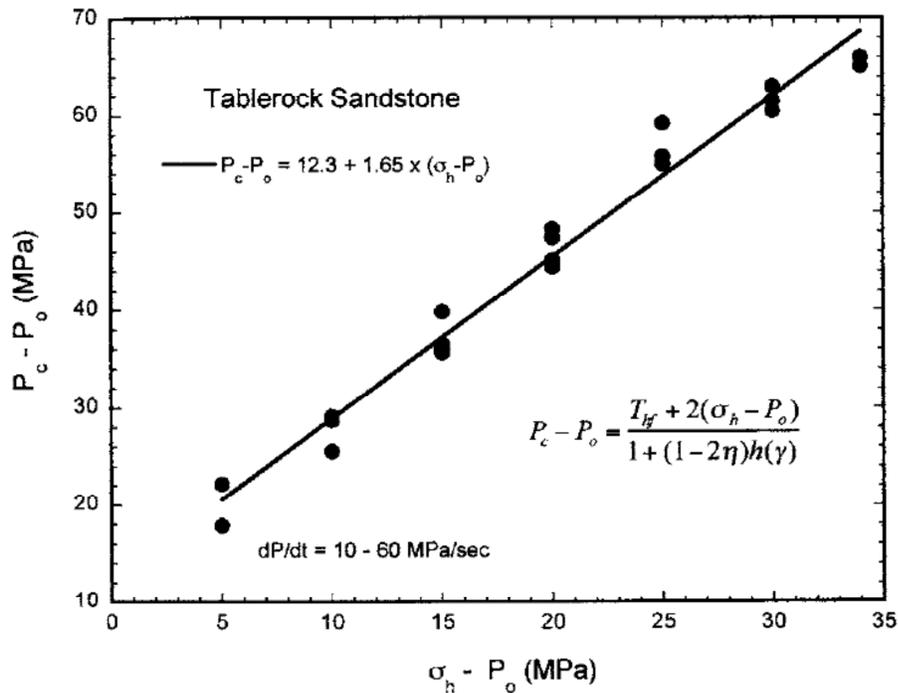


Figura 5-20. Compilación de los resultados del ensayo sin membrana, como  $P_c - P_o$  vrs  $\sigma_h - P_o$ , donde se aplicó la ley tensión efectiva del Terzaghi. Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [12].

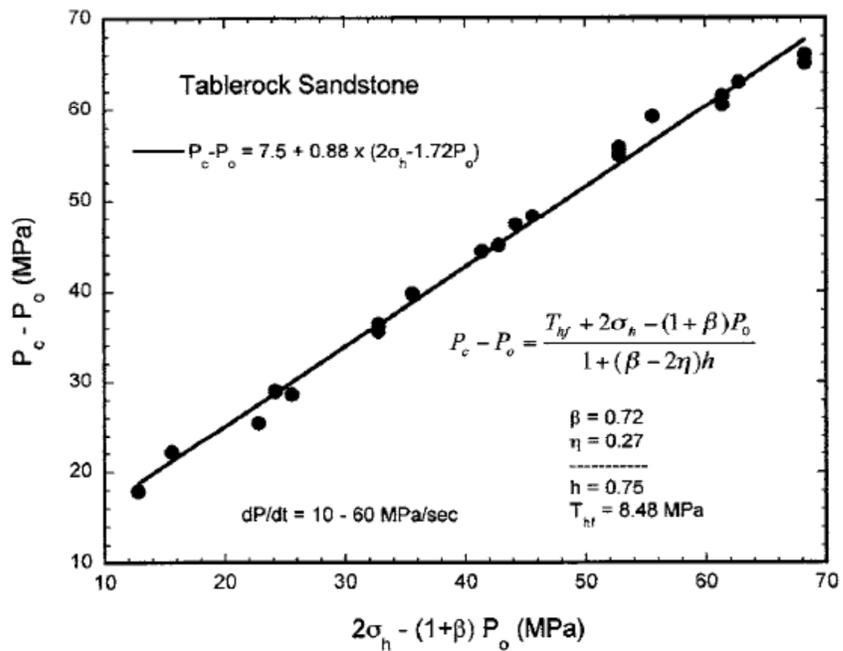


Figura 5-21. Compilación de los resultados del ensayo sin membrana, como  $P_c - P_o$  vrs  $2\sigma_h - (1 + \beta) P_o$ , donde  $\beta = 0.72$ . Fuente: SONG, SUH, WONG y HAIMSON [12].

### **5.2.7 Conclusiones**

Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio de fracturamiento hidráulico en cilindros huecos de roca arenisca, con el propósito de establecer una relación correcta entre la presión de ruptura y la tensión presentada en las areniscas de alta porosidad. Sobre la base de una serie de pruebas en las que hemos examinado efecto de la velocidad de la presurización en la presión de ruptura, donde el criterio del hidrofracturamiento de Detournay -Cheng (1992) se consideró como el más adecuado, ya que incorpora implícitamente tal efecto. Sin embargo, otra serie de pruebas en las que se varió la presión de confinamiento o presión de poros de una prueba a una velocidad de presurización dada, reveló que el criterio D-C, requiere de una modificación con el fin de interpretar correctamente los resultados de la prueba de fracturación hidráulica. Con la incorporación de una ley general de la tensión efectiva en el criterio D-C, se logró describir correctamente la relación entre la presión de ruptura y la tensión en alta porosidad de la roca arenisca.

Estos resultados son de importancia en la industria del petróleo, ya que muchos de estos se encuentran en las areniscas de alta porosidad, y el conocimiento de las condiciones del esfuerzo in-situ, obtenido de pruebas de fracturamiento hidráulico, es esencial para la estabilidad del sondeo y del diseño en campo petrolero.

## **5.3 ENSAYOS DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO PARA INVESTIGAR LAS PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN (LIBERMAN, M. [17])**

### **5.3.1 Introducción**

Para satisfacer la demanda de un crecimiento continuo en la producción de petróleo y gas, se han estado perforando los pozos cada vez más desafiantes. Los pozos son perforados a mayor profundidad que la profundidad del agua, con un mayor alcance horizontal y con pozos multilaterales que se perforan hacia fuera de un orificio madre. Por tal motivo, la geomecánica juega un papel clave en los planes de perforación y diseño de la carcasa de estos pozos complejos. La reducción de los costos de perforación y la mejora del rendimiento de perforación se han convertido en una prioridad para la industria en la planificación de estos pozos complejos, sin embargo los principales obstáculos están contribuyendo al aumento de los gastos y su complejidad.

La primera categoría de obstáculos, que no es controlable, se rige por el complejo entorno geológico presente en el momento de realizar las operaciones de perforación, al igual que las características geológicas de gran escala, tales como fallas y sal diapiro cerca del pozo que podría inducir a problemas de estabilidad del pozo si no se planifica bien. El segundo gran obstáculo presente en las operaciones de perforación, se refiere al

colapso del pozo o patada de líquido debido a la baja densidad del lodo de inyección. La tercera categoría de los obstáculos es la pérdida de líquidos en la formación, debido al alto peso del lodo, con potencial de atascamiento de la tubería y la pérdida de la integridad del pozo como resultado. Estos posibles escenarios, en los que el peso del lodo se ha diseñado de forma incorrecta, podría en última instancia, producir no sólo que se queden atascada la barra de perforación y perder parte del equipo. Por lo tanto, tener una mejor comprensión del proceso de peso del lodo y la ventana operativa del peso del lodo, es el factor clave para lograr menores costos de operación de perforación, así como la creación de un estándar de HSE superior.

Hay varias teorías que compiten con respecto a la forma de aumentar el gradiente de la fractura y hay varios métodos analíticos y numéricos para calcular el gradiente de la fractura. Sin embargo estos métodos no incluyen el cambio de los tipos de fluidos del gradiente de la fractura sobre la base de la perforación. El uso de materiales de pérdida de circulación (LCM Loss Circulation Materials) para evitar la disminución de líquidos y fortalecer el pozo, es el principal método empleado por la gran mayoría de la industria para evitar la pérdida de líquidos, así como otras cuestiones relacionadas con el pozo, durante la perforación. Por lo tanto, la realización de experimentos de fracturamiento hidráulico dará lugar a una comprensión más profunda del LCM, así como medir el efecto de los diferentes fluidos de perforación y aditivos de fluido en el gradiente de la fractura.

El objetivo de este artículo fue desarrollar y probar un modelo a escala del pozo bajo condiciones in-situ que se utilizará para la comparación y validación de los modelos analíticos y numéricos que describieron el fenómeno de la presión de fractura y permitieron investigar las variables más importantes que están presentes en las técnicas conocidas del fortalecimiento del pozo, como la descomposición y la presión de reapertura. Para lograr los objetivos de esta investigación, estos objetivos se dividieron en los siguientes tres temas;

- Desarrollar y probar un aparato celular de fracturamiento de pozos a escala.
- Validar los resultados de los modelos analíticos
- Investigar en efecto de la concentración de bentonita y el  $\text{CaCO}_3$  en el gradiente de fractura.

Mediante la realización de experimentos de laboratorio, se pudo lograr una representación de diferentes formaciones bajo una amplia gama de tensiones in situ. Las implicaciones de la realización de experimentos de laboratorio no sólo ayudan en la validación de los modelos de fractura, sino también para poner a prueba la eficacia de curación de diferentes materiales de circulación pérdida, y su capacidad de curar fracturas. Los experimentos pueden ser realizados en una amplia gama de formaciones geológicas, así como de fluidos de perforación.

### 5.3.2 Ensayo de Fracturamiento hidráulico en cámara de confinamiento

En la Figura 5-22, se muestra el montaje de la cámara, para la realización de ensayos de fracturamiento hidráulico. El montaje experimental, el sistema de adquisición de datos, la preparación y el procedimiento básico se explicarán en detalle.

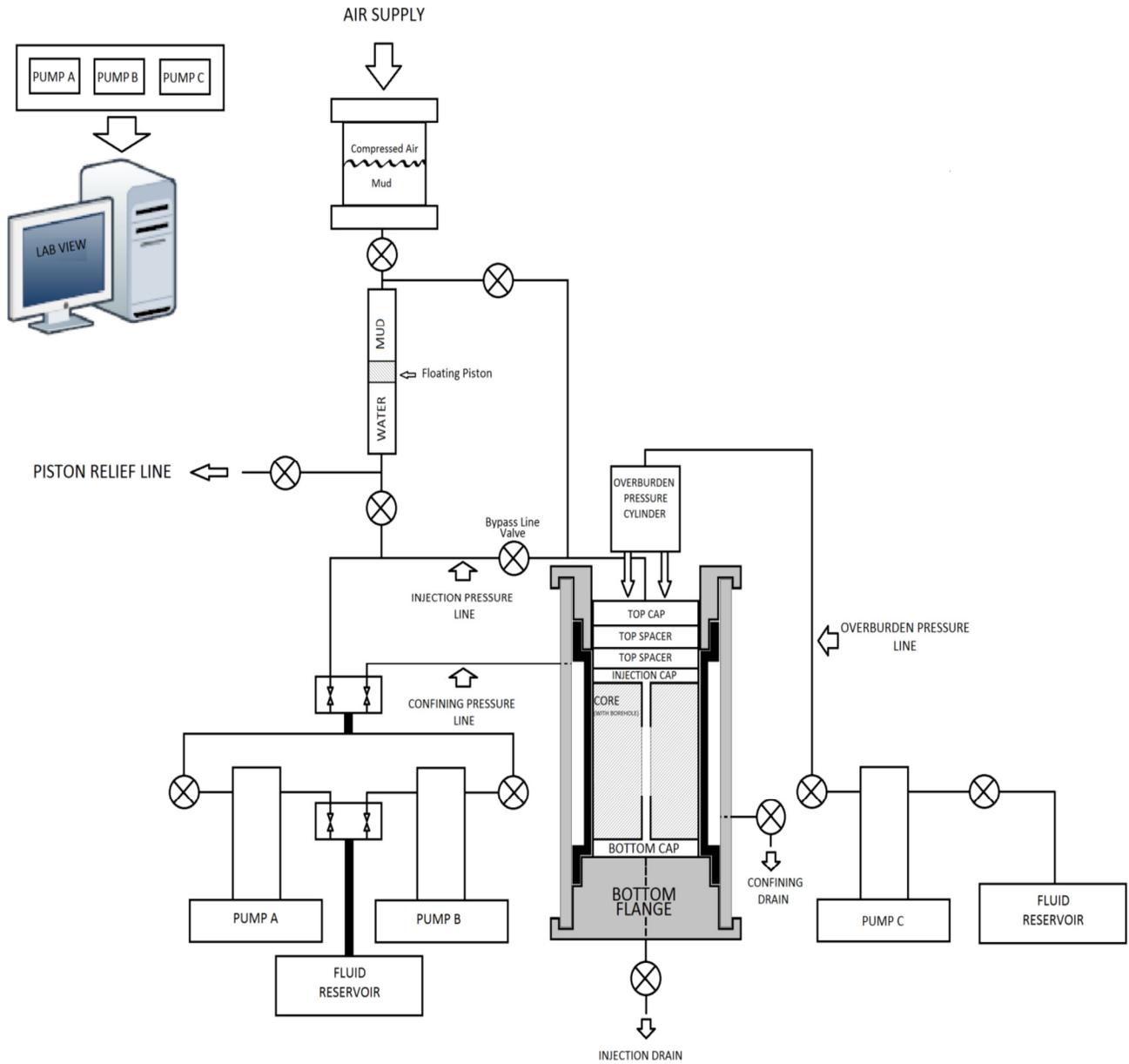
- Sistema de bomba y de distribución de fluidos.

Las bombas tipo jeringa ISCO DX100, de alta presión (10.000 psi), bajo volumen (100 ml) se utilizaron para construir y aplicar presión en el interior del aparato de fracturamiento hidráulico, ya sea para confinar o fracturar. El fluido con que estas bombas funcionan se obtiene a partir de un recipiente de plástico o de acero inoxidable utilizado como tanque de almacenamiento. Cada bomba tiene una válvula de entrada que permite que el flujo del fluido entre al pistón de la bomba para el llenado o también descarga de todo el contenido. Ambas bombas comparten el mismo tubo de entrada en el tanque de almacenamiento, lo que permite volver a llenar las dos bombas al mismo tiempo. El tubo utilizado que permite la distribución del fluido hacia y desde las bombas, así como en el aparato, es de diámetro exterior de 1/8" y 1/4" de acero inoxidable. Cada bomba tiene una válvula de salida, evitando que el sistema se despresurice durante su relleno. La Figura 5-23, muestra las bombas tipo jeringa ISCO DX100 utilizados para bombear fluido en el aparato.

- Acumulador.

Un tubo de acero inoxidable con un pistón interno se diseñó para acumular e inyectar fluidos de perforación en la muestra central. Las bombas de jeringa utilizados no fueron diseñados para manejar fluidos de perforación, por lo tanto, un acumulador, como se muestra en la Figura 5-24, carga con el lodo de perforación deseado y luego por medio de la inyección de agua por debajo del pistón, el lodo se transfiere y se inyecta en el núcleo de la muestra.

De la Figura 5-24, se puede ver que el agua se suministra desde las bombas a la parte inferior del pistón en el acumulador. El lodo se transfiere al acumulador mediante el llenado de un cilindro de plástico y luego la aplicación de aire comprimido para forzar el barro dentro del acumulador. Entonces, la presión es construida por debajo del pistón que desplaza el lodo al núcleo de la muestra.



**Figura 5-22. Montaje del ensayo.**  
**Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].**



Figura 5-23. Bombas ISCO DX100 tipo jeringa.  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

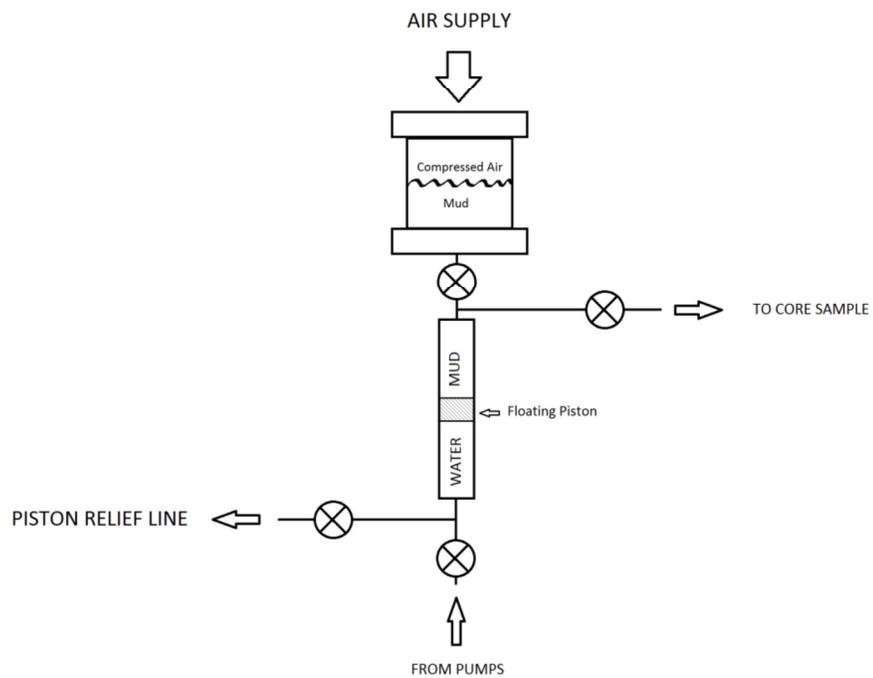
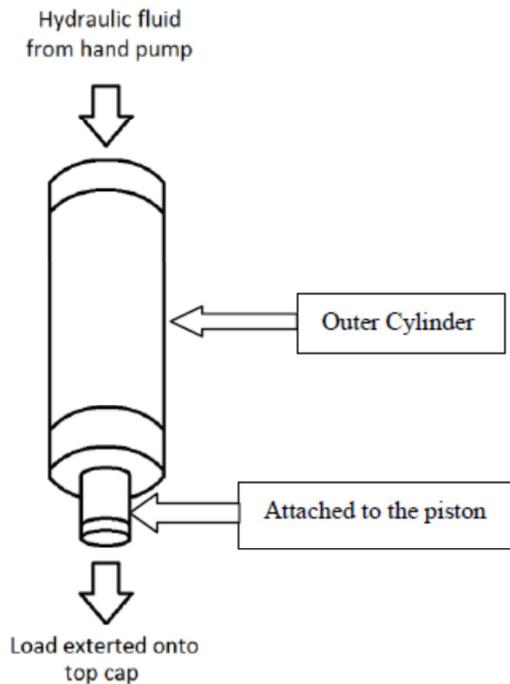


Figura 5-24. Sistema de acumulador de lodo.  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

- Pistón hidráulico.

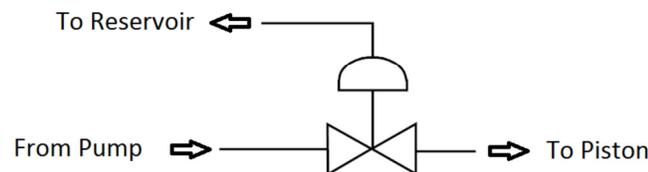
La bomba hidráulica "manual" está conectada a un pistón situado en la parte superior del estructura de aparato (Véase Figura 5-25). El único propósito de este pistón fue aplicar carga axial en la tapa superior, creando así un esfuerzo de sobrecarga dentro del núcleo.



**Figura 5-25. Pistón de sobrecarga.**  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

- Regulador de presión en línea.

Un regulador de presión, como se muestra en la Figura 5-26, fue montado entre la bomba de mano y el pistón y se usó para evacuar el fluido hidráulico en caso de que la presión dentro del pistón excediera la presión deseada.



**Figura 5-26. Válvula de sangrado.**  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

- Manga de goma.

Una cubierta de caucho fue utilizada para aplicar presión de confinamiento en el interior del aparato de fracturación hidráulica. La presión se acumuló en el espacio entre el cilindro de acero inoxidable y el manguito de goma, así como se aumentó la presión en el manguito de goma, la muestra del núcleo se confinó hasta que se alcanzó la presión deseada.

- Cilindro de acero inoxidable.

Un cilindro de acero inoxidable se colocó sobre el manguito de goma y se apoyó en la tapa inferior. Este cilindro se utilizó como un recipiente a presión para contener el fluido a alta presión usado para aplicar esfuerzos de confinamiento sobre la muestra del núcleo. También sirvió como asiento y el apoyo a la tapa superior.

- Todas las Varillas Hilo.

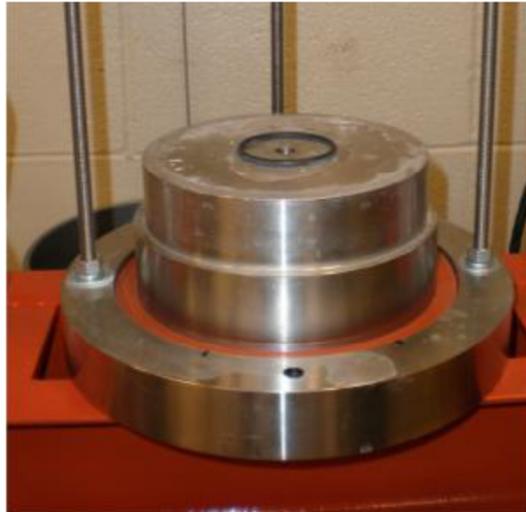
Todas las seis varillas de rosca montados en la viga I, se utilizaron para asegurar y sujetar hacia abajo la tapa superior sobre el cilindro de acero inoxidable, creando así un sello para el manguito de goma, que evitó las fugas de la cámara de confinamiento en la sección superior de la muestra del núcleo.

- Tapa Inferior

La tapa inferior, que está atornillada a una viga I, sirvió de base y apoyo del aparato de fracturamiento hidráulico. La tapa inferior tuvo varios propósitos:

- Servir de soporte de núcleo.
- Brindar apoyo para el cilindro de acero inoxidable.
- Brindar apoyo para el manguito de goma.

Es importante señalar que el manguito de goma se pegó con silicona transparente en el soporte de núcleo para evitar fugas. El ala inferior se muestra en la Figura 5-27.



**Figura 5-27. Tapa inferior.**  
**Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].**

- Tapa superior.

La tapa superior, se muestra en la Figura 5-28, y fue similar a la tapa inferior. Tiene una abertura en el centro para que las muestras de núcleo se puedan colocar a la derecha del aparato. Se apoyó sobre el cilindro de acero inoxidable y el manguito de goma. Esto proporcionó un sello entre estos dos para evitar fugas, impidiendo así pérdidas de presión de confinamiento.

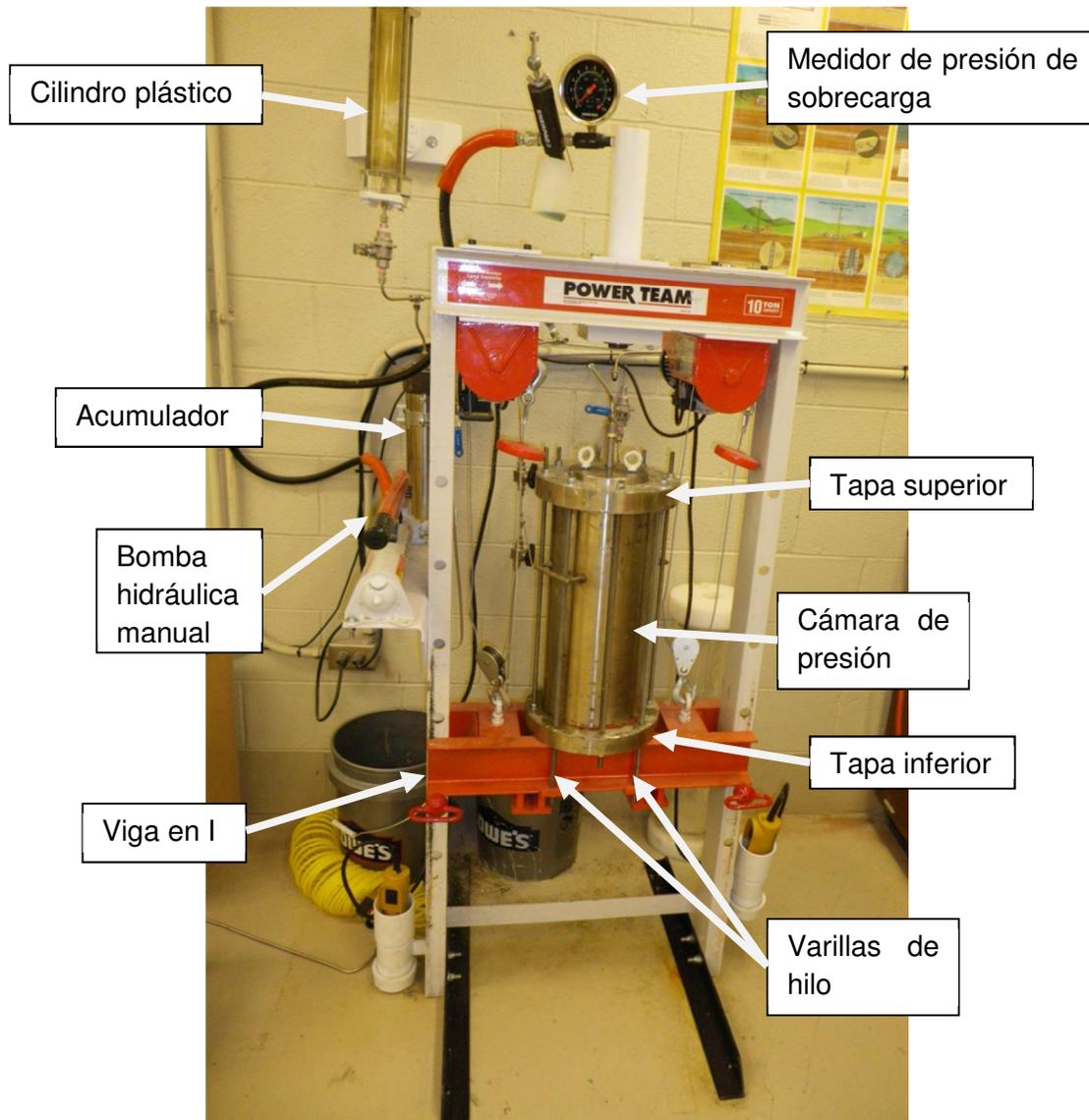


**Figura 5-28. Tapa superior.**  
**Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].**

- Marco del aparato de fracturamiento hidráulico.

El marco (véase Figura 5-29), sirvió como un soporte para el aparato de fracturación hidráulica. La tapa inferior descansó sobre una viga en I que podía viajar en la dirección

vertical, por dos tornos operados hidráulicamente. La bomba de mano, que acciona el pistón montados en la parte superior del marco, se encuentra en el lado izquierdo del marco. El marco tiene varios orificios permitiendo que la viga en I se apoyara en diferentes alturas.



**Figura 5-29. Montaje del aparato de fracturamiento hidráulico.**  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

### 5.3.3 Adquisición de Datos.

Con el fin de registrar la presión a la que la bomba está inyectando el fluido de fracturación a la muestra del núcleo, el software proporcionado por el fabricante de la bomba fue empleado. Este software tuvo la capacidad de operar y registrar los parámetros de la bomba de forma remota desde un ordenador. Esto por medio de un cable serial especial establecido así por el fabricante de la bomba, el controlador de la bomba está conectado a un puerto serial RS-232 en el equipo. El software almacenó los datos generados por la bomba. Sin embargo, los datos tal como aparece en el archivo original, debieron ser manipulados de una manera que permitiera al usuario ver los datos reales. Los factores que corresponden a dicha interpretación se pueden encontrar en el manual de la bomba de ISCO. Además de registrar la presión de inyección de una bomba, un indicador de presión fue instalado en la línea de inyección, con el fin de comparar los valores y medir las pérdidas de carga en el sistema.

### 5.3.4 Procedimientos para el funcionamiento experimental del ensayo de fracturamiento hidráulico

Los procedimientos para el funcionamiento experimental de operación del ensayo de fracturamiento hidráulico se dividieron en las siguientes categorías:

1. Preparación del núcleo de la muestra.
2. Operación del aparato de la fractura hidráulica.
3. Preparación de los fluidos para el fracturamiento.
4. Medición de resistencia a la tracción de la roca.

A continuación se describen detalladamente cada una de ellas.

#### 1. Procedimiento básico de preparación de muestras

El proceso de preparación de la muestra del núcleo es muy riguroso e interesante. Los procedimientos deben ser cuidadosamente adheridos a todas las etapas. Cada proceso impacta en el éxito de la siguiente etapa y en última instancia al núcleo para ser colocado sin ningún problema en la celda de presión de fracturamiento hidráulico para la prueba. Los siguientes son los pasos de preparación de núcleos de arenisca para la operación del fracturamiento hidráulico:

- Recoger losas rectangulares de afloramiento de arenisca en canteras.
- Taladrar núcleos cilíndricos con una extracción de muestras de broca de 5 $\frac{3}{4}$ " de la losa rectangular usando la taladradora.
- Corte ambos lados de la superficie del núcleo cilíndrico con la sierra de la losa. Esto corta la superficie rugosa para la preparación del pulido de la superficie.

- Triturar la superficie de corte con la afiladora hasta lograr una superficie plana.
- Taladrar una perforación en el centro del núcleo con una broca de ½" utilizando el taladro.
- Fijar tapas de acero cilíndricas a cada lado del núcleo usando gel de epoxi.
- Aspirar el centro del núcleo durante 24 horas en cámara de vacío para eliminar el aire de los poros del núcleo.
- Deje correr el agua en la cámara de vacío y remoje el núcleo durante 3 horas para saturar completamente los poros de la roca con el agua y aumentar la presión de poros, antes de colocarlos en el núcleo de celda de presión para la prueba.

## 2. Operación del aparato de la fractura hidráulica.

El siguiente fue el procedimiento general que continuó en la realización de los experimentos de fractura hidráulica.

- Vaciar el acumulador de todo el fluido de perforación. Esto aseguró que no había mezcla del fluido de perforación fresco, con el fluido de perforación previamente utilizado para ejecutar los experimentos.
- Colocan el anillo en la parte inferior del soporte de la base. Esto evitó que el fluido de fracturación se escapara de la parte inferior de la boca del pozo en la cámara de celda de presión.
- Colocar suavemente el núcleo preparado anteriormente, en el soporte de núcleo o celda de presión.
- Acoplar el aparato a la base, cierre la válvula de salida de confinamiento y apertura de la válvula de entrada de confinamiento.
- Aplicación de presión de sobrecarga hasta que la presión deseada (400 psi o 2,76 MPa).
- Llenar de confinamiento hasta que la presión deseada (100 psi o 0,69 MPa).
- Volver a llenar el acumulador de lodo con el lodo deseado.
- Eliminar el aire del acumulador.
- Abrir el software de la bomba ISCO en la computadora.
- Asignar un nombre al proyecto y hacer clic en la marca de verificación en la pantalla para aceptar los cambios.

- Conectar la bomba a la computadora haciendo clic en la flecha de conexión en la pantalla.
- Comprobar que las bombas estaban completamente llenas y que todas las válvulas estaban en las posiciones requeridas.
- Se hizo clic en 'Record' en la pantalla del ordenador y se empezó a grabar.
- Se empezó inyectando fluido de fracturamiento en el núcleo en 5 ml/min.
- Se detuvo la inyección después de que ocurrió la fractura. Esto se observó cuando la presión de inyección cayó en forma abrupta y la presión de confinamiento aumentó.
- Se despresurizó el sistema y se permitió que la fractura se curara durante 10 minutos.
- Se empezó a bombear el segundo ciclo hasta que la rotura se produjo.
- Se detuvo la grabación.
- Se desacopló el aparato y se llenó las bombas.
- Se retiró el núcleo y se limpió el aparato.

### 3. Mezcla de fluidos para el fracturamiento.

Se utilizaron dos tipos de fluido para el ensayo de fracturamiento hidráulico. El agua y la bentonita. Se maneja el agua pura y una mezcla de agua con un porcentaje de bentonita, entre 6% y 8%.

### 4. Medición de resistencia a la tracción de la roca.

La medición de este parámetro se realizó normalmente en cualquier laboratorio calificado.

## 5.3.5 Programa de ensayos

Con el fin de resumir el programa de pruebas seguido a lo largo de este trabajo, la Tabla 5-4 muestra todos los parámetros de entrada. Esta tabla muestra las propiedades mecánicas de los materiales que fueron probados, así como las dimensiones principales y el material utilizado para cada núcleo. También muestra el fluido utilizado para fracturar los núcleos y sus principales propiedades importantes, tales como la densidad del fluido, punto de fluencia y la viscosidad plástica. Por último, los esfuerzos aplicados a la base para cada experimento también se pueden encontrar en la misma Tabla 5-4.

**Tabla 5-4. Parámetros de entrada de los ensayos.**  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

Ensayo #	Material	Muestra			Fluido de fractura	Velocidad de flujo (ml/min)	Densidad (lb/g)	$\sigma_{2,3}$ (PSI)	$\sigma_v$ (PSI)
		Longitud (in)	Diámetro (in)	Diámetro Perforación (in)					
1	Dolomita	8,50	5,75	0,5	Agua	50	8,33	600	48
2	Dolomita	8,50	5,75	0,5	8% Bentonita	50	9	200	400
3	Dolomita	8,75	5,75	0,5	Agua	50	8,33	600	48
4	Arenisca	8,75	5,75	0,5	8% Bentonita	50	9	200	400
5	Concreto	9,00	5,75	0,5	4% Bentonita	5	8,6	200	400
6	Concreto	9,00	5,75	0,5	6% Bentonita	5	8,8	200	400
7	Concreto	9,00	5,75	0,5	6% Bentonita (CMC)	5	8,7	200	400
8	Concreto	9,00	5,75	0,5	6% Bentonita (CMC + CaCO <sub>2</sub> )	5	9	200	400

### 5.3.1 Resultados

Este capítulo presenta los resultados experimentales de fracturamiento hidráulico con la intención de analizar y entender el fenómeno de fracturamiento hidráulico. Tener la capacidad de reproducir las tensiones o esfuerzos del fondo del pozo y muestras de fractura hidráulica da la ventaja de producir datos reales permitiendo construir correlaciones entre el modelo de laboratorio y los resultados numéricos. Todas las pruebas se realizaron en muestras con 5.75 "de diámetro, con un pozo de 0,5". La longitud del núcleo dependió del espesor de la losa de roca, pero la longitud del núcleo tuvo una relación de al menos 1:1 entre el diámetro del núcleo y la altura de la muestra para evitar los efectos finales. La Tabla 5-5, muestra los resultados de los ensayos realizados.

**Tabla 5-5. Resumen resultados de los ensayos.**  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

Ensayo #	Material	$\sigma_{2,3}$ (PSI)	$P_{frac}$ (PSI)	$P_{re-apertura}$ (PSI)	Orientación Fractura	$\sigma_v$ (PSI)	Velocidad de flujo (ml/min)	$\frac{\sigma_{2,3}}{\sigma_v}$ (PSI)
1	Dolomita	600	1150	-	Horizontal	48	50	12,5
2	Dolomita	200	3700	2100	Vertical	400	50	0,5

Ensayo #	Material	$\sigma_{2,3}$ (PSI)	$P_{frac}$ (PSI)	$P_{re-apertura}$ (PSI)	Orientación Fractura	$\sigma_v$ (PSI)	Velocidad de flujo (ml/min)	$\frac{\sigma_{2,3}}{\sigma_v}$ (PSI)
3	Dolomita	600	2224	-	Horizontal	48	50	12,5
4	Arenisca	200	1928	1794	Vertical	400	50	0,5
5	Concreto	200	1855	1422	Vertical	400	5	0,5
6	Concreto	200	2188	1856	Vertical	400	5	0,5
7	Concreto	200	2310	2115	Vertical	400	5	0,5
8	Concreto	200	2363	1863	Vertical	400	5	0,5

De la Figura 5-30 a la Figura 5-37, se muestran la gráficas de la presión de inyección versus tiempo para los ensayos realizados.

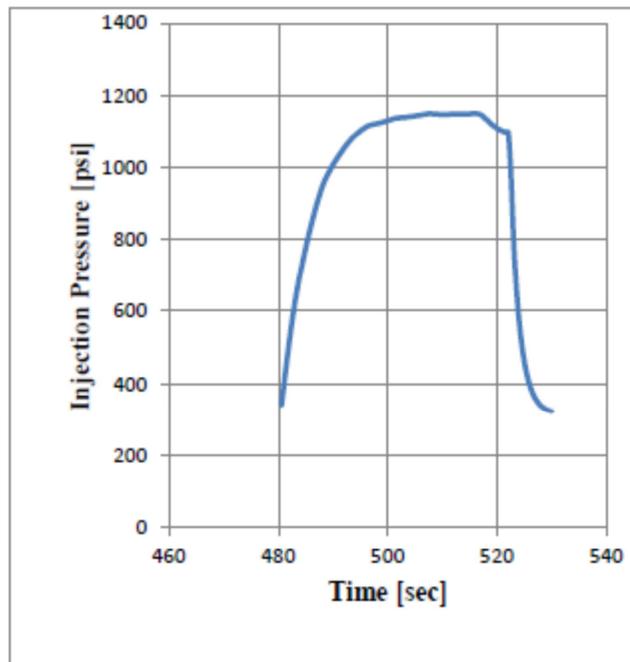
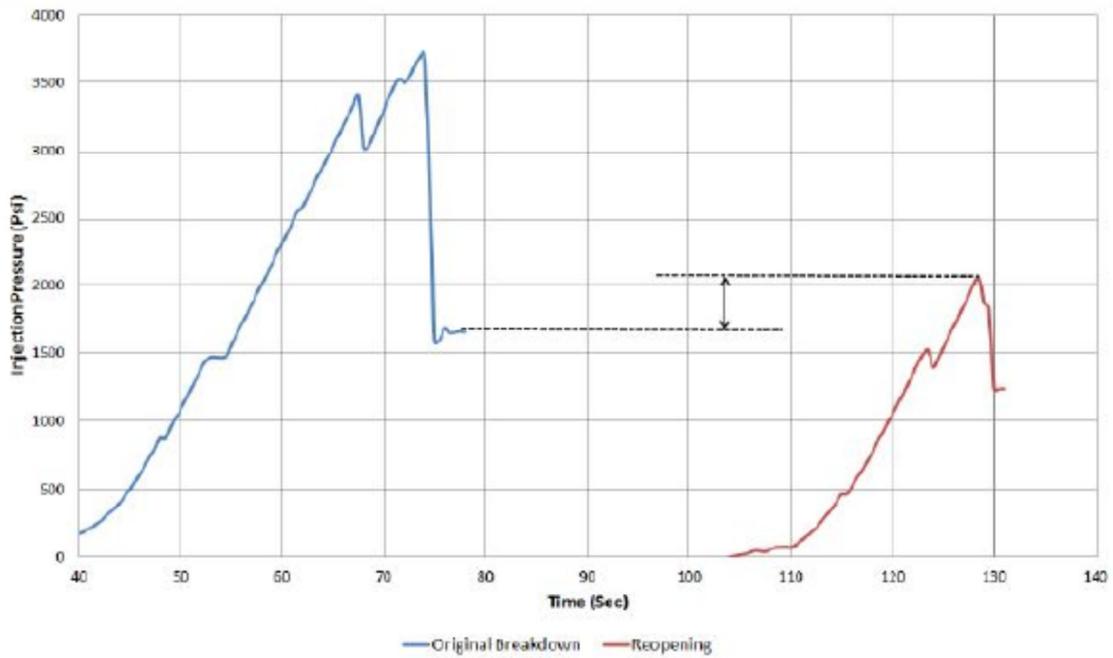
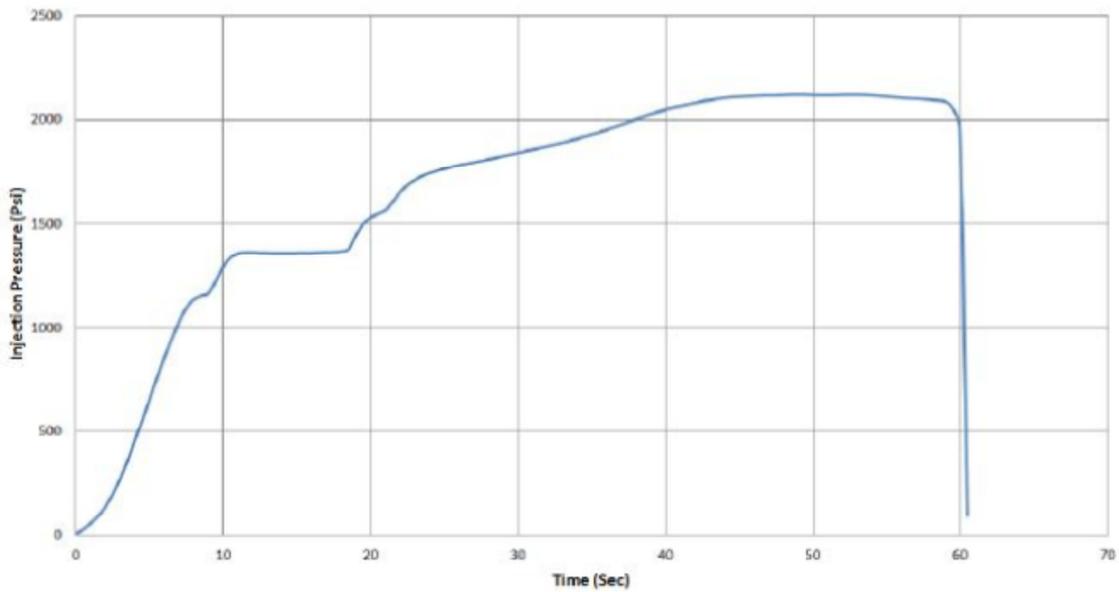


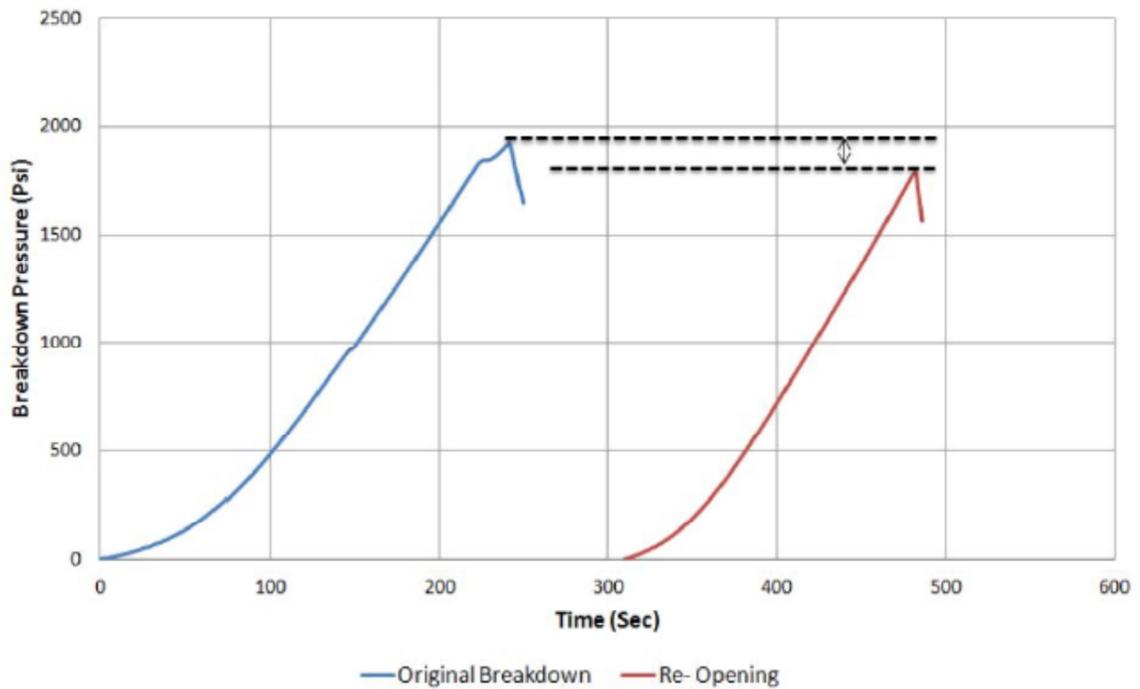
Figura 5-30. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 1.  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].



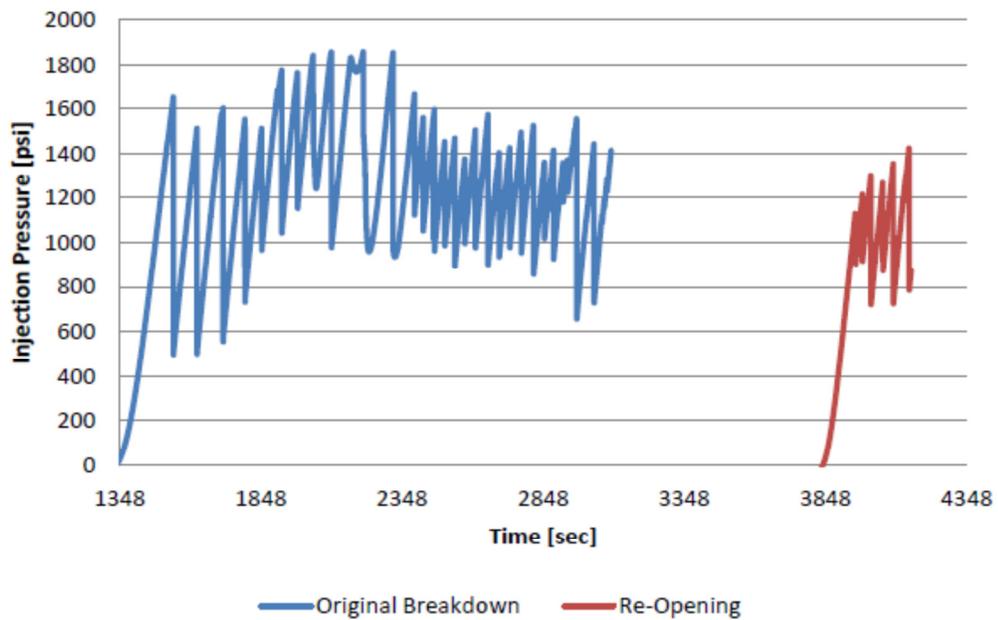
**Figura 5-31. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 2.**  
 Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].



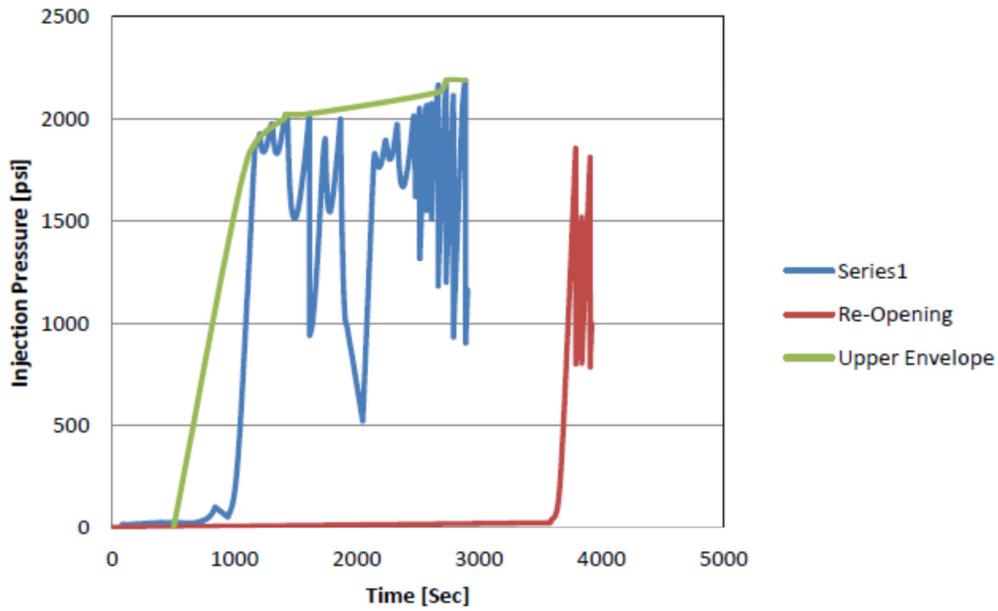
**Figura 5-32. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 3.**  
 Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].



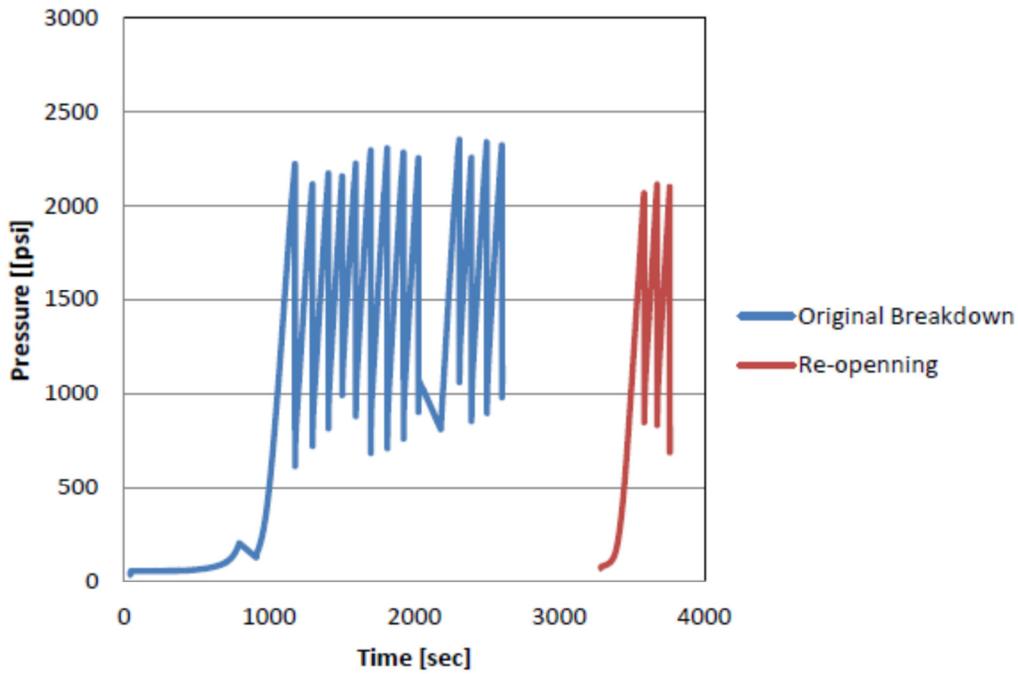
**Figura 5-33. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 4.**  
 Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].



**Figura 5-34. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 5.**  
 Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].



**Figura 5-35. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 6.**  
 Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].



**Figura 5-36. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 7.**  
 Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

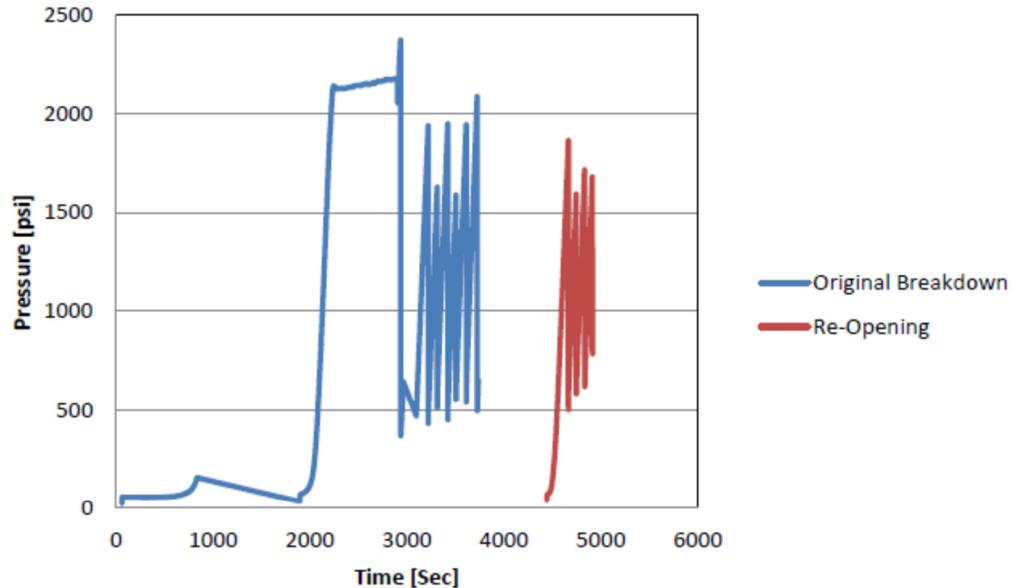


Figura 5-37. Presión de inyección versus tiempo, ensayo 8.  
Fuente: LIBERMAN, M. (2012).[17].

### 5.3.1 CONCLUSIONES

Se realizaron pruebas de fracturamiento hidráulico utilizando un aparato de celda de presión desarrollado y probado en las instalaciones de la Universidad de Missouri de Ciencia y Tecnología.

Durante este proceso varias pruebas se realizaron utilizando la dolomita, piedra arenisca, así como núcleos de hormigón. Como se demostró a lo largo de los experimentos de laboratorio, la heterogeneidad de las muestras de roca recogidas de canteras locales ceden a presiones más bajas de la fractura en la dolomita (cuando se fracturó de forma natural) y areniscas en comparación con hormigón. Sólo un núcleo de la dolomita en la Prueba 2, mostró una presión de disgregación original mayor. La dolomita y arenisca tuvieron propiedades mecánicas superiores que el concreto, por lo que produjeron presiones de degradación más alta.

Sin embargo, cuando se logró un ciclo de re-apertura, las presiones obtenidas fueron muy cercanas en valor, a pesar de la litología o del fluido de fracturación. Una razón para esto es que pueda suceder que las tensiones están directamente impuestas por el aparato, a la fractura en el núcleo, ya que es el único mecanismo que tiene una implicación directa en el cierre de la fractura.

Cuando el aumento de la concentración de bentonita fue del 4 al 6%, una tendencia en aumento de la presión en la disgregación original fue identificado junto con un aumento en la presión de re - apertura.

Aunque el  $\text{CaCO}_3$  se utilizó en el 6% de bentonita a base de agua-lodo, no mostró un desglose original o presión de re-apertura significativamente más alto que un 6% de bentonita a base de agua-lodo sin aditivos. Esto podría estar relacionado con una variedad de razones, especialmente con el tiempo de curado del hormigón, desde que se realizó la prueba, con un curado (28 días tiempo de curado), en lugar de en un tiempo de curado 7 días, como fue en el caso del primer experimento en concreto.

## **5.4 ENSAYO DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN UN MARCO POLIAXIAL DE CARGAS (CASAS [18])**

### **5.4.1 Introducción**

Pruebas con modelos físicos son de gran valor para determinar los fenómenos relevantes de propagación de la fractura hidráulica, ya que permiten mediciones que no están disponibles en el campo. Sin embargo, no se puede por lo general correlacionar sus resultados directamente a las aplicaciones de campo debido a problemas de escala. El objetivo final de esta investigación fue proporcionar un punto de referencia para los modelos numéricos que puedan representar la física esencial del proceso.

Se han realizado muchos ensayos de fracturamiento hidráulico en laboratorio a escala de los modelos físicos, donde se le dió una limitada consideración de las diferencias de escala en el diseño y la interpretación de los resultados. A menudo, estas pruebas han mostrado ser bastante impredecibles, a menudo "errantes" y la propagación de la fractura "ramificadas", que puede haber resultado de condiciones de prueba y puede o no ser representativa de las condiciones de campo.

En la búsqueda de mejorar la comprensión del crecimiento en longitud de la fractura y mecanismos de contención, el experimento intentó recrear la propagación de la fractura observada a escala de campo, a pesar de que existe una gran diferencia entre las escalas de fracturas generadas en ensayos de laboratorio y en aplicaciones de campo. Para ello, las leyes de escala se han desarrollado para diseñar e interpretar las fracturas hidráulicas de laboratorio en escala que ofrecen la posibilidad de hacer algunas inferencias respecto a la naturaleza de las fracturas a escala de campo. Las leyes del modelo que relacionan los parámetros experimentales del modelo físico con los parámetros del prototipo a escala de campo, se utilizaron para llevar a cabo la prueba de bloque e interpretar algunas de las observaciones experimentales.

El experimento fue diseñado para llevar a cabo dos pruebas en un bloque grande. Se examinaron dos condiciones para la propagación de la fractura hidráulica:

1. Fractura # 1 que se extiende a través de una sección sin defectos del bloque (mecanismos de punta)
2. Fractura # 2 (normal a fracturar # 1) interceptar las articulaciones artificiales en ángulo colocados a cada lado de la boca del pozo centrado (contención de la fractura), como se ve en la Figura 5-38.

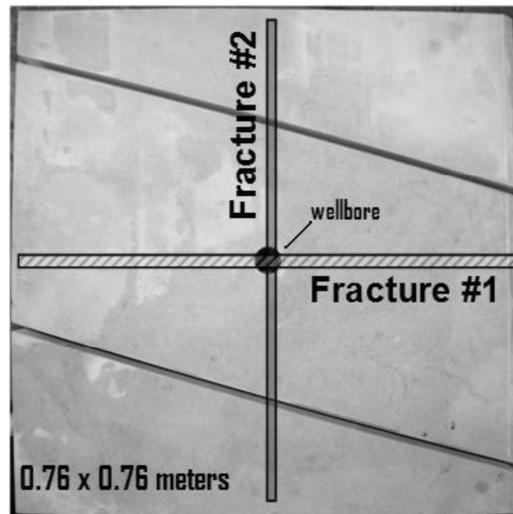


Figura 5-38. Vista desde arriba del bloque con sus fracturas.  
Fuente: CASAS [18].

### 5.4.1 Material

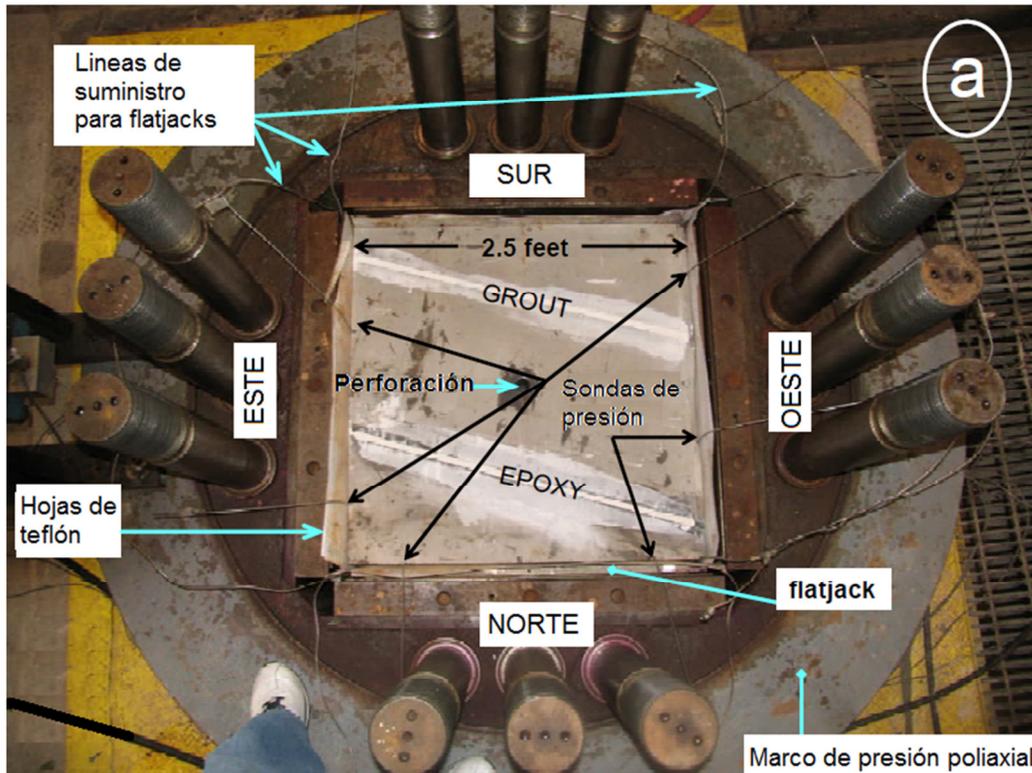
La arenisca de Colton correspondió con un afloramiento de rocas del Eoceno del centro de Utah, visualmente homogéneo y de baja permeabilidad. Esta roca, junto con la inyección de un fluido de fracturación de alta viscosidad, se pensó que era ideal para el crecimiento estable de las fracturas planas, sin efectos de pérdida de fluido, y razonables tiempos de inyección. La Tabla 5-6, presenta las propiedades físicas de la roca determinadas en el laboratorio.

Tabla 5-6. Especificaciones para el fluido de fracturación de aceite de silicona  
Fuente: CASAS [18].

Porosidad (%)	Permeabilidad Gas (mD)	Módulo de Young (GPa)	UCS (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia la tracción (MPa)
10,20	0,19	9,04	69,36	0,22	3,69

### 5.4.2 Marco poliaxial de carga y la línea hidráulica de inyección de fluidos

El marco de carga poliaxial, es una estructura que contiene una cámara de prueba cúbica. Se genera un cierto estado de tensión triaxial en la muestra cúbica mediante la presurización de bombas llenas de agua llamados flatjacks. Su planta es rectangular y construida de acero inoxidable de calibre ligero. Los flatjacks se colocan en cada cara de la muestra cúbica, con láminas de teflón en el medio para ayudar a minimizar la fricción (véase Figura 5-39).



**Figura 5-39. Montaje del ensayo. Fotografía desde arriba, antes de ser sellado.**  
Fuente: CASAS [18].

La Figura 5-41, muestra un esquema del bloque visto desde el interior del recipiente a presión. Fluido de fracturación se desplaza a la sección abierta de la perforación por medio de una bomba intensificadora servo controlado. La conexión entre el intensificador y el pozo es un tubo de acero inoxidable sin fisuras de 0,375 pulgadas (diámetro externo) x 0,245 pulgadas (diámetro interno) o línea de inyección. Esta línea de inyección es conectada con el pozo del sondeo a través de un tapón de sellado fijo en el extremo superior de la perforación. El volumen en el pozo del sondeo se redujo en un 86% mediante la colocación de una barra espaciadora dentro de la perforación para mitigar los efectos dinámicos al inicio de la fractura (crecimiento inestable de la fractura) originado por el volumen muerto de la perforación y/o compresibilidad del fluido de fracturación. La

presión de la perforación se monitorizó continuamente hasta que el cierre por un transductor de 20.000 psi conectado a la entrada de la perforación.

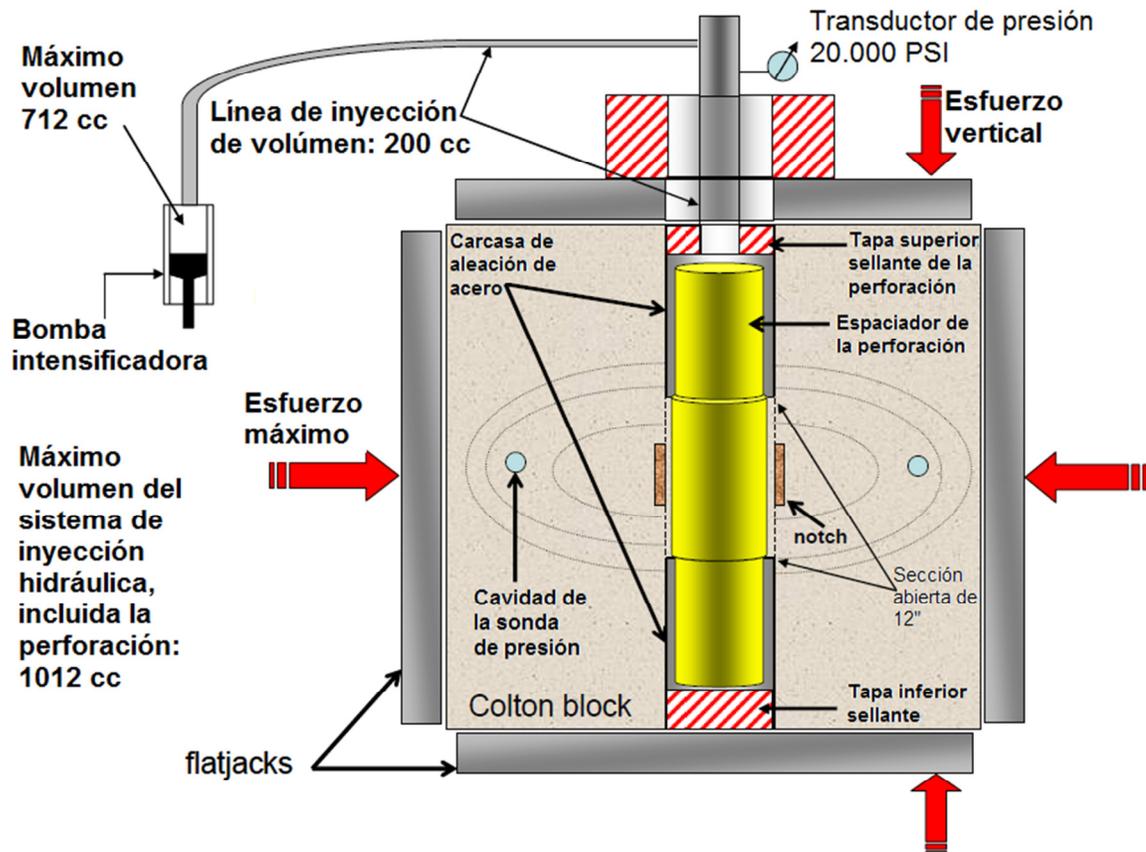
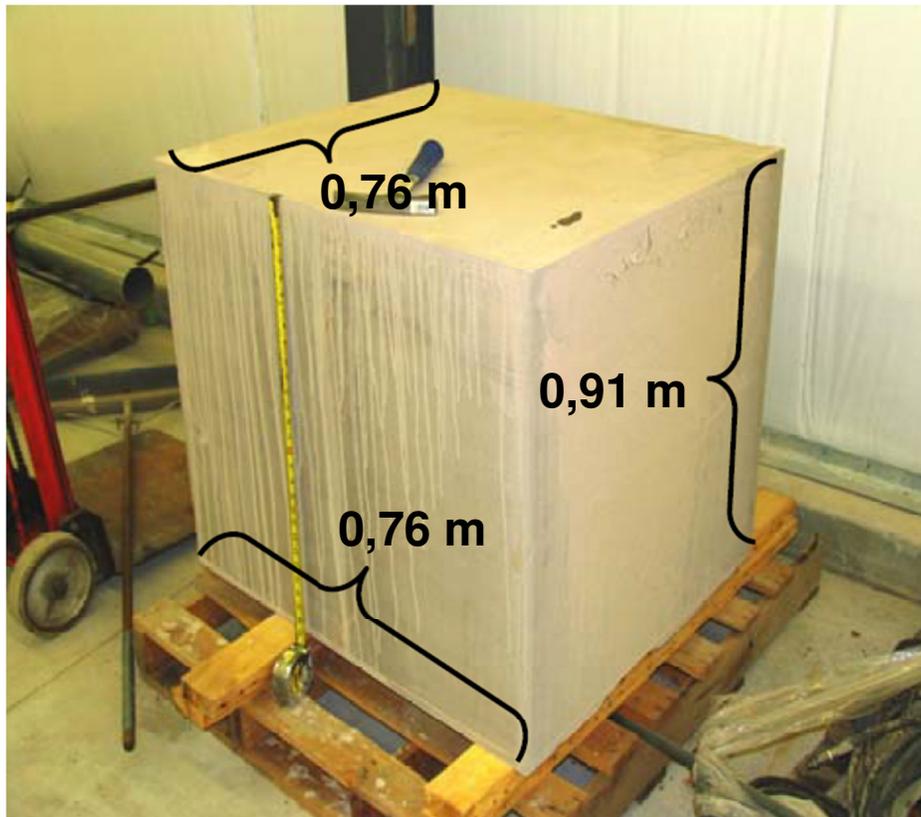


Figura 5-40. Componentes por dentro de la cámara.  
Fuente: CASAS [18].

### 5.4.3 Preparación de la muestra para el ensayo

Para realizar este tipo de ensayo, fue necesario cortar la muestra de roca hasta que tuviera las dimensiones de 0,76 m (30") x 0,76 m (30") x 0,91 m (36"). Se perforó un agujero de 38,1 mm de diámetro en el centro de la muestra a lo largo de toda la altura del bloque, utilizando un equipo de perforación. Cada extremo de la perforación se entubo con camisas de acero de aleación para así eliminar los efectos de los extremos y aislar el inicio de la fractura en la porción central, con 30 cm de espesor. Para facilitar el inicio de la fractura se realizaron 4 rasgaduras verticales (o se pueden realizar sólo 2) en las paredes de la perforación (profundidad: 6,35 mm; anchura: 3,18 mm y altura: 51,00 mm) a 90 grados de separación el uno del otro, en la parte central de la sección abierta.

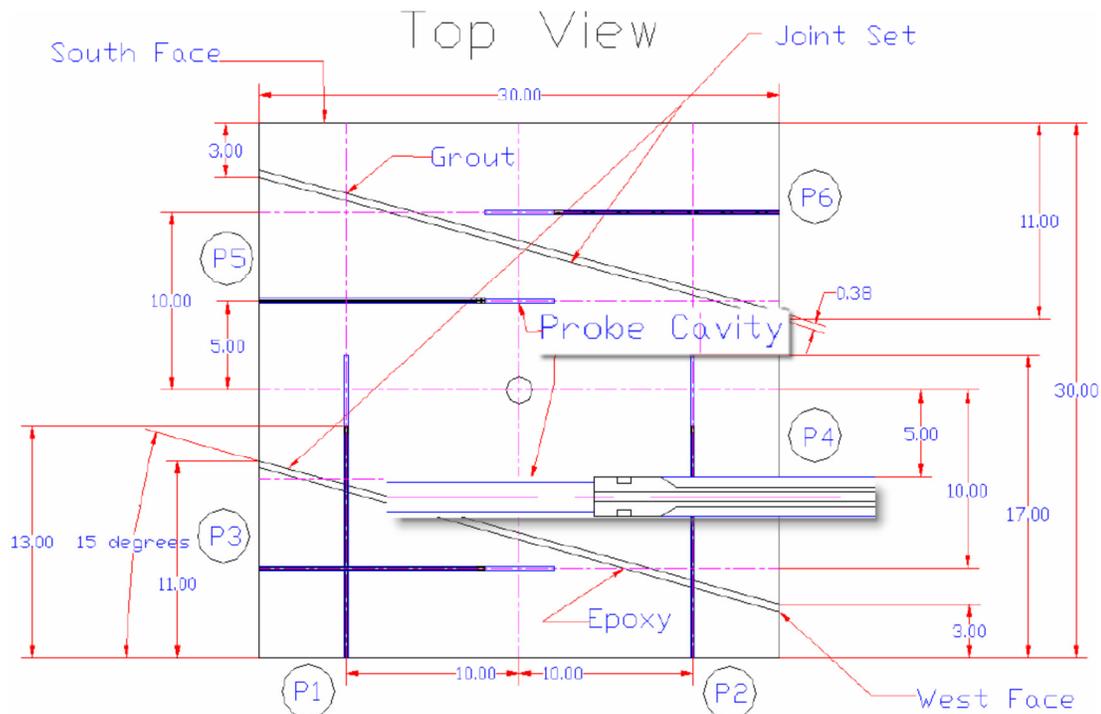


**Figura 5-41. Muestra para la realización del ensayo.**  
**Fuente: CASAS [18].**

Las juntas (discontinuidades) se cortaron con las siguientes consideraciones:

- Las discontinuidades espejo colocadas a cada lado de la boca del pozo (Figura 5-42) tiene como función examinar dos situaciones: 1) Evolución de la fractura #2 cuando lo interceptan y cruzan las juntas, y 2) la evaluación con diferentes materiales de relleno.
- Las juntas se realizaron a través de todo plano de este a oeste del bloque, casi normal a la dirección prevista de la fractura # 2, de modo que la interacción de la fractura tendría lugar fuera de los límites de secuencia (Figura 5-42).
- Las juntas fueron cortadas en ángulos para agregar el elemento de tracción y apertura al corte de la roca, para evaluar el crecimiento de la fractura a través de discontinuidades. El ángulo de estas juntas, con respecto a la fractura de entrada # 2, se limita para acomodar los dos puntos anteriores, y para tener el espacio físico disponible en el bloque de prueba, necesario para la propagación de la fractura # 1.

- Cortado completamente vertical (paralelo a la dimensión de altura) y lo suficientemente amplia para proporcionar un llenado uniforme y sedimentación del material de unión en las juntas.



**Figura 5-42. Vista desde arriba del bloque. Localización de las probetas de presión. Probetas 1 y 2, monitorean la fractura #1 (dirección este-oeste) y probetas 3, 4, 5 y 6, monitorean la presión antes y después de que intercepte la fractura #2 (dirección norte-sur). Todas las medidas están en pulgadas.**

Fuente: CASAS [18].

A una junta se le agregó un epóxido de alto módulo y a la otra se le agregó una lechada de alta resistencia. Por lo tanto, la evaluación de la extensión de la fractura se hizo a través de dos compuestos similares de materias muy disímiles, bajo condiciones de profundidad in-situ y de bombeo. La Tabla 5-7, presenta una comparación de las propiedades de estos materiales con los de la Arenisca de Colton, medido bajo condiciones de laboratorio.

**Tabla 5-7. Propiedades de los materiales de relleno y la arenisca Colton.**

Fuente: CASAS [18].

Material	Módulo de Young (GPa)	Resistencia la tracción (MPa)	Coefficiente de Poisson
Arenisca Colton	9,04	3,69	0,22
Lechada	17,50	3,81	0,18

Material	Módulo de Young (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Coefficiente de Poisson
Epoxi	0,12	28,95	0,82

### 5.4.4 Montaje del laboratorio

El bloque preparado se colocó dentro del marco de presión y se colocaron los dos esfuerzos en las dos direcciones horizontales y verticales con flatjacks de alta presión. La inyección de fluido de fracturación en la perforación de la muestra fue proporcionada por un sistema de intensificadores de bombas de presión a volumen constante. Un sistema de adquisición de datos de la computadora registro las presiones del flatjack, la presión del pozo, las presiones de la sonda, y el volumen de fluido inyectado en función del tiempo. Las Figura 5-39 y Figura 5-43, muestran una perspectiva general del conjunto experimental descrito arriba.

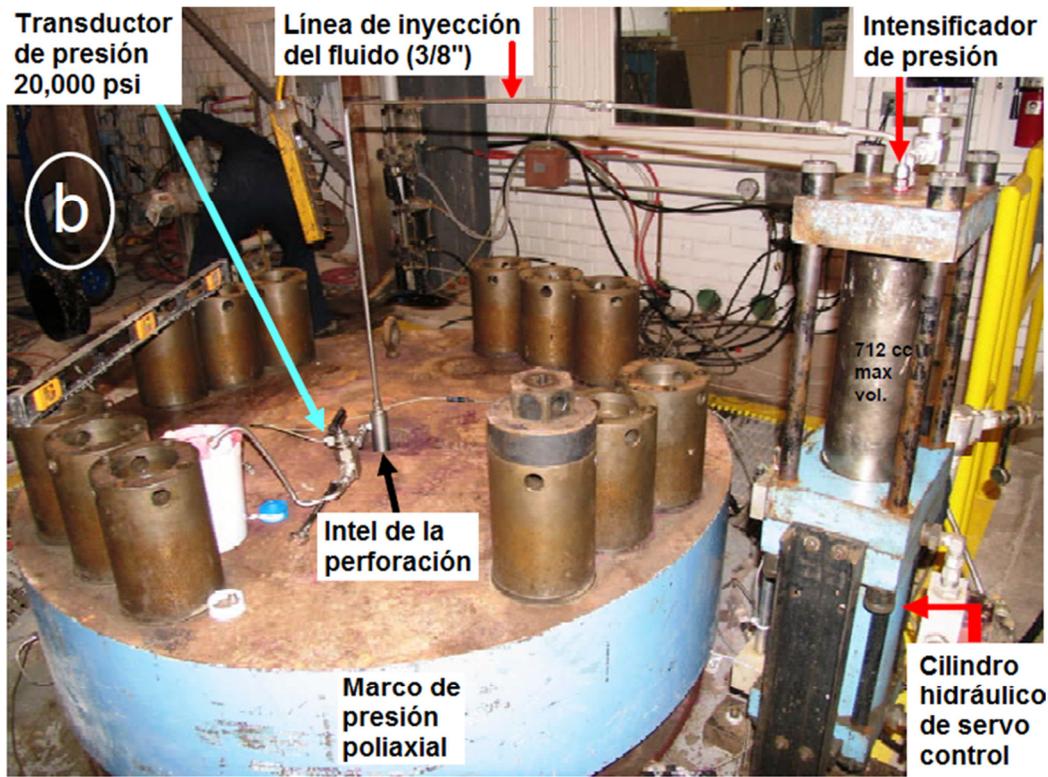
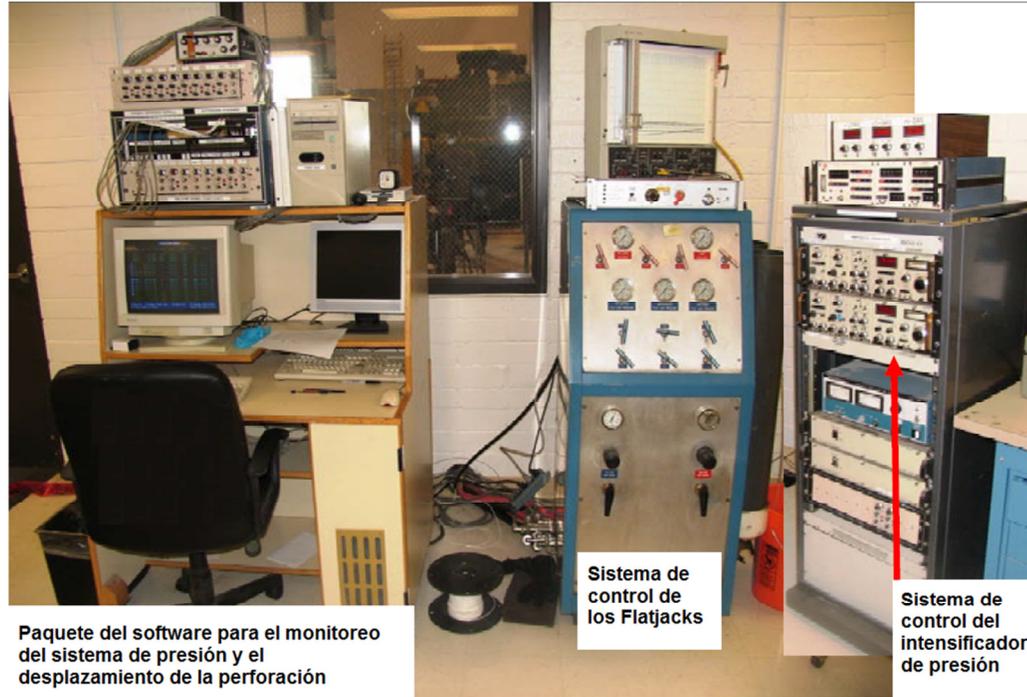


Figura 5-43. Montaje del ensayo. Fotografía después de sellar la muestra. Fuente: CASAS [18].



**Figura 5-44. Montaje de la instrumentación y adquisición de datos.**  
Fuente: CASAS [18].

En la Figura 5-45, se muestra el proceso de cómo se montó la muestra en el marco poliaxial de cargas.

### 5.4.5 Condiciones experimentales

El diseño de las condiciones experimentales fue ayudada a través de los principios de escala desarrollado por Pater et al. [19]. Estos principios de escala proporcionan un medio del diseño del experimento mediante la aplicación de la física fundamental de la propagación de fracturas de un fluido inyectado. El diseño determinó las condiciones de presión de la red de fluido para la propagación de la fractura lenta en la prueba de bloque. Dado que la extensión de la fisura se describe mediante la teoría elástica lineal, la condición de propagación liga el factor de intensidad de esfuerzos ( $K_I$ ) con la presión del fluido en la fractura. La integración de la expresión del factor de intensidad de los esfuerzos para una grieta radial, proporciona el criterio para la propagación a presión constante en la parte mojada de la grieta y la presión cero en la zona de retardo de fluido (zona no penetrada).

$$5-11 \quad K_I = K_{IC} = \frac{2}{\pi} [p_{net} \sqrt{\pi r_f} - (p_{net} + \sigma_{h \min}) \sqrt{2\pi\omega}]$$

Donde la resistencia a la fractura es  $K_{IC}$ , el tratamiento de sobrepresión o de la presión neta es  $p_{net}$ , el radio de la fractura es  $r_f$ , el esfuerzo horizontal mínimo o de confinamiento es  $\sigma_{h \min}$  y el tamaño efectivo de la zona de retardo del fluido es  $\omega$ . La medida en que las

condiciones de campo como de la propagación de fracturas hidráulica se pueden alcanzar en la prueba de laboratorio en escala, dependen de cuánto mayor sea el término de la presión del fluido en la ecuación 5-11, que es el valor de la dureza de la roca, es decir:

$$5-12 \quad p_{net}\sqrt{\pi r_f} > K_{IC\_roca\_ss}$$

La Figura 5-46, muestra cómo las fuerzas de viscosidad comienzan a ser significativas en la propagación de las fracturas cuando tanto la viscosidad y la tasa de inyección aumentan, como es de esperar (el cálculo de la velocidad de inyección o el tiempo experimental es dependiente en el análisis de escala). Por lo tanto, las condiciones para la prueba se determinaron con base en el uso de la más alta viscosidad del fluido de fracturamiento y una velocidad de inyección que proporcionaría tiempo experimental suficiente para la recopilación de datos. Para más detalles sobre el análisis de escala y cómo se llevó a cabo el escalado de las variables de prueba, se remite al lector a Casas [18].

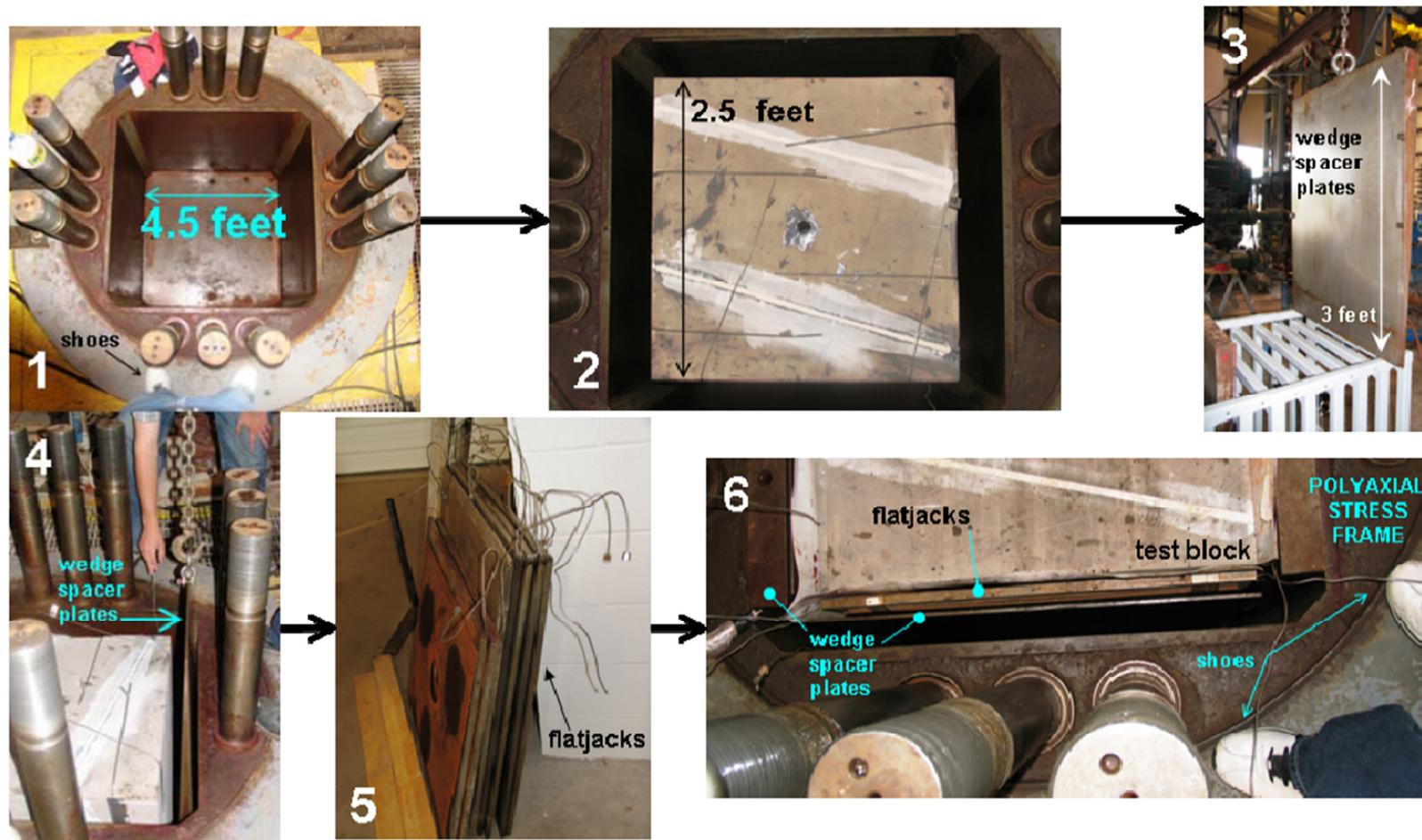
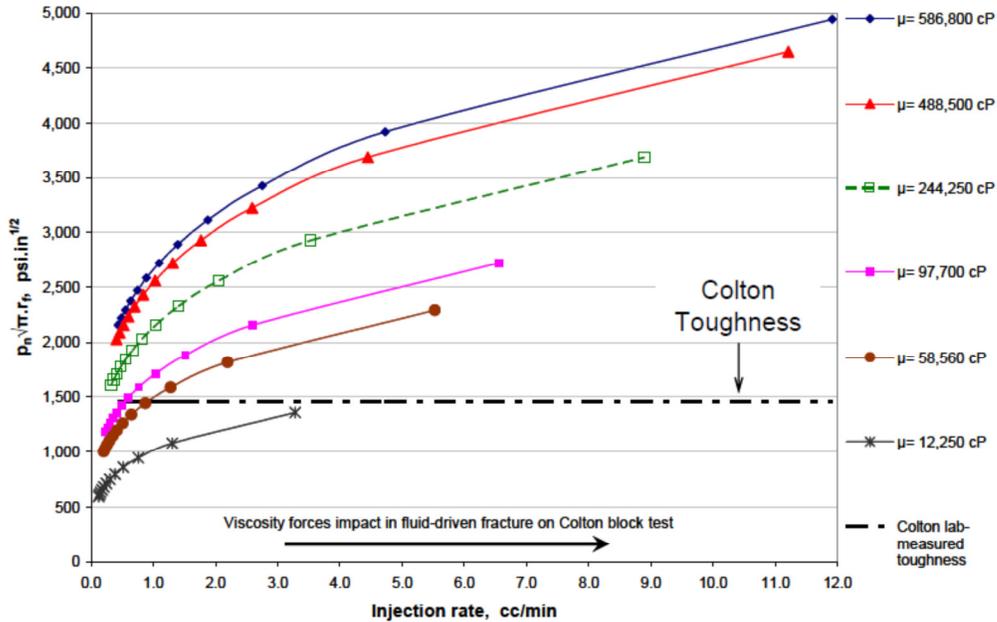


Figura 5-45. Descripción general de la estructura polyaxial puesta a punto. La Foto 1 muestra el marco de presión vacío. La Foto 2 muestra el ejemplar de ensayo colocado dentro del marco de presión, Fotos 3 y 4 muestran una placa de cuña y donde se coloca dentro del marco presión, respectivamente. La Foto 5 muestra los flatjacks, y la Foto 6 ilustra cómo se colocan los flatjacks entre el bloque de prueba y placas espaciadoras de cuña, dentro del marco de presión.

Fuente: CASAS [18].



**Figura 5-46. Impresión de la contribución de presión en la Ecuación 5-12 vs velocidad de inyección para viscosidades disponibles del fluido de fracturamiento (mostrado aquí en unidades de centipoise: 1 cP = 0.001 Pa.s). Como era de esperar, cuando se aumenta la velocidad de inyección y la viscosidad del fluido, las fuerzas de viscosidad empiezan a ser significativas en el proceso de la propagación de fracturas.**  
Fuente: CASAS [18].

#### 5.4.6 Líquido del fluido para la fractura

Según, Casas (2006), se estableció que el aumento de viscosidad del fluido de fracturación desacelera el crecimiento de la fractura, produciendo la propagación de fracturas de campo similares y de tiempo suficiente para la recolección. Sin embargo, la magnitud de la viscosidad fracción de fluido está limitada por varios factores:

1. Inyección con el intensificador de la bomba y el flujo a través de la capacidad de una línea de inyección muy estrecha (ID: 0.245 pulgadas).
2. Si el espaciador del pozo sólido puede ser completamente sumergido en el pozo lleno de líquido dado que el movimiento del fluido dentro de la perforación se verá limitada de forma dramática.
3. La disponibilidad de los fluidos de fracturamiento con viscosidades similares a los obtenidos del análisis de escala.

Varias pruebas hidráulicas se realizaron con éxito, con los aceites a base de silicio newtonianos, con viscosidades de hasta 488.500 centipoises (Lhomme, 2005). Más allá de este valor de la viscosidad del fluido, se convierte en casi imposibles de bombear. Dado que los aceites de silicona no están fácilmente disponibles para los altos rangos de viscosidad, la disponibilidad era entre el uso de un 586.800 y 100.000 centipoises un fluido. El fluido de mayor viscosidad fue probado con éxito para la bomba de capacidad a través de la línea de inyección con el intensificador, y por lo que la decisión se tomó para llevar a cabo experimentos de fracturación hidráulica con el fluido de 586 800 centipoises.

La Tabla 5-8, muestran las especificaciones disponibles para el fluido de aceite de silicona térmicamente estable.

**Tabla 5-8. Especificaciones para el fluido de fracturación de aceite de silicona**  
Fuente: CASAS [18].

<b>Nombre Químico</b>	Polidimetilsiloxano-DMS-T56	
<b>Apariencia</b>	Clara, inolora y insabora	
<b>Viscosidad</b>	600.000 cSt ~ 586 Pa.s ~586.800cP	
<b>Gravedad Específica</b>	0,978	
<b>Consistencia</b>	Pasta de maní gruesa similar a la mantequilla	
<b>Compresibilidad @14.000 psi (para un fluido de 12.000cP)</b>	5,12E-06 psi <sup>-1</sup>	

#### 5.4.7 Procedimiento del ensayo

Cargar el bloque del ensayo al esfuerzo deseado, tomo en consideración la ineficiente transitividad de carga de los flatjacks. La eficiencia de los flatjacks es el radio del área del contacto efectivo del flatjack (basado en medidas físicas realizadas en los flatjacks expandidos), dividido por el área lateral del bloque que es ensayado; por las dos direcciones horizontales principales, el flatjack solo transmite el 81% del esfuerzo al bloque y en el sentido vertical solo transmite el 83%. Por eso los valores finales del esfuerzo que se le aplica al bloque son compensados por este problema. El bloque fue cargado en tres etapas; la primera donde todos los esfuerzos principales se llevan simultáneamente hasta el valor del esfuerzo principal horizontal menor ( $\sigma_{hmin} = \sigma_{Hmax} = \sigma_{vertical}$ ). Luego, dos esfuerzos principales, uno horizontal y el otro vertical, fueron traídos al valor máximo del esfuerzo horizontal y finalmente, la carga vertical (sobrecarga) fue llevada a 1000 psi por encima del esfuerzo máximo horizontal, así obteniendo el estado final de los esfuerzos para la muestra ( $\sigma_{hmin} < \sigma_{Hmax} < \sigma_{vertical}$ ).

Tabla 5-9. Parámetros para la generación de las fracturas en el bloque.  
Fuente: CASAS [18].

Tasa de inyección $i$ (cc/min)	Sobrecarga $\sigma_{\text{vertical}}$ (MPa)	Esfuerzo máximo horizontal $\sigma_{\text{Hmax}}$ (MPa)	Esfuerzo mínimo horizontal $\sigma_{\text{hmax}}$ (MPa)
1,50	35,90	29,00	16,50

Todas las sondas de presión fueron presurizadas en agua a 0.6 MPa aproximadamente, después de haber cargado el bloque. Una vez el bloque llegó al estado de esfuerzos deseado, la perforación fue presurizada a una tasa de flujo constante con el fluido de fractura, basado de silicona Newtoniana (viscosidad de 586 Pa.s). La inyección continuó hasta después de la presión de ruptura, cuando una de las sondas de presión la detectó. Estas sondas de presión fueron cruciales para poder mantener la fractura dentro del bloque después del shut-in. La presión de la perforación, las presiones de la sonda y la presión en los flatjacks, se registraron continuamente durante la duración de la prueba y después de la bomba de shut-in.

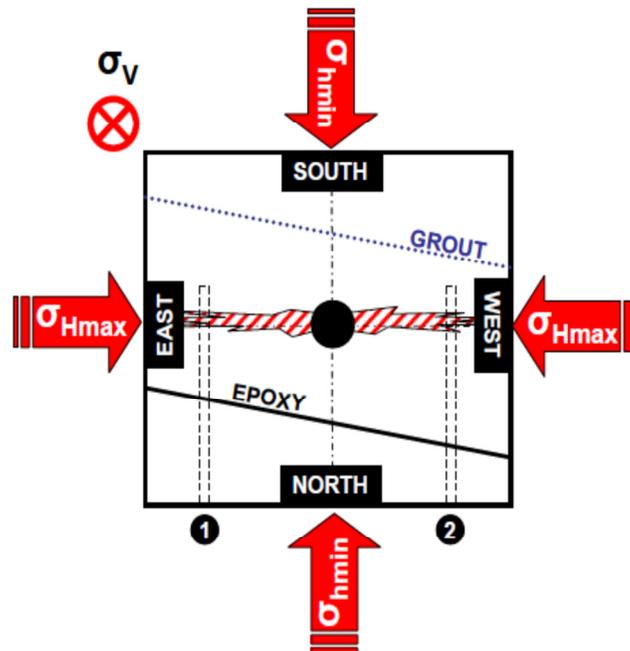
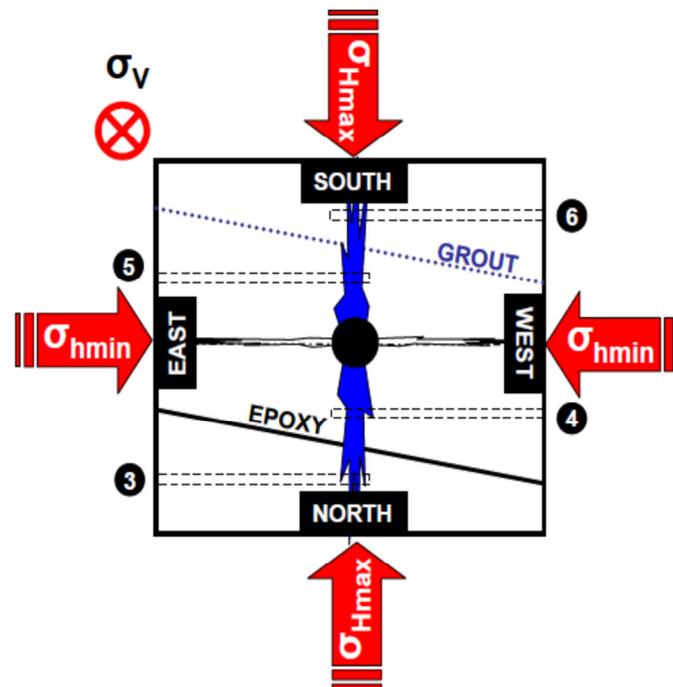


Figura 5-47. Representación del estado de esfuerzo para la extensión de la fractura #1. El camino de la fractura es en el plano este a oeste y el crecimiento está controlado por las probetas 1 y 2.

Fuente: CASAS [18].



**Figura 5-48. Representación del estado de esfuerzo para la extensión de la fractura #2. El camino de la fractura es en el plano norte a sur y el crecimiento está controlado por las probetas 3, 4, 5 y 6.**  
Fuente: CASAS [18].

La Figura 5-47 y Figura 5-48, presentan los estados de tensión aplicados durante la propagación de las dos fracturas hidráulicas en el ensayo con las sondas de presión correspondientes. Después de completar la fractura #1, la relación de esfuerzos horizontales se revirtió gradualmente sin descarga de la tensión vertical (es decir, el esfuerzo horizontal mínimo se convirtió en el esfuerzo horizontal máximo y viceversa) para empujar la segunda fractura a través de las articulaciones y de la lechada epoxy fabricados en el bloque. Las condiciones de esfuerzo se mantuvieron idénticas a la primera prueba, excepto la tasa de inyección se aumentó a 4,8 cc/min porque un flatjack estaba experimentando problemas que sostiene el límite de tensión en el bloque de prueba.

### 5.4.1 Resultados

La Figura 5-49 y Figura 5-50, muestran las secuencias de ensayo generales de eventos recogidos a un punto por segundo para la fractura #1 y 2 de la fractura, respectivamente. Estas pruebas se caracterizan por un aumento de la presión lineal constante en la perforación antes de llegar a la presión de ruptura. Propagación de las fracturas se observó constante y lenta hasta el shut-in. No se observaron respuestas de la presión de las sondas 1, 3, 5 y 6. Una inspección adicional de estas sondas mostró que estaban

conectados con la epoxi utilizado para cementar la tubería de 3,18 mm, que conecta la cavidad de la sonda con los transductores de presión (véase la Figura 5-42).

La propagación de la fractura #2 se detuvo antes de lo previsto debido a la falta de fluido en el sistema de inyección. Antes de la detención del desplazamiento de fluido en 201,64 cc (100 cc de desplazamiento total), una respuesta anómala se vio en la presión de la perforación. Esto se atribuyó al taponamiento del transductor de la perforación, o a que la fractura fue momentáneamente contenida por ambas juntas, causando que la presión se elevara hasta que se produjera la saturación, o el cruce con las juntas.

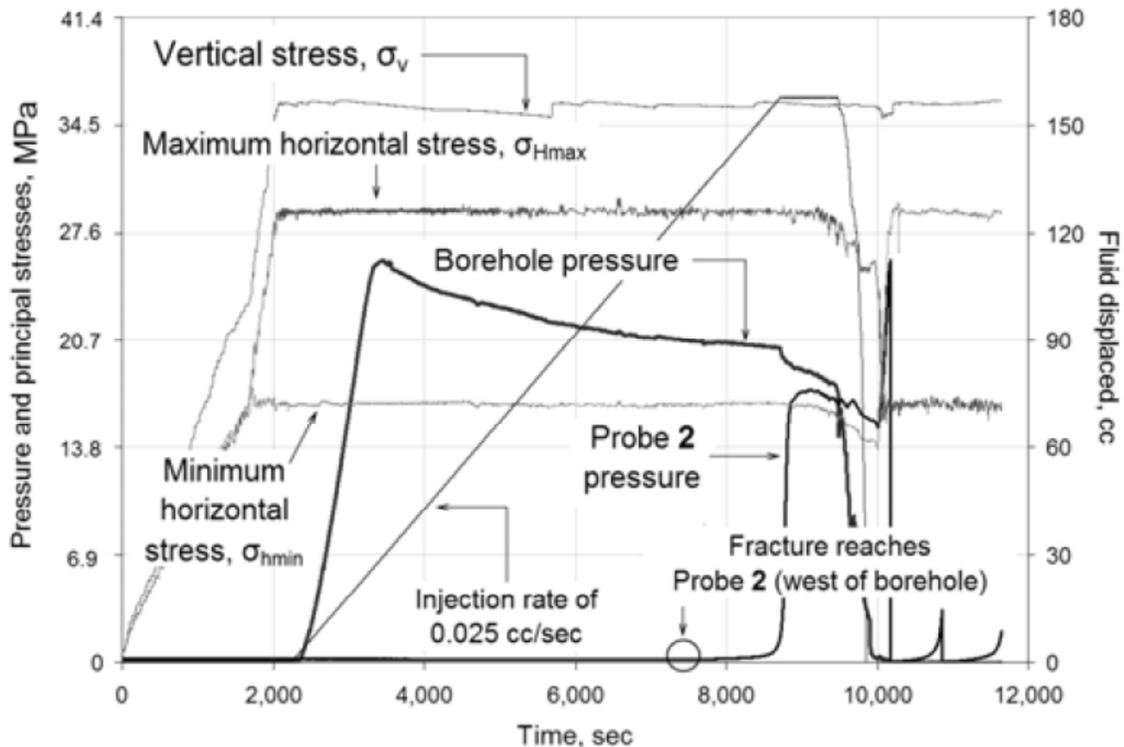
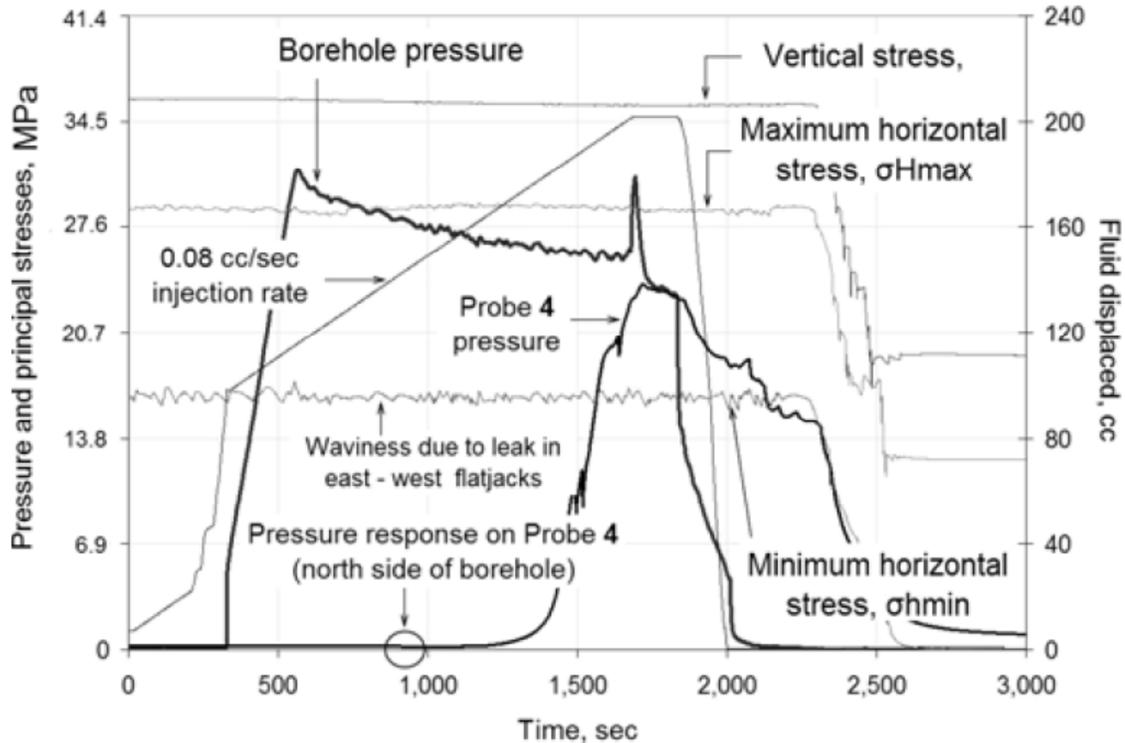


Figura 5-49. Resultados de presión para la fractura #1.  
Fuente: CASAS [18].



**Figura 5-50. Resultados de presión para la fractura #2.**  
Fuente: CASAS [18].

Dos alas de fractura simétricas que se formaron en ambos lados de la perforación se observaron en el plano de este a oeste de fractura # 1 (Figura 5-51). Contornos de fractura eran claramente visibles desde la superficie, siendo uniformemente coloreada por un colorante rojo. El ala oeste de la fractura # 1 se salió del bloque, presumiblemente antes de que el frente de la fractura se encontrara con la sonda 2.

Recordando que solo la probeta de presión 4 registro la presión para la fractura #2, que se había propagado en ambas direcciones, con el plano sur sosteniendo casi en su totalidad a la fractura, debido a la elasticidad de la junta de la lechada y el exceso de volumen de bombeado de fluido, como se muestra en la Figura 5-51. La fractura no fue a través de la junta de epoxi, pero forzó sí por debajo de ella. Una mirada más cercana a la sección transversal de ambas juntas muestra la junta de lechada llena saturada con el fluido de fracturación. El grouting tiende a generar una gran cantidad de burbujas cuando se mezcla. Las burbujas pueden haber permitido que el fluido de fracturación haya invadido gradualmente la interfaz y/o parcialmente penetrado en el material poroso antes de romperse a través de la junta. Por otro lado, la junta llenada con epoxi era una barrera impermeable que no deja avanzar a la fractura a lo largo de la interfaz de la junta. Al parecer, había penetrado a través de las paredes de la junta ya que se observó que no había invasión del fluido en la superficie de la roca y el epoxi.

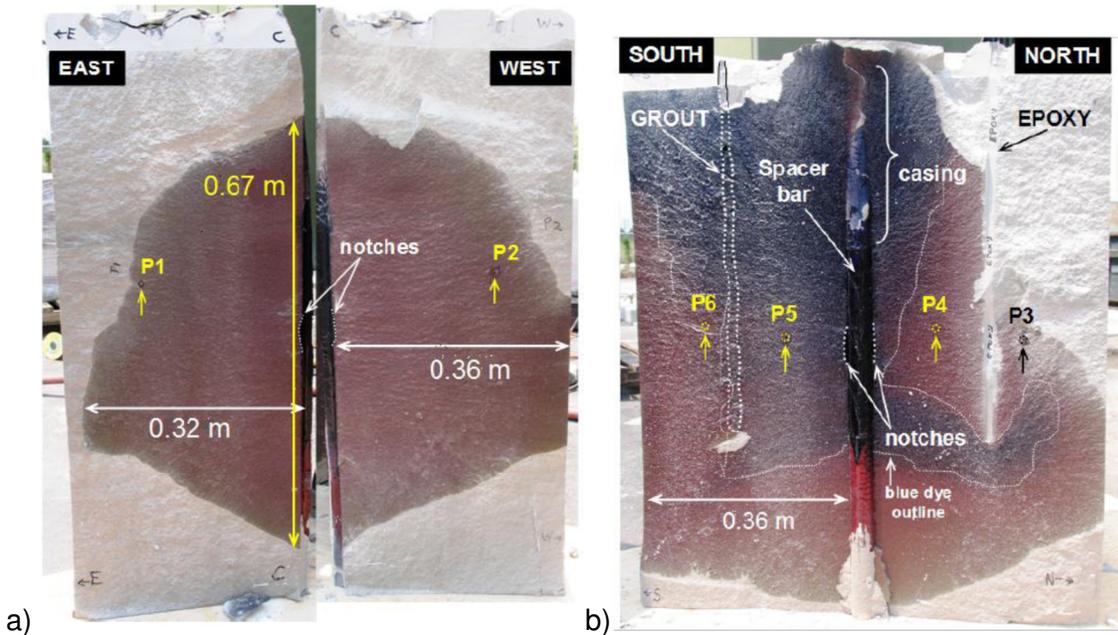


Figura 5-51. Fotografías de las fracturas, después del ensayo. a) Fractura #1 y b) fractura #2.

Fuente: CASAS [18].

### 5.4.1 Conclusiones

Las condiciones evaluadas en la prueba de la fracturación hidráulica eran únicas con resultados que justifican la necesidad de continuar el trabajo de laboratorio y el modelamiento. Las conclusiones de este estudio fueron las siguientes:

- La aplicación de los principios de escala en el diseño de la prueba de la fractura hidráulica, produce el crecimiento de la fractura similar a las condiciones del campo, en las dos fracturas inducidas (fractura de # 1 y # 2). Adicionalmente, el líquido viscoso a escala, produce mayor ancho en la fractura, de la que se cree representativa en las condiciones de campo.
- En el caso de unas condiciones de prueba (confinamiento alto), el experimento produjo la propagación de la fractura plana siguiendo las tendencias que se esperaban del modelo en tres dimensiones. Incluso a medida que se propagan a través de discontinuidades similares a la roca.
- Ambas fracturas inducidas presentan presiones netas ligeramente más altas que las predichas por el análisis de escala. Presumiblemente debido a las zonas de retardo largos en la punta de la fractura bajo un alto esfuerzo de confinamiento.

- Se cree que las sondas de presión 2 y 4 fueron capaces de detectar las llegadas pico de la fractura, y las presiones locales de retardo del fluido asociado debido a las tasas de crecimiento de la fractura generados en el bloque de prueba.
- La detención de la fractura en la unión de llenado de epoxi, dio como resultado, un comportamiento visco elástico del agente de unión. La respuesta de la tensión puede ser comparada a la contención de la fractura hidráulica por la interacción con zonas ricas en arcilla.
- El contraste de rigidez entre la lechada y la interfaz de arenisca Colton, así como la orientación conjunta, no detuvo el crecimiento de la fractura bajo las condiciones de prueba dadas.

## **5.5 SIMULACIÓN A ESCALA DE UN MODELO DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO PARA CREAR UNA RESERVA EGS USANDO UN APARATO DE TRIAXIAL AUTÉNTICO CALENTADO (FRASH, GUTIERREZ Y HAMPTON, [24])**

### **5.5.1 Introducción**

Una de las técnicas más prometedoras para estimular un yacimiento de EGS (Sistema de Enlace Geotérmico), es el fracturamiento hidráulico. Este método inyecta fluido a alta presión en fragmentos del yacimiento, para así crear nuevas fracturas y aumentar la permeabilidad del mismo.

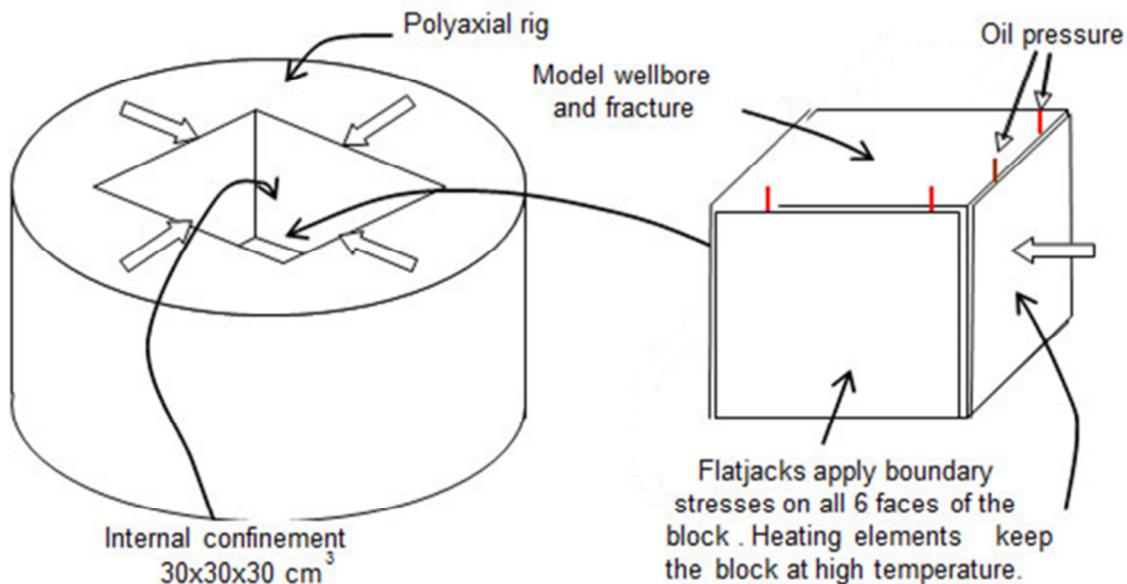
Actualmente, solo un pequeño número de campos de ensayos de EGS, se han realizado debido al riesgo económico en el procedimiento y de la alta probabilidad de fracasar. Por este motivo, el generar experimentos controlados de laboratorio de modelos EGS, pueden ayudar a proveer información valiosa y la experiencia necesaria para avanzar en la calibración de un modelo a gran escala en campo.

### **5.5.2 Equipo y especificaciones**

El laboratorio a escala para la simulación del EGS, consistió en cuatro subsistemas principales. Una cámara triaxial verdadera calentada, un sistema de inyección hidráulica a alta presión, un sistema de adquisición de datos de componente múltiple y un equipo de para la caracterización.

- **Cámara triaxial auténtica calentada**

La cámara consistió en una plataforma de carga cilíndrica de acero de alta resistencia. Adentro de este cilindro se encuentra un bloque de concreto con un hueco rectangular de  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ , para ahí introducir la muestra con los flatjacks, como se ve en la Figura 5-52. Los flatjacks, que son presurizados con bombas, permiten un control independiente de los esfuerzos principales hasta un valor de 12,50 MPa. Al controlar las presiones en las caras de la muestra, se logra tener las condiciones auténticas de un triaxial con diferentes magnitudes, como el esfuerzo de sobrecarga  $\sigma_v$ , el esfuerzo máximo horizontal  $\sigma_H$  y el esfuerzo horizontal mínimo  $\sigma_h$ . Calentadores elásticos de silicona fueron montados externamente para proporcionar una temperatura de hasta  $180^\circ\text{C}$ .



**Figura 5-52. Esquema de la cámara triaxial auténtica.**  
Fuente: Frash [24].

La Figura 5-53, muestra la fotografía del montaje del ensayo antes de colocarle la tapa y después de su colocación. En esta figura se observa un taladro en la parte superior, con el objetivo de realizar la perforación de la muestra en condición de confinamiento y temperatura que son más cercanas a la realidad. La perforación es de 10 mm de diámetro.



**Figura 5-53. Fotografía de la cámara triaxial auténtica.**  
Fuente: Frash [24].

- **Sistema de inyección de alta presión hidráulica**

Un sistema programado de inyección hidráulica se utilizó para la estimulación del fracturamiento hidráulico y para el análisis de flujo de la post-fractura. La precisión fue prevista por un sistema de bomba 65 DM Teledyne Isco siringe, una serie de válvulas neumáticas-hidráulicas automatizadas y un programa para el control de la bomba desarrollado con LabVIEW. Este sistema es capaz de generar 70 MPa de presión y un control del fluido de entre 10 nl/min y 60 nl/min con una estabilidad del flujo de  $\pm 0,30\%$  desde el inicio. En la Figura 5-54 se muestra un diagrama del sistema hidráulico.

Para sellar la inyección en la perforación de la muestra, se introdujo un tubo roscado de 10 mm de diámetro y se le inyectó una epóxido Loctite® Rapid Mix 5-minut. Luego de 24 hr de curado, se perforó con un tubo de 5,6 mm de diámetro hasta el fondo del casco y hasta la muestra, como se muestra en la Figura 5-55.

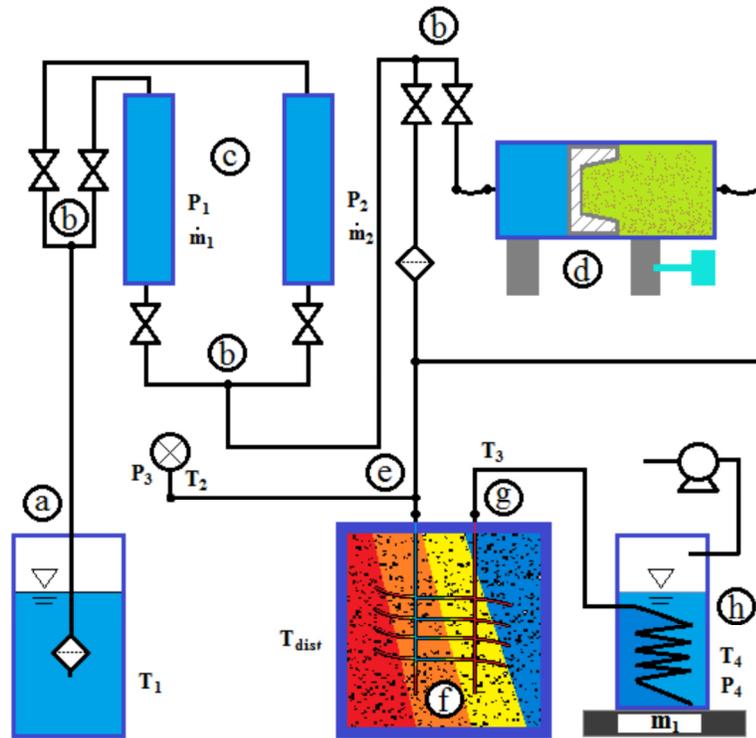


Figura 5-54. Diagrama del sistema hidráulico de la inyección que muestra (a) el depósito de fluido de entrada, (b) el sistema automatizado de la válvula, (c) las bombas de jeringa de Teledyne Isco, (d) el acumulador de suspensión mixta, (e) la cabeza del pozo de inyección, (f) la muestra de ensayo, (g) la perforación de producción opcional, y (h) el depósito de flujo de salida opcional

Fuente: Frash [24].

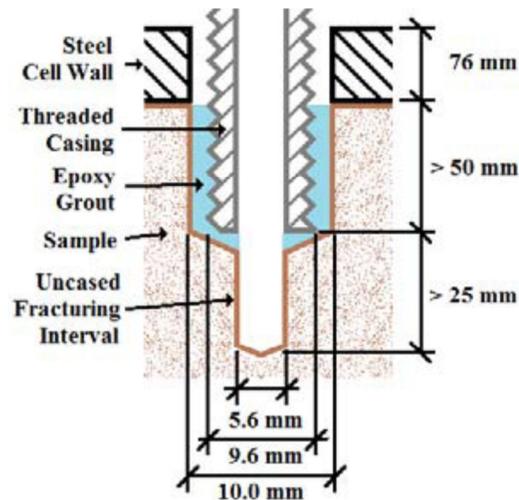
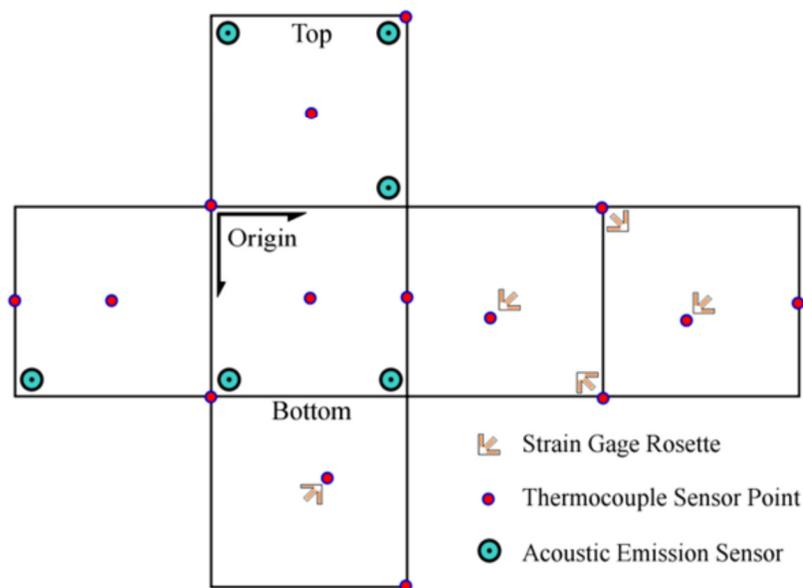


Figura 5-55. Método de sellado.

Fuente: Frash [24].

▪ **Sistema de adquisición de datos de componentes múltiples**

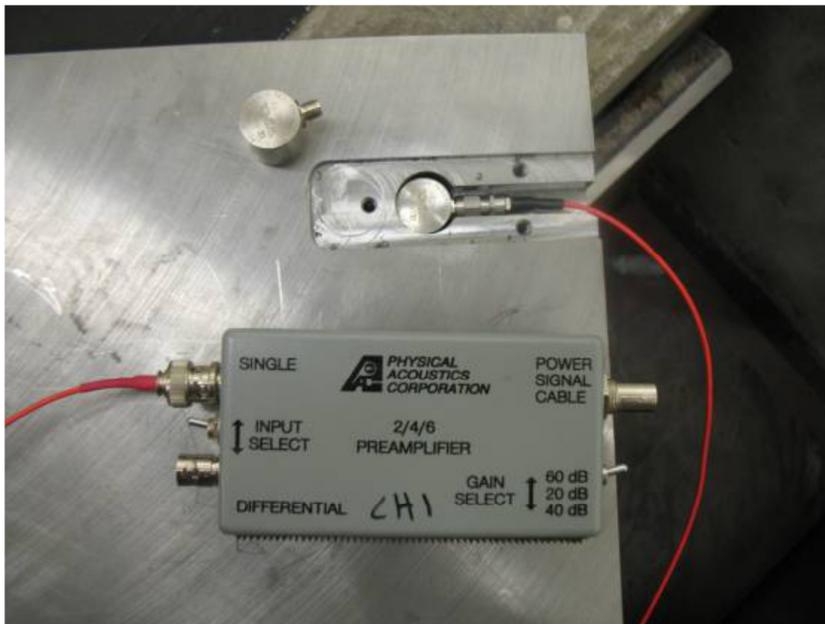
Para vigilar y controlar el equipo y el sistema de procesos multi- función y multi- canal de National Instruments CompactDAQ, se utilizaron los canales de 16 bandas extensométricas, 16 canales de termostáticos CJC, 8 canales de voltage, ocho (8) canales actuales y cuatro (4) canales multi-función. Los sensores conectados incluyeron dos (2) transductores de presión Omega® PX309 - 10KG5V para la vigilancia de la cabeza de presión del pozo de inyección y el esfuerzo de confinamiento de la muestra, un (1) transductor de presión Omega® PX309 - 3KG5V, para el control del esfuerzo principal mínimo, un (1) transductor de presión Omega® PX40 - 50 mmHg para la supervisión el nivel de llenado del depósito de producción y el caudal, un (1) transductor de desplazamiento lineal Omega ® LD621 - 30 para uso auxiliar y un (1) transductor de deformación lineal Humboldt HM2310.04, también para uso auxiliar. Las termopares de tipo Omega® T, estaban situados en las posiciones de monitoreo de temperatura hidráulica como se indica en la Figura 5-54, en la parte inferior de los pozos de inyección y en una disposición de malla de alta cobertura en las caras de la superficie de la muestra dentro de la cámara, como se muestra en la Figura 5-56. Se recogieron datos adicionales del controlador de la bomba Teledyne Isco, para dar información sobre el funcionamiento del sistema hidráulico que incluye caudales, presiones, posiciones de válvulas y el estado general de la bomba.



**Figura 5-56. Diagrama de la superficie con la posición de los sensores.**  
Fuente: Frash [24].

Para supervisar el proceso de fracturación y proporcionar la ubicación de estimación en tiempo real de las fracturas hidráulicas generadas, un sistema de control piezoeléctrico de Emisión Acústica (AE) de seis (6) sensores, obtenido de Physical Acoustics

Corporation, fue instalado en el interior de la célula con sensores de contacto con las caras de la muestra en una disposición para lograr una cobertura máxima volumétrica, como se muestra en la Figura 5-56. La Figura 5-57, muestra un sensor AE instalado en una perforación de 25 mm de espesor en la placa de carga donde se protegió de las altas tensiones de carga que se aplica a la muestra. Láminas delgadas de espuma de embalaje se insertaron entre el cuerpo del sensor y la carcasa de acero para amortiguar los efectos del ruido acústico externos y proporcionar una reacción suave para cualquier movimiento que se produciría durante los procesos de carga y descarga. En general, esta placa sirve como una interfaz que puede moverse entre el gato plano presurizado y la muestra dentro de la celda. Durante el análisis, eventos AE grabadas fácilmente podrían ser filtrados por el coeficiente de correlación, amplitud, o utilizando otros criterios de post- procesamiento digital de tiempo de golpe y de los datos en forma de onda.



**Figura 5-57. Sensor AE instalado en la placa de carga.  
Fuente: Frash [24].**

#### ▪ **Material ensayado**

Se utilizaron cuatro tipos de materiales para este proyecto, incluyendo lechada de cemento de resistencia media, cemento de ultra alta resistencia y baja permeabilidad, Granito que se obtiene localmente de Colorado Rose Red y vidrio acrílico. Cada uno de estos materiales fue probado para una variedad de propiedades mecánicas, térmicas y acústicas para proporcionar una referencia para una futura comparación de datos de campo. Un resumen general de las propiedades medidas de los materiales seleccionados se presenta en la Tabla 5-10.

**Tabla 5-10. Propiedades de los materiales a ensayar.**  
Fuente: Frash [24].

Propiedades del material	Cemento de resistencia media	Cemento de ultra alta resistencia	Granito de Colorado Rose Red
Esfuerzo de compresión inconfiada (MPa)	50-60	123-154	152±19
Resistencia a la tensión por el método Brazileiro (MPa)	2,2-2,7	4,0-6,0	7,5±1,8
Módulo de Young, E (GPa)	9,5-10,5	20-30	57
Coeficiente de Poisson, $\nu$	-	-	0,32
Densidad seca, $\rho_{seca}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1950	1970	2650
Conductividad térmica, $k_t$ (W/m-K)	-	1,60±0,02	3,15±0,05
Capacidad de calor, $C_v$ (kJ/m <sup>3</sup> -K)	2013±145	1820±146	2063±92
Porosidad, $\Phi$	0,3-0,31	0,15-0,23	0,006-0,008
Velocidad de cizalla, $V_s$ (min/μs)	2,48	2,54	2,62
Velocidad de la onda compresional, $V_p$ (min/μs)	3,41	3,89	4,45

### 5.5.3 Resultados del ensayo y observaciones

Usando este equipo, se realizó una serie de ensayos de fracturación hidráulica y pruebas de caracterización de yacimientos para obtener nuevos datos para el avance de la tecnología de EGS. Los experimentos de fracturación hidráulica se realizaron en más de 11 perforaciones diferentes y cuatro materiales diferentes. Se prestó especial atención en la prueba de la fracturación hidráulica para el granito, donde se perforó un pozo de interceptación, para recrear una reserva de producción caliente de EGS. Los resultados del experimento de simulación EGS, se pueden dividir en varias fases, incluyendo la preparación de muestras, la fracturación hidráulica primaria, la perforación del pozo con un sondeo de interceptación de la fractura y la reapertura de la fractura y su flujo.

#### - Preparación de la muestra

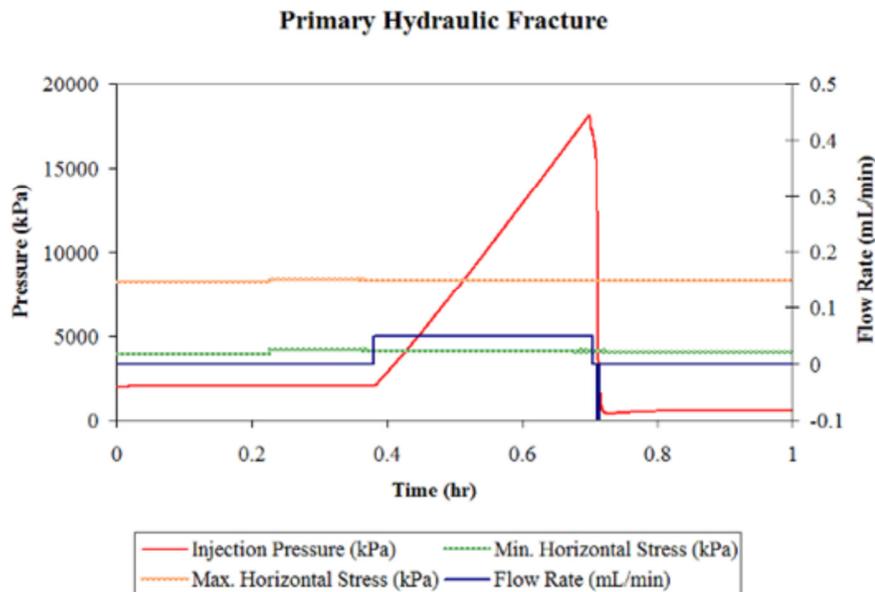
Para esta parte, un bloque de Colorado Rose Red Granite, se cargó en la celda de triaxial auténtica y se calentó lentamente a una temperatura media interna de 50°C en el lapso de cuatro días. Después de que se alcanzó la temperatura objetivo, la muestra se presurizó con esfuerzos de confinamiento de 12,50, 8,30, y 4,10 MPa para los esfuerzos verticales, máximos horizontales y mínimos horizontales, respectivamente. El sistema de monitoreo AE estuvo activo durante todo el proceso de carga para determinar si se han producido eventos de cizallamiento o de fracturación térmica mecánicos.

Mientras se estaba cargando, un sondeo vertical centrado se perforó en la muestra, se instaló un intervalo de 107 mm de profundidad de la carcasa y un intervalo sin entubar de 73 mm, fue perforado para una profundidad del sondeo de inyección final de 180 mm. Es importante señalar que la perforación del pozo mientras que la muestra estaba bajo la

carga, es un sistema único que permite la simulación en el laboratorio de una zona de daño del sondeo.

#### ▪ Fracturación hidráulica primaria

La fractura hidráulica primaria se logró utilizando la inyección con aceite a un caudal constante de 0,05 ml / min. El aceite de engranajes SAE 80W90 Valvoline ® Durablend ® se usó como el fluido de fracturación debido a su alto valor de la viscosidad y propiedades de los fluidos disponibles públicamente. A la temperatura de inyección de 50°C, este fluido tiene una viscosidad dinámica aproximada de 71,5 cP según se estimó usando la información del producto publicado en conjunción con la Walther Ecuación especificado en la norma ASTM D341. El uso de un fluido de alta viscosidad proporcionan los importantes beneficios de un mejor control de crecimiento de la fractura para mejorar la probabilidad de contención y una orientación de la fractura más predecible, ya que la propagación sería menos influenciada por heterogeneidades naturales en la muestra de granito.

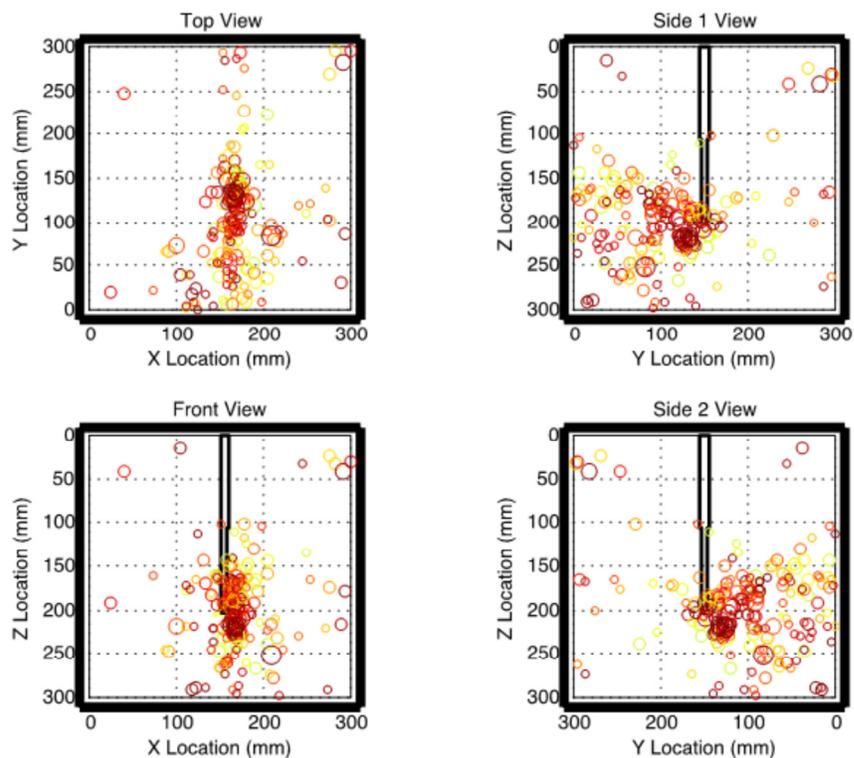


**Figura 5-58. Gráfica de datos hidráulicos para la fractura primaria.**  
Fuente: Frash [24].

Un gráfico de los datos hidráulicos para la fracturación hidráulica primaria, se muestra en la Figura 5-58. Durante esta prueba, la bomba se detuvo 16 segundos después de la ruptura en un intento de mantener la fractura totalmente contenida como se observó en los eventos registrados por AE en tiempo real, que se aproxima a los bordes de la muestra. Se observó una actividad continua con el AE, incluso después de que el bombeo se detiene, lo que indica la propagación continua de la fractura. Por lo tanto, para forzar a detener el crecimiento de la fractura, la velocidad de flujo se invirtió a -

10 ml/min por 6 segundos, para así extraer el líquido de la fractura. En este momento, se observó un rebote en la presión significativa, lo que puede ofrecer una idea del comportamiento dinámico del almacenamiento de la fractura del fluido. Finalmente, la observación de una velocidad de flujo insignificante durante las pruebas de presión constante post-fractura a 2000 kPa, verificó que se había generado una fractura totalmente contenida.

Un análisis de los datos de ubicación de origen AE recogidos durante este ensayo de fractura hidráulica primaria, reveló que una fractura delimitada y plana se propaga desde el pozo del sondeo en una dirección perpendicular al esfuerzo mínimo de confinamiento horizontal. Además, la fractura tiene una sola ala dominante, como es evidente por la nube AE que se ve más prominente en un solo lado del pozo de sondeo. La Figura 5-59 muestra gráficas ortogonales en las tres dimensiones AE.

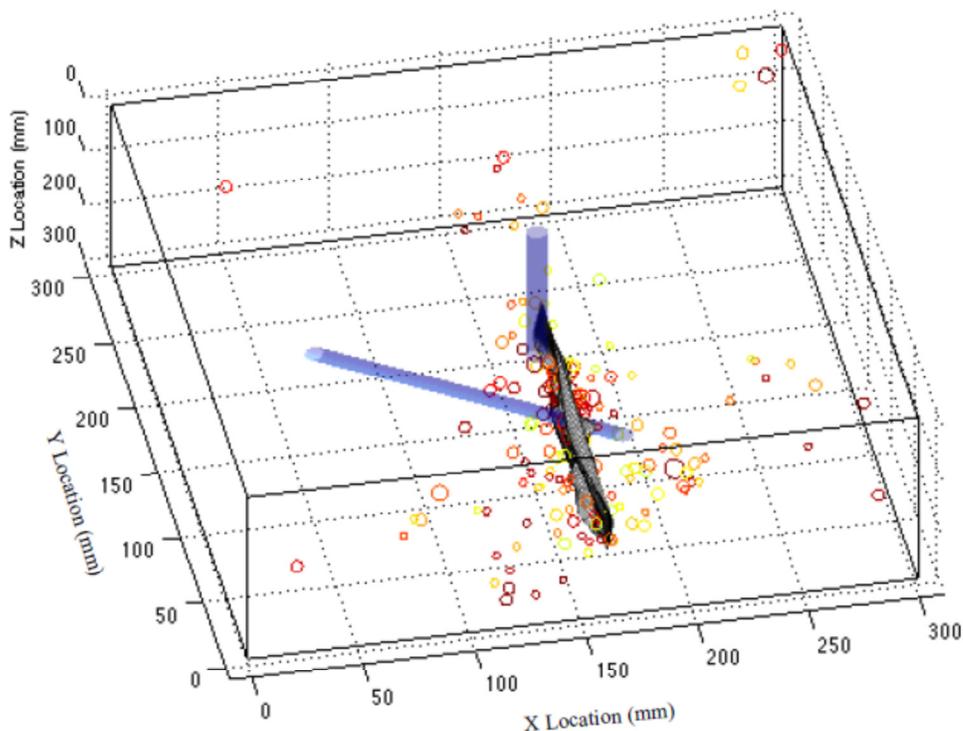


**Figura 5-59. Ubicaciones de origen de eventos AE durante la fractura hidráulica primaria. Fuente: Frash [24].**

- **Perforación del pozo con un sondeo de intercepción de la fractura**

Gracias al uso de los datos AE de ubicación de origen, se obtuvo una estimación de la geometría de la fractura y una posición óptima del pozo de intercepción fue seleccionado como se muestra en la Figura 5-60. Aquí, la trayectoria del pozo de intercepción,

perforado en 30° desde el eje vertical, se puede ver que penetra a través de la superficie de fractura se esperaba obtener.

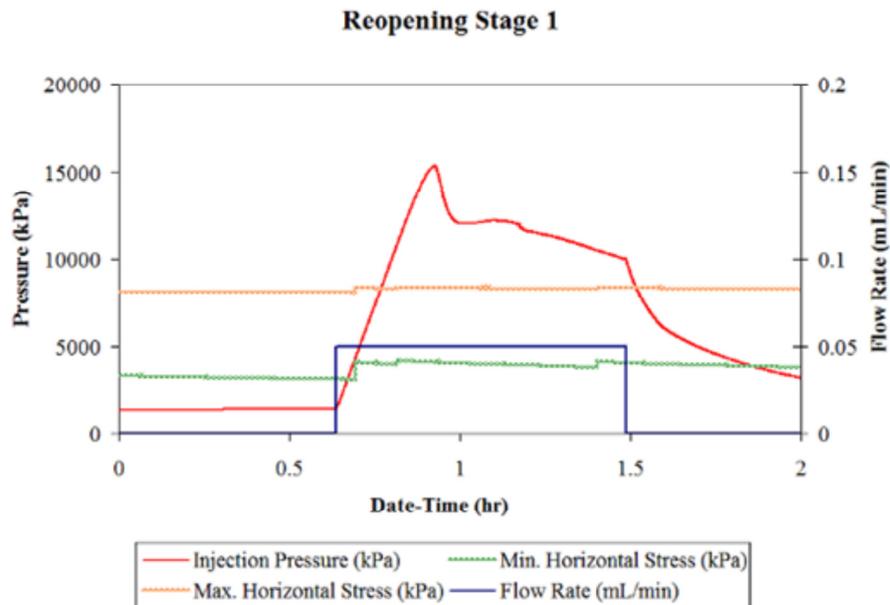


**Figura 5-60. AE genera la superficie de fractura de la fractura hidráulica inicial.**  
Fuente: Frash [24].

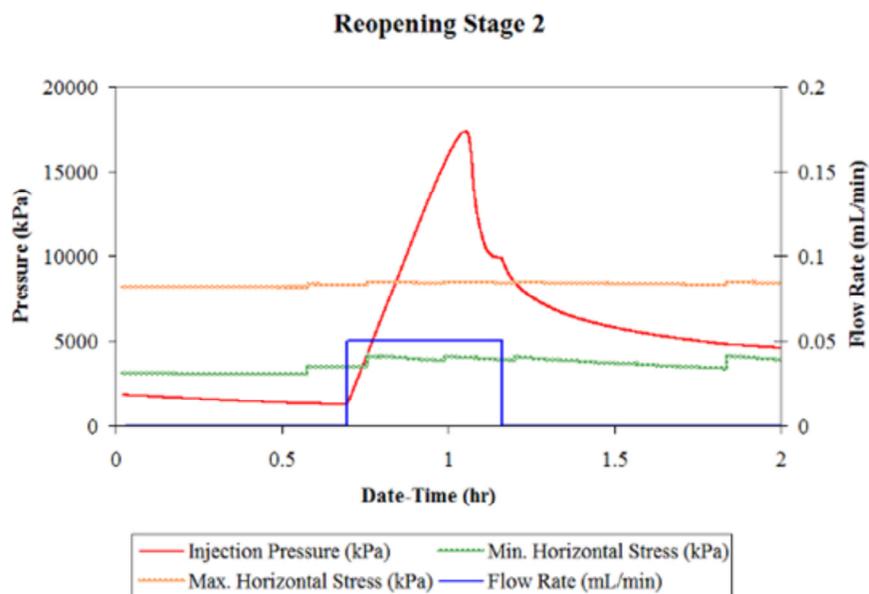
- **La reapertura de la fractura y su flujo**

Con la finalización de la simulación del depósito EGS, se realizaron experimentos de flujo para caracterizar las propiedades hidráulicas del depósito. Estos experimentos incluyeron la inyección constante de presión en estado estacionario, la inyección de caudal constante para la reapertura de la fractura, la inyección a presión constante y la inyección de caudal constante.

Inicialmente, se realizó la inyección constante de aceite de baja presión en estado estacionario SAE 80W90 utilizando presiones específicas de 2000, 3000 o 4000 kPa. Las presiones se mantuvieron intencionalmente por debajo del esfuerzo principal mínimo, para evitar la posibilidad de propagación de la fractura, que podría ocurrir con la reapertura de la fractura. Los resultados de estas pruebas demostraron que las tasas de flujo estables alcanzables con la geometría de la fractura hidráulica primaria, eran insignificantes y por lo tanto el depósito no aumento su producción. Se espera que se produzca una post-fractura de conductividad hidráulica significativamente más alta, si se hubiera utilizado un agente propante durante la etapa de fracturamiento primario.



**Figura 5-61. Gráfica del segundo ensayo de flujo de agua.**  
Fuente: Frash [24].



**Figura 5-62. Gráfica del segundo ensayo de flujo de agua.**  
Fuente: Frash [24].

Para mejorar la conexión hidráulica del sistema de pozo binario, dos etapas reapertura de fractura se realizaron con ensayos de inyección a presión constantes escalonadas ejecutadas para fines de diagnóstico. Estas pruebas de inyección continuaron usando el aceite como fluido de inyección ya que su alta viscosidad era favorable para la generación de fracturas controladas. La Figura 5-61 y Figura 5-62, muestran gráficos de

los datos hidráulicos obtenidos a partir de la primera y segunda reapertura de fractura respectivamente. Ambos gráficos muestran claramente la reapertura hidráulica clásica, el comportamiento con un aumento de presión casi lineal seguido de un evento de ruptura rápida y propagación de la fractura pseudo-estable a una presión elevada. La comparación de los picos de presión de similares magnitudes de 18,1, 15,4 y 17,4 kPa, observados por la fractura primaria, primera reapertura y en segundo lugar la reapertura de eventos respectivamente, sugiere que la resistencia a la fractura no fue un factor dominante en la propagación de la fractura.

#### **5.5.4 Conclusiones**

Una cámara triaxial calentada, fue exitosa y capaz de producir una simulación de laboratorio de un depósito EGS. Experimentos preliminares utilizando granito, proporcionaron datos valiosos, así como las nuevas observaciones que podrían aportar información adicional sobre el potencial de la tecnología EGS. Algunos de los avances y observaciones más importantes fueron los siguientes:

- El desarrollo completo de una cámara triaxial auténtica caliente, con la capacidad de simular múltiples sistemas de depósito - EGS, así como el daño del pozo mediante la perforación de pozos de sondeo con percusión orientados en una muestra caliente.
- Múltiples tratamientos de estimulación por fracturamiento hidráulico se pueden realizar desde el mismo pozo de inyección para alcanzar aumentar significativamente la conductividad del yacimiento y la buena comunicación del fluido.
- El crecimiento de una fractura significativa, como se indica por la actividad de AE, es precedida por períodos en los que el tiempo real diferencial de segundo orden de la presión con el tiempo, es negativa.
- La ubicación de origen AE es una herramienta funcional e importante para la perforación exitosa de un pozo de producción en un depósito estimulado EGS.

## **5.6 LABORATORIO DE ENSAYOS A GRAN ESCALA DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO (HAIMSON, [25])**

### **5.6.1 Limitaciones de Pequeña Escala en un Laboratorio de Ensayo**

Nuestra comprensión de la fracturación hidráulica se basa en una cantidad considerable de trabajos teóricos [por ejemplo, Hubbert y Willis, 1957; Geertsma y de Klerk, 1969; Haimson y Fairhurst, 1967; Cleary, 1979], una cantidad cada vez mayor de modelos numéricos [por ejemplo, Hanson et al 1978; Advani et al, 1980] y un número más bien limitado de estudios experimentales [por ejemplo, Haimson, 1968; Zoback et al, 1977].

Una razón de la relativa escasez de evidencias experimentales en apoyo de la teoría de fracturamiento hidráulico, es la dificultad en la realización de la iniciación de la fractura y pruebas de extensión en muestras para laboratorio. Un valor típico de dicha muestra es de 10 a 15 cm de diámetro si es cilíndrica y 10 a 15 cm en cada lado si es cúbica; la perforación para realizar los ensayos en estas muestras es típicamente de 0,5 a 2,0 cm de diámetro, a fin de mantener una relación de diámetro exterior a diámetro interior que sea lo suficientemente grande como para simular el espesor infinito que se encuentra en situaciones reales. Sin embargo, en el campo, del diámetro típico del pozo del sondeo es de 7,5 a 15,0 cm o más. El diámetro del orificio al ser pequeño en el laboratorio tiene un efecto aún impredecible en el esfuerzo a la tracción al hidro-fracturamiento de la roca (T), por ejemplo, la presión de ruptura necesaria para iniciar una fractura en un espécimen, en la dirección inicial de la hidro-fractura (Figura 5-63 y Figura 5-64). Esto se debe a que el radio de la perforación del laboratorio, es a veces del mismo orden de magnitud que el tamaño de grano, amplificando indebidamente la importancia de las imperfecciones menores en la roca.

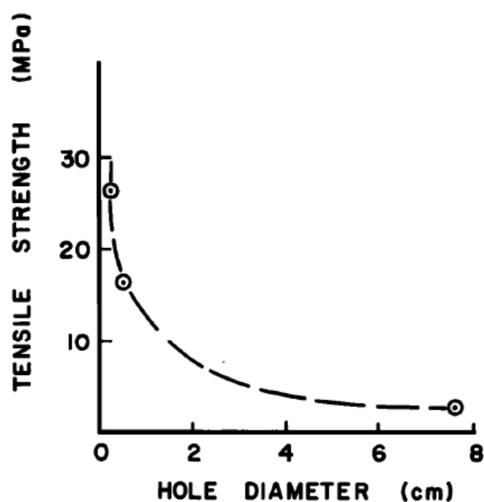
Por otra parte, las fracturas inducidas en las pequeñas muestras de laboratorio, son muy difíciles de controlar y normalmente no se pueden impedir que alcance rápidamente la superficie exterior de la roca. Una vez que la fractura alcance la superficie exterior de la muestra, las condiciones de contorno in-situ se pierden. Por lo tanto, las pruebas a pequeña escala tienen limitaciones muy claras con respecto a la iniciación y la extensión de las fracturas de la roca.

### **5.6.2 Ventajas de una instalación de pruebas a gran escala**

Un centro de pruebas a gran escala que podría acomodar especímenes cilíndricos de 1 m de diámetro o especímenes cúbicos de 1 m<sup>3</sup>, tienen el potencial de proporcionar respuestas a algunas de las cuestiones aún pendientes en fracturamiento hidráulico, con respecto a la iniciación y la extensión de las fracturas. En grandes especímenes, el

crecimiento de la fractura podría ser detenida y reiniciarse mientras se mantiene la simulación de condiciones de campo, es decir, con la fractura confinada al interior de la roca. La relación de inmersión de la fractura y la dirección de los esfuerzos principales se podrían examinar en detalle en las diferentes etapas del desarrollo de la fractura (Figura 5-64). También la presión de iniciación primaria ( $P_c$ ), la presión 'shut-in' ( $P_s$ ) y la capacidad de ejecutar ciclos de re-presurización, produciría valores secundarios de  $P_c$  (también llamada presión refracción,  $P_r$ ) y  $P_s$  (Figura 5-65). Por lo tanto se podrían establecer, las diferentes presiones 'shut-in' en diferentes duraciones de la fractura hidráulica y su relación con el esfuerzo de compresión de campo, normal a la fractura determinada.

Especímenes de gran tamaño pueden acomodar perforaciones a gran escala (7,5 a 15 cm) y sin pérdida de similitud geométrica, lo que facilitará la determinación de la resistencia a la tracción del hidro-fracturamiento de la roca ( $T$ ) para ser utilizado en las pruebas de campo (Figura 5-63).



**Figura 5-63. Gráfica del segundo ensayo de flujo de agua.**  
Fuente: Haimson [25].

Las pruebas de laboratorio a gran escala deberían facilitar el establecimiento de la relación empírica entre las presiones de la fractura hidráulica y los esfuerzos principales, esto en el caso general en el que estos últimos no son paralelos y perpendiculares al eje del sondeo. Esto podría llevarse a cabo con una perforación inclinada en el laboratorio de fracturamiento hidráulico.

La cuestión de la interacción entre una fractura inducida y una discontinuidad natural en la roca, separación o falla, podría abordarse de forma experimental a escala 1:1 con un gran laboratorio (Figura 5-64). El gran tamaño de la muestra debería permitir el desarrollo de la fractura inducida y su intersección con la discontinuidad existente, sin los efectos finales no deseados que se forman en especímenes de menor tamaño. Pruebas con

espécimen grandes también podrían facilitar el estudio de la fractura entre dos pozos adyacentes.

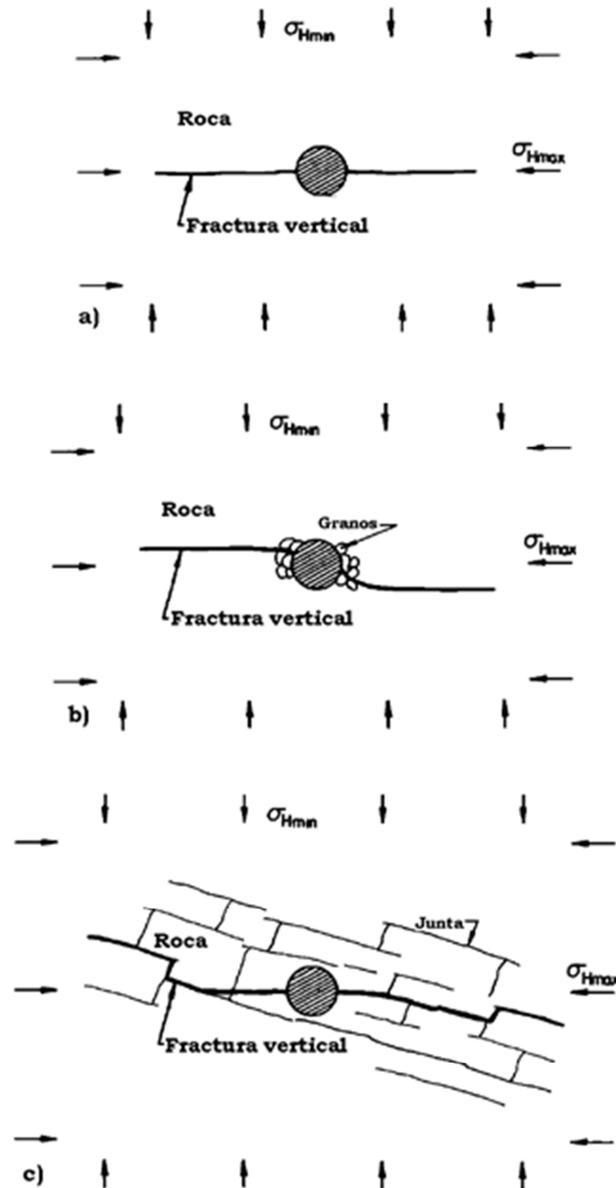


Figura 5-64. G La(a) Comportamiento esperado de la hidro-fractura como una función de los dos esfuerzos principales horizontales. Esto se ha encontrado que es esencialmente correcto en muestras de laboratorio [por ejemplo, Haimson, 1968]. (b) La desviación significativa de la dirección de la fractura esperada en la pared del pozo se puede producir, cuando el diámetro del agujero y el tamaño de los granos son del mismo orden de magnitud. (c) las discontinuidades de la roca orientados favorablemente, podrían causar que la fractura hidráulica se desvíe de su curso esperado.

Fuente: Haimson [25].

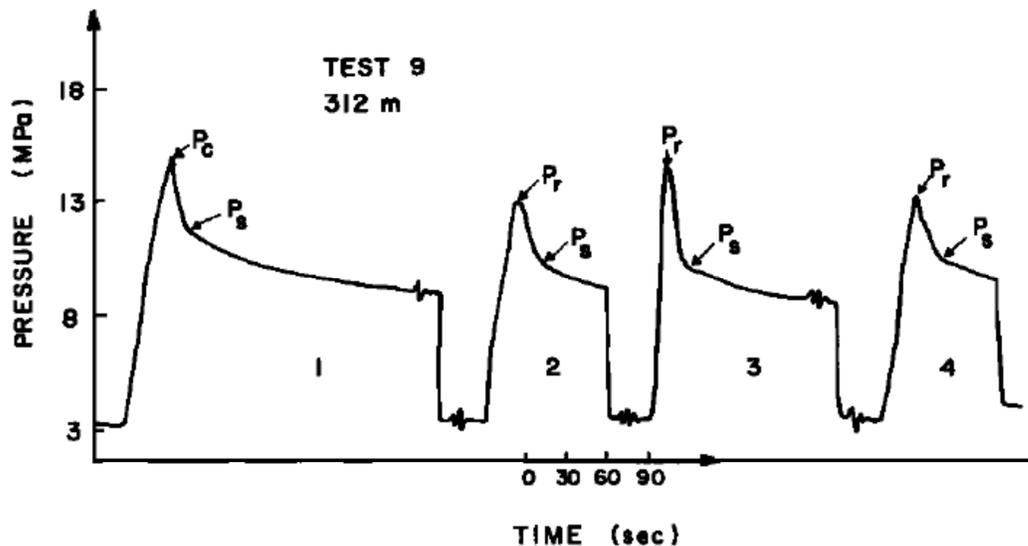


Figura 5-65. Historia típica de la presión del pozo en una prueba de la fracturación hidráulica. Se muestran cuatro ciclos de presurización.  
Fuente: Haimson [25].

### 5.6.3 Ensayos a gran escala en especímenes cilíndricos Versus especímenes Cúbicos

Es claro que la construcción de equipos para un ensayo de 1 m de diámetro en probetas cilíndricas bajo condiciones controladas de los esfuerzos aplicados (axial y lateral), de la presión de poros y la temperatura, en sí mismo es una obra de ingeniería, es considerablemente más fácil que lo necesario para acomodar las muestras cúbicas ( $1 \text{ m}^3$ ) sometidas a tres esfuerzos principales desiguales. Hay, sin embargo, considerables beneficios de los cubos de prueba. Pocas veces los dos esfuerzos principales en la corteza son de igual magnitud, que es el supuesto básico de especímenes de prueba cilíndricas. El efecto de la presión diferencial horizontal es tan importante en las mediciones del esfuerzo de la fractura hidráulica, fractura explosiva, geotérmica de dos agujeros de fractura, fracturas hidráulicas masivas y otros, que se cree que se debe hacer un gran esfuerzo para diseñar una instalación que podría utilizar una gran muestra de cubo en tres esfuerzos principales desiguales. Una instalación de laboratorio para el análisis de muestras cúbicas no se presta fácilmente para estudiar minuciosamente el control de la presión y la temperatura, pero se cree que se puede hacer, aunque a un costo mayor que el requerido para la prueba cilíndrica.

Las pruebas de laboratorio a gran escala es un paso adelante invaluable, para mejorar la comprensión de la fracturación hidráulica de la roca y hacia las aplicaciones de campo con más éxito en este tipo de esfuerzos importantes como la extracción de energía, en la minería in situ y en las mediciones de tensión.

## 5.7 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA EN BLOQUES AL AZAR NATURALMENTE FRACTURADOS (Zhou, [26])

### 5.7.1 Introducción

La fracturación hidráulica se ha convertido en una técnica valiosa para la estimulación de yacimientos de petróleo y de gas en una variedad de rocas del yacimiento. En los yacimientos de petróleo y gas naturalmente fracturados, la suposición generalizada de que la fractura hidráulica se propaga en una recta, de doble ala simple, pero de característica plana, es insostenible debido a las fracturas naturales preexistentes. En yacimientos naturalmente fracturados, debido a la interacción con las fracturas naturales pre-existentes, la fractura puede propagarse asimétricamente o en múltiples hilos o segmentos.

El objetivo en este artículo fue es investigar el efecto de las fracturas naturales aleatorias en la fractura hidráulica, en relación a los fenómenos derivados de una serie de experimentos de triaxiales sobre los comportamientos de la propagación de la fractura observados. Además, se exploró, la posibilidad de utilizar la mini-fracturación, para determinar el esfuerzo mínimo en bloques al azar naturalmente fracturados.

### 5.7.2 Instalación y Procedimiento experimental

- **Preparación experimental**

En el pasado, la aplicación de leyes para la realización de experimentos de fracturas hidráulicas a escala apropiadas, se obtuvieron a [15]. Estas leyes de escala para los experimentos en materia de tasas de energía son asociadas con el flujo de fluidos, la apertura de la fractura y la separación de la roca. En vista de la baja tasa de inyección en el laboratorio, es necesario el uso de fluidos de alta viscosidad. Además, se utilizó un material de baja resistencia a la fractura para los experimentos. Cuando el bloque tiene fracturas pre-existente conductoras, aparece otro factor de escala para los esfuerzos, ya que la apertura de la fractura depende del nivel de esfuerzo medio. Apartando la rigidez de la fractura, la conductividad se verá fuertemente influenciada por el nivel de esfuerzo. Por ejemplo, en el modelo conjunto Barton-Bandis, la apertura viene dada por la siguiente expresión:

$$5-13 \quad U_n = \frac{\sigma_n}{K_{n0}(1+(\sigma_n/K_{n0m}U_m^i))}$$

Donde  $\sigma_n$  es el esfuerzo de confinamiento,  $U_m^i$  es el cierre de la junta máxima permitida en el primer ciclo de carga y  $K_{n0}$  es la rigidez inicial normal de la discontinuidad. De esta

expresión se derivan las características del esfuerzo  $\sigma_{n.D}$  que se pueden usar para escalar el esfuerzo y se llega a la Ecuación 5-14.

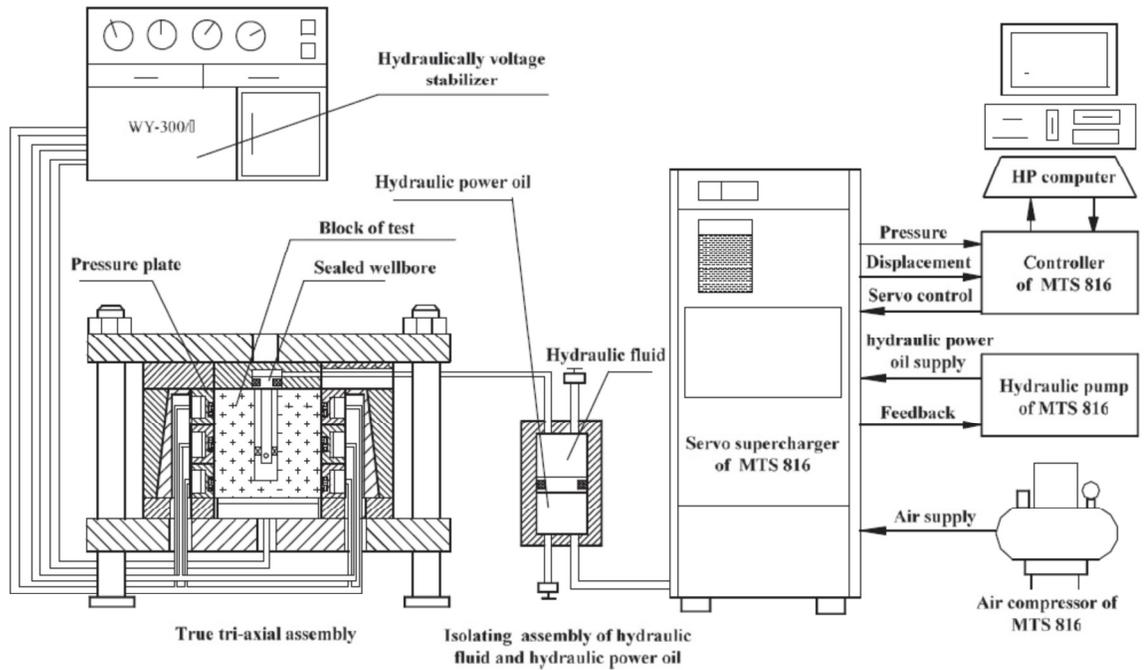
$$5-14 \quad \sigma_{n.D} = \frac{\sigma_n}{U_m^i K_{n0}}$$

En la ausencia de fracturas naturales, se llevaron a cabo pruebas en los esfuerzos locales, pero cuando se introdujeron las articulaciones, el nivel de esfuerzo también hay que escalarlo con respecto a la rigidez de la fractura natural. Se eligió imponer un nivel del esfuerzo aplicado en el ensayo, para garantizar que las discontinuidades se mantengan abiertas en el bloque modelo. De ese modo, se tiene la posibilidad de que el líquido fluya hacia las fracturas naturales. Se utilizaron presiones que están mucho más bajas, en comparación con la presión de la fractura. Por lo tanto, se debe tener cuidado al extrapolar los resultados de las pruebas a las condiciones del campo.

- **Preparación del experimento y preparación del bloque**

Los experimentos se realizaron en una máquina de presión de triaxial (Figura 5-66). Los bloques modelo cúbicos de 300 mm de lado se colocaron entre los pistones a presión para simular las condiciones de los esfuerzos locales. Mientras tanto, las placas de presión estaban equipadas con hojas esféricas para asegurar una distribución de presión igual. Entre el bloque de modelo y la placa de presión, se insertó una hoja delgada de teflón recubierta por ambas caras con vaselina para evitar el esfuerzo de cizalla. La presión de inyección fue controlada por una bomba hidráulica servo de MTS 816, con una capacidad máxima de la presión de inyección de fluido es 140 MPa.

Los bloques se prepararon con una mezcla de cemento. No.325 y arena fina con una relación de masa constante de 1:1. Después de ser mezclado con agua de forma homogénea, el fluido de cemento se almacenó en un molde de metal, con un espacio interior cúbico de 300 mm y se mantuvo durante dos semanas. El siguiente paso, fue el proceso de calentamiento a propósito, para hacer las fracturas aleatorias. Estos bloques se transfirieron a un gran horno y se calientan allí con una temperatura constante de 400°C durante tres horas, luego se refrigera con el aire natural. Debido a la deshidratación durante el proceso de calentamiento, se forman grietas de contracción aleatorias tanto dentro como fuera de estos bloques (Figura 5-67). Antes de proceso de calentamiento, se prueba uno de estos bloques con el ensayo mecánico de roca y la permeabilidad para la investigación de sus parámetros (Tabla 5-11). La matriz al estar con baja permeabilidad y porosidad, es más fácil para detectar el impacto de las fracturas naturales al azar en la fractura hidráulica durante las pruebas a través de los perfiles de presión.



**Figura 5-66. Diagrama esquemático del sistema triaxial para el ensayo de fracturamiento hidráulico.**  
**Fuente: Zhou [26].**

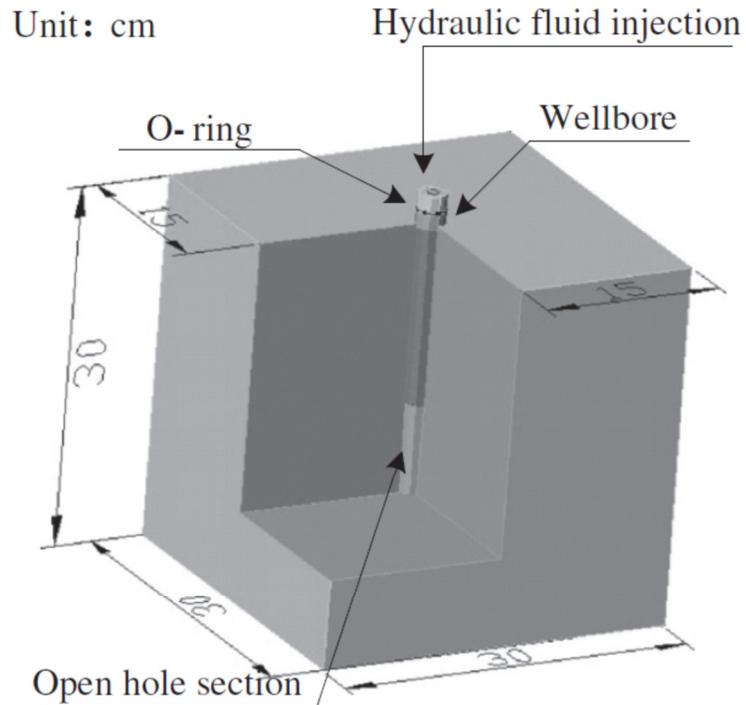


**Figura 5-67. Fracturas naturales aleatorias en la superficie del bloque después de calentarlo y dejarlo ventilar.**  
**Fuente: Zhou [26].**

**Tabla 5-11. Propiedades de los bloques a ensayar antes del tratamiento de calor.**  
Fuente: Zhou [26].

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
$E$	Módulo de Young	8,402	GPa
$\nu$	Coefficiente de Poisson	0,23	
$\sigma_c$	Resistencia a la compresión inconfiada	28,34	MPa
$k$	Permeabilidad	0,1	mD
$\phi$	Porosidad	1,85%	

Los pozos fueron perforados con una profundidad y un diámetro, que son de 140 y 10 mm, respectivamente. A continuación, un tubo de metal, con un diámetro interior de 6 mm, se insertó en los pozos, dejando un 10 mm de sección central abierta del pozo del sondeo en el centro del bloque para la iniciación de la fractura (Figura 5-68).



**Figura 5-68. Esquema del interior del bloque. El espacio abierto en el sondeo es de 10 mm.**  
Fuente: Zhou [26].

Se empleó, durante las pruebas el fluido Guar de fracturación, con una viscosidad de 135 mPa s. Mientras tanto, se añadió un agente de rojo en el fluido de fracturación para una mejor localización de las fracturas hidráulicas. Además, se adoptó un caudal constante y su valor fue de  $4,2 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ . En esta condición, la presión máxima del fluido de inyección observado en las pruebas fue de 19,28 MPa.

Uno de los puntos claves de los experimentos de la fracturación hidráulica, es la simulación del esfuerzo in-situ. Se llevó a cabo experimentos en un régimen normal de esfuerzos de falla. En este caso, el esfuerzo máximo fue vertical y el valor constante del esfuerzo vertical  $\sigma_v$ , fue de 20 MPa. Mientras tanto, se utilizaron dos tipos de esfuerzos horizontales, de 5 y 10 MPa.

### 5.7.3 Resultados experimentales e interpretación

- **Influencia del esfuerzo in-situ y las fracturas naturales en la geometría de las fracturas hidráulicas**

El efecto del esfuerzo horizontal en la geometría de la fractura hidráulica, se determinó en las pruebas con un valor diferente para  $K_h$ , que se define como:

$$5-15 \quad K_h = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h}$$

En donde  $K_h$  es la diferencia del esfuerzo horizontal,  $\sigma_H$  es el esfuerzo principal máximo horizontal (MPa) y  $\sigma_h$  es el esfuerzo principal mínimo horizontal. En la Tabla 5-12 se muestran los valores utilizados en los experimentos, donde  $\sigma_v$  es el esfuerzo vertical en MPa.

**Tabla 5-12. Condiciones de los esfuerzos in-situ en los ensayos.**  
Fuente: Zhou [26].

Muestra No.	$\sigma_v$ Mpa	$\sigma_H$ MPa	$\sigma_h$ MPa	$K_h$
1	20	11	1	10,0
2	20	6	1	5,0
3	20	10	3	2,3
4	20	15	5	2,0
5	20	8	3	1,7
6	20	10	5	1,0

En los ensayos se observaron tres tipos de geometrías (Figura 5-69). Una fractura vertical principal con múltiples ramificaciones (Figura 5-70), otra con una fractura vertical parcial con ramificaciones aleatorias (Figura 5-71) y unas fracturas radicalmente aleatorias en forma de malla (Figura 5-72). Los resultados demostraron que una fractura hidráulica puede propagarse a lo largo de la dirección del esfuerzo horizontal máximo, a una diferencia de esfuerzos grande y también se puede decir que las fracturas naturales pueden conllevar a muchas ramificaciones aleatorias.

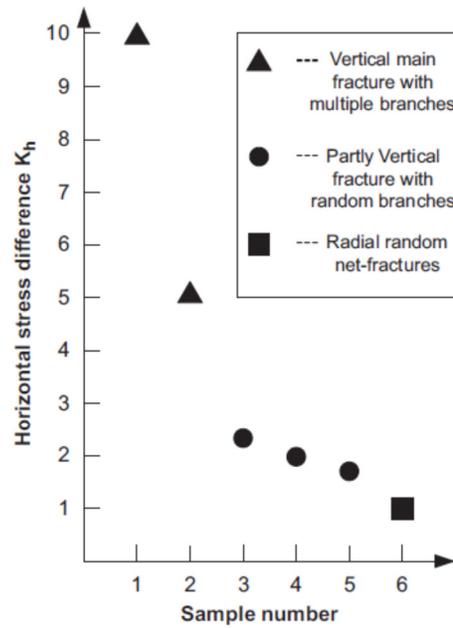


Figura 5-69. Relación entre la geometría de las fracturas hidráulicas y la diferencia del esfuerzo horizontal.  
Fuente: Zhou [26].



Figura 5-70. Fractura vertical principal con múltiples ramificaciones (muestra 1).  
Fuente: Zhou [26].

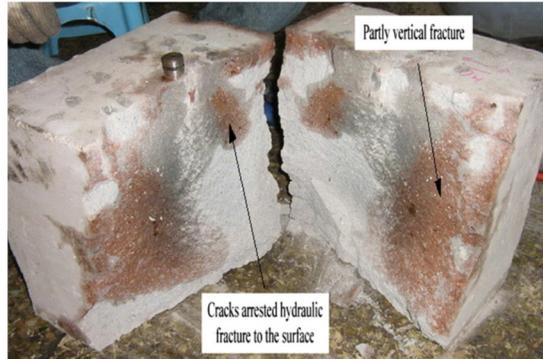


Figura 5-71. Fractura vertical parcial con ramificaciones aleatorias (muestra 4).  
Fuente: Zhou [26].

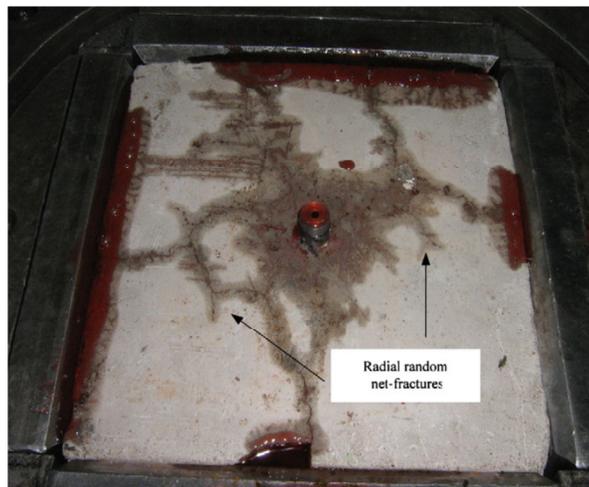


Figura 5-72. Fractura radicalmente aleatorias en forma de malla (muestra 6).  
Fuente: Zhou [26].

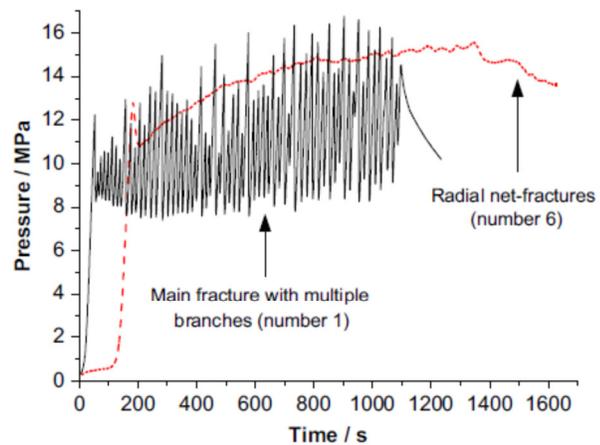


Figura 5-73. Señales de presión de las redes de fracturas radiales aleatorias y la fractura dominante con múltiples ramas.  
Fuente: Zhou [26].

En la Figura 5-73, se indican dos tipos de curvas de presión en el ensayo. La línea continua, representa la presión de la muestra 1, la cual fluctúa con una frecuencia alta durante toda la propagación. Esto indica que pequeñas fisuras adyacentes a la fractura principal, se abren y cierran frecuentemente debido a la presión de inyección. La línea punteada representa otro tipo de perfil de presión (muestra 6). En este proceso de inyección, la presión cambia muy lentamente o suavemente, en comparación con la muestra 1. Es evidente que la inyección del fluido causó que las fracturas naturales del bloque llegaran a un equilibrio entre el fluido de inyección y la filtración del sistema natural de fracturas.

▪ **El impacto de las fracturas aleatorias en la estimación del esfuerzo mínimo**

Se realizaron ensayos de mini fracturamiento hidráulico para estimar el esfuerzo mínimo horizontal. Las muestra utilizadas para estos ensayos son los mismos bloques de cemento, pero sin realizarles el calentamiento y enfriado para obtener fracturas naturales. Con los resultados se pudo calibrar el efecto de las fracturas naturales. El coeficiente de error para estimar el esfuerzo menor fue definido como:

$$5-16 \quad \eta_f = \frac{p_c - \sigma_h}{\sigma_h}$$

En donde  $\eta_f$  es el coeficiente de error estimado del esfuerzo mínimo,  $\sigma_h$  es el esfuerzo principal mínimo horizontal (MPa) y  $p_c$  es la presión de cierre (MPa). En la Tabla 5-13 se muestran los resultados de los ensayos de mini-fracturamiento hidráulico.

**Tabla 5-13. Condiciones de los esfuerzos in-situ en los ensayos.**  
Fuente: Zhou [26].

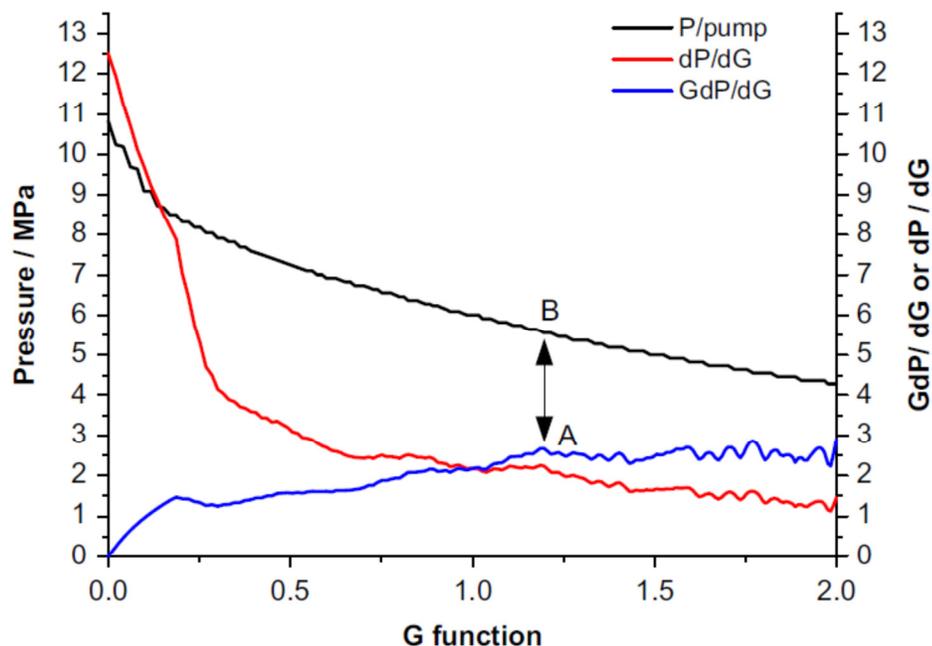
Muestra No.	$\sigma_v$ Mpa	$\sigma_H$ MPa	$\sigma_h$ MPa	$K_h$	$P_c$ MPa	$\eta_f$
M-comp	20	15	5	2,0	6,49	0,298
Min-1	20	10	5	1,0	5,83	0,166
Min-2	20	15	5	2,0	6,00	0,200
Min-3	20	10	5	1,0	5,77	0,154
Min-4	20	15	5	2,0	5,81	0,163
Min-5	20	10	3	2,3	3,50	0,167
Min-6	20	10	3	2,3	3,47	0,157
Min-7	20	11	1	10,0	1,32	0,320
Min-8	20	11	1	10,0	1,29	0,290
Min-9	20	11	1	10,0	1,35	0,350

La función-G es ampliamente utilizada para estimar la presión de cierre de cierta formación en la industria petrolera, de donde la presión disminuye entre el tiempo del shut-in y la reinyección. Esta relación se puede expresar de la siguiente forma:

$$5-17 \quad G(\Delta t_D) = \frac{4}{\pi} [g(\Delta t_D) - g_0]$$

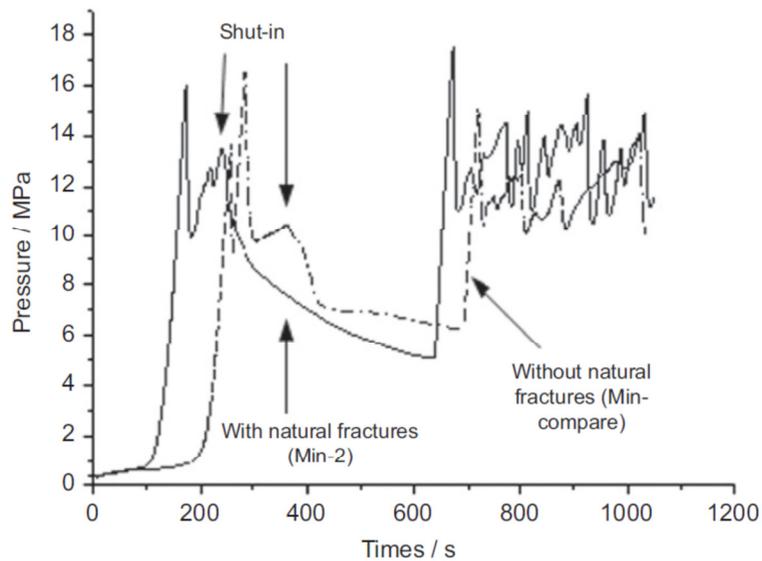
Donde  $g(\Delta t_D)$  es la función del volumen de la pérdida de fluido adimensional y  $g_0$  es el valor de  $g(\Delta t_D)$  al momento del shut-in.

La Figura 5-74, muestra las curvas de la función-G del ensayo Min-2. Se puede observar una disminución obvia de  $dP/dG$ , así como un incremento del valor de  $GdP/dG$ , hasta el punto A, entre 0,0 y 1,0 de la función-G, lo que demuestra que una fractura hidráulica dominante se está cerrando debido al shut-in en la bomba de inyección. Después de eso, no hay un aumento obvio del  $GdP/dG$ , entonces se puede determinar que el punto B es la presión de cierre y su valor es de 6,0 MPa.



**Figura 5-74. Análisis de la presión de cierre usando la función-G (muestra Min-2).  
Fuente: Zhou [26].**

Existen algunas diferencias entre los perfiles de presión de las fracturas naturales aleatorias y los ensayos con fracturas naturales. La Figura 5-75, muestra las curvas de presión del Min-comp (sin fracturas naturales) y el Min-2 (con fracturas naturales aleatorias). La presión de cierre se ve bien clara en las dos curvas de presión. La inyección de shut-in, se llevó a cabo en un pequeño tiempo después de que las fracturas hidráulicas se propagaran, debido al tamaño limitado de los bloques.



**Figura 5-75. Señales de presión de las redes de fracturas radiales aleatorias y la fractura dominante con múltiples ramas.**  
Fuente: Zhou [26].

Presión de cierre instantánea (shut-in), puede ser fácilmente reconocida en la curva de presión del ensayo Min-comp, ya que es un bloque homogéneo y no tenía fractura natural. Pero a partir de la curva de presión de Min-2, es difícil determinar directamente la presión de cierre en instantánea (shut-in).

### 5.7.4 Conclusiones

Se llevaron a cabo experimentos de laboratorio para investigar la influencia de los sistemas de fracturas naturales aleatorias en su geometría y el comportamiento de la propagación de las fracturas hidráulicas. Ambas fracturas naturales aleatorias y esfuerzos diferenciales in-situ dominan la geometría y el comportamiento en que se propagan. La fractura hidráulica tiende a ser una fractura dominante con múltiples ramas aleatorias al encontrarse con una gran diferencia de los esfuerzos horizontales. Por otro lado, la fractura tiende a ser en parte vertical y plana con ramas, al tener una baja diferencia de esfuerzos horizontales.

Los perfiles de presión podrían reflejar diferentes caracteres de los comportamientos que se propagan. Pequeñas fracturas naturales aleatorias podrían llevar a una alta frecuencia de las fluctuaciones de la presión durante la propagación de la fractura. Además, las fracturas naturales con fuerte mallado, podrían conducir a una presión más suave durante la inyección.

## 5.8 SIMULACIÓN EN EL LABORATORIO DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO (Papadopoulos, [27])

### 5.8.1 Introducción

Se han realizado muchos experimentos válidos, tanto en el laboratorio como en el campo, que han ayudado a identificar una o más características del proceso de la fracturación hidráulica. Además, se han desarrollado muchos modelos del proceso de fracturamiento hidráulico para fines de diseño en la ingeniería, pero ninguno ha sido aún verificado con detalle, lo que es un asunto de cierta preocupación en una industria de miles de millones de dólares.

Los puntos fuertes de los enfoques teóricos y experimentales, están siendo explotados, para guiar el desarrollo de modelos físicos y permitir la variación rápida de todos los parámetros y para sugerir modificaciones o nuevas consideraciones en el análisis e incorporar los fenómenos que son complejos para poderlos aplicar matemáticamente. Parte de este desarrollo paralelo será evidente en este trabajo.

### 5.8.2 Guías de análisis y simulación numérica

La propagación de la fractura depende de una variedad de factores; de la presión del pozo  $P_{fw}$  o del caudal  $Q_w$ , la viscosidad del fluido efectiva  $\mu$ , módulo de apertura  $E$  y confinamiento o esfuerzo de interfaces. Para esto se suman el transporte de depósitos y de propiedades de la discontinuidad, la geometría de la inyección y, posiblemente, los efectos de los límites en las muestras de laboratorio.

La geometría de la grieta circular se produce cuando se suministra fluido desde una fuente puntual, por ejemplo, cuando el crecimiento es perpendicular a un pozo de sondeo. El modelo de CGD (es decir en 2-D) se basa en la inyección de un fluido desde una fuente de línea, tal como un pozo de sondeo sin entubar, o a tiempos cortos cuando la longitud de propagación es mucho menor que la altura perforada, o si la fractura desboca perfectamente en la parte superior y la parte inferior de la altura perforada. Por último, el modelo PK describe una fractura que está limitada en altura y sin despuntar y que se propaga radialmente a una distancia de muchas alturas de fractura; utilizamos este nombre, como una pieza de acceso para todos los tipos donde el crecimiento vertical es severamente restringido, por ejemplo, mediante un mayor esfuerzo en el estrato adyacente.

El análisis más simple de crecimiento de las grietas en las geometrías mencionadas, reconoce una fórmula de la apertura inevitable de la grieta (con un coeficiente determinado numéricamente  $\gamma_1$ ), implicando el exceso de presión  $\sigma = p_{fw} - \sigma_c$ , el

módulo de la fisura efectiva de la apertura,  $\bar{E}$  (por ejemplo, lo que da la unidad para una grieta a presión de manera uniforme, por tanto,  $\bar{E} = G/2(1 - \nu)$  con isotropía) y  $R$  es cualquier grieta genérica de mediana longitud.

$$5-18 \quad \Delta = \gamma_1 \sigma R / \bar{E}$$

El análisis también asume el flujo de canal de tipo Poisseuille, para el fluido de fracturamiento en una grieta estrecha, utilizando un gradiente de presión efectiva  $\gamma_2 \sigma / R$  (con coeficiente numérico  $\gamma_2$ ), esto le da un vector de velocidad de flujo con magnitud  $q$  dada por:

$$5-19 \quad q^m = \Delta^{2n+1-m} (\gamma_2 \sigma / R) / \bar{\mu}$$

Donde  $\bar{\mu}$  es la viscosidad efectiva. La velocidad del cambio de volumen de una fractura esta dado (nuevamente con un coeficiente numérico determinado  $\gamma_3$ ) por:

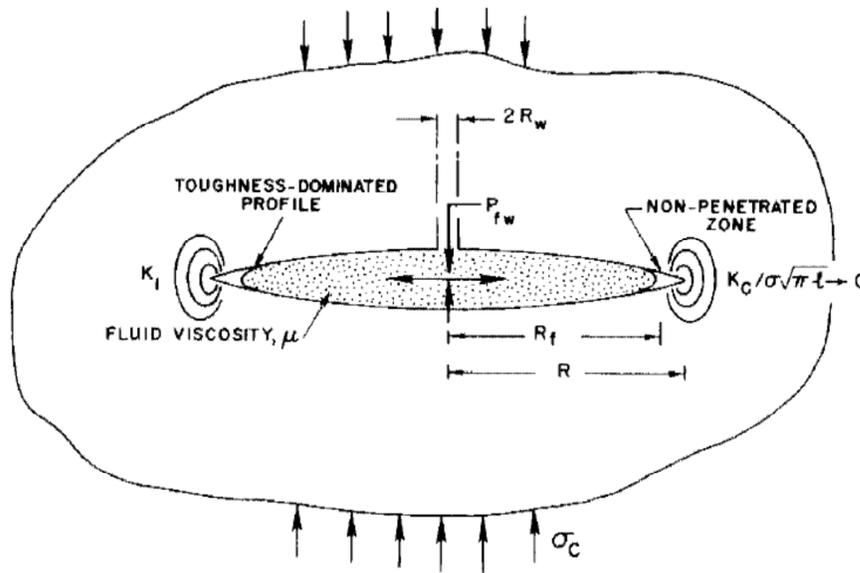
$$5-20 \quad \dot{V}_F = d(2\gamma_3 \ell R \Delta) / dt = \dot{V} - \dot{V}_L$$

Donde  $\ell$  es otra longitud efectiva (por ejemplo,  $\ell = R$  para el modelo CGD,  $\ell = H = R$  para grieta circular o PK). Colocando como ecuación la velocidad del flujo  $V = 2H_w q \Delta$ , con una velocidad de volumen de fractura cambiante  $\dot{V}_F$ , adicionando las pérdidas de velocidad  $\dot{V}_L$ , como lo mostrado en la Ecuación 5-20, se llega a:

$$5-21 \quad \dot{R} = \lambda R / \tau_c$$

Donde  $\tau_c = (\bar{E} / \sigma)^{2n+2-m} (\bar{\mu} / \bar{E})$  y  $\lambda / \tau_c$  es una constante de longitud de duplicación.

La conclusión principal es que la forma universal en que aparece el tiempo "natural"  $\tau_c$  debe utilizarse para diseñar experimentos que crezcan a una tasa conveniente, siempre y cuando el régimen de flujo sea el mismo (por ejemplo, laminar o turbulento, la ecuación 5-19), tanto para laboratorio como para condiciones de campo. Uno de los propósitos principales de los experimentos de separación de la interfaz, era para reivindicar el papel de la  $\tau_c$  en la ecuación 5-21 y a continuación, para comprobar en detalle los valores medidos de  $\lambda$ , contra los valores calculados, según el análisis, los valores de  $\lambda$  dependen sólo débilmente del  $\sigma_c = \sigma$  (si esta no es pequeña) para todas las geometrías;  $\lambda$ , es casi constante para la grieta CGD, dando una tasa de crecimiento exponencial para la presión constante para la configuración de PK,  $\lambda$ , es proporcional a  $(H_w = L)^{m+1}$ , donde  $H_w$ , es la altura del pozo y  $m$  es la característica del fluido ( $m = n = 1$  para fluidos newtonianos). Sin embargo,  $\lambda$  va más o menos como  $R_w / R$  ( $R_w = H_w / \pi =$  radio del pozo) por el moderado crecimiento logrado en las geometrías circulares, dando por la propagación de ley de potencia, que es casi lineal.



**Figura 5-76. Señales Contexto de mecánica simple, para la fractura impulsada por un fluido.**  
Fuente: Papadopoulos, [27].

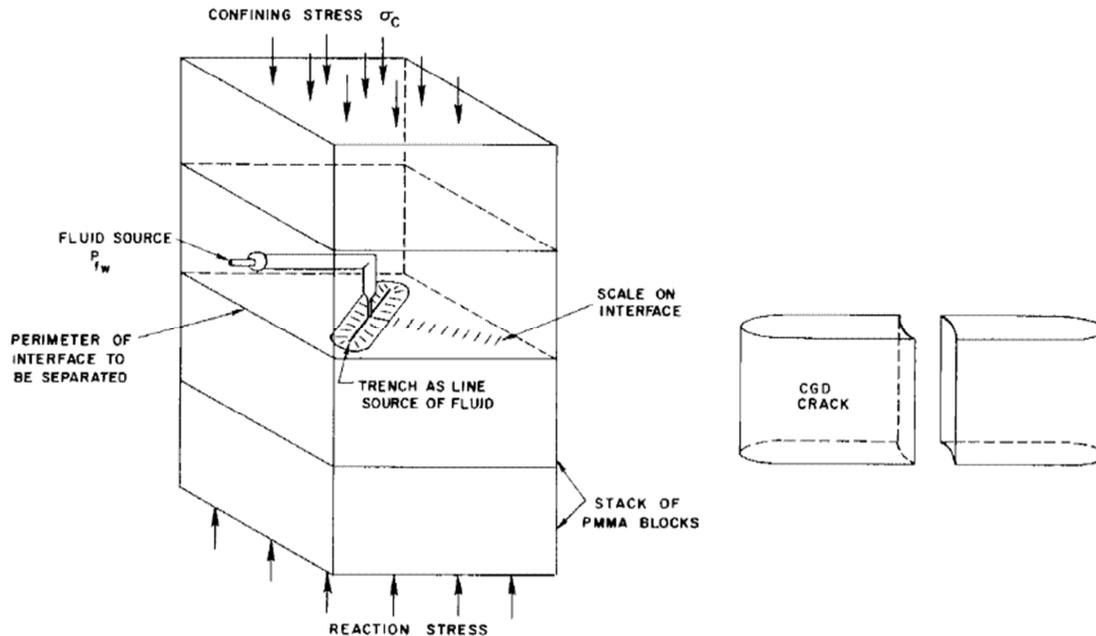
La conclusión se señala también, que la típica expresión,  $K_C/\sigma\sqrt{\pi l}$ , los radios son demasiado pequeños para ser importantes para determinar la evolución de las grandes fracturas en crecimiento. Esto sugiere que las simulaciones adecuadas de evolución plana se pueden lograr con el caso límite  $K = 0$  es decir, por la separación de interfaz, en este caso, el crecimiento de la fractura es controlada por las tensiones que actúan a través de la fractura cerrada.

### 5.8.3 Experimentos de interfaz de separación

El experimento obvio, sería el explotar al creencia de que  $K_1 = 0$ . Esto se puede simular con precisión, en las condiciones típicas de campo, al limpiar y volver a montar una muestra fracturada. Sin embargo, la re-fractura es difícil, especialmente si la fractura ha sido dañada y la visualización puede tornarse imposible. En cambio, se ha desarrollado un experimento en el que dos bloques planos y bien equipados de materiales, se presionan entre sí mediante el confinamiento y luego un líquido se inyecta en esta interfaz (Figura 5-77). La mancha de difusión del fluido es entonces la simulación de una gran fractura hidráulica.

Este enfoque tiene muchas ventajas, puesto que el camino de la fractura se limita a una superficie predeterminada, sin giros, por lo tanto, se requiere sólo uno de los tres esfuerzos. Con un material transparente, es fácil ver la fractura a medida que crece. También, el conocer el camino que hace la fractura, hace fácil la interpretación de la instrumentación, ya que los transductores se pueden colocar directamente en la

trayectoria de la fractura. Por ejemplo, para medir la distribución de la presión y el esfuerzo de confinamiento de antemano.



**Figura 5-77. Señales Modelo CGD (2D) de la fractura, en un aparato de separación de temprana interfaz, alimentada por una fuente de fluido.**  
Fuente: Papadopoulos, [27].

Dos bloques pulidos y bien acoplados, de polimetacrilato de metilo (PMMA), junto con bloques adicionales para distribuir las cargas, se presionan entre sí con una prensa de 30 t de capacidad y un líquido se inyecta en la interfaz (Figura 5-77). La alta viscosidad del fluido (106 cp, 103 Ns/m<sup>2</sup>, 145 lb-s/m<sup>2</sup>) redujo las fugas en el sistema hidráulico y se generó un crecimiento lento, incluso con un gran  $P_f$  y una apertura de la grieta moderada  $\Delta$ . Se tomó una cantidad considerable de datos, aunque se evidenció fuertemente el fenómeno creep en el PMMA y cuando ya se dio cuenta de este hecho, todos los experimentos ya se habían realizado.

Los datos se indican en la Figura 5-80. Ellos se han tomado a partir del vidrio y los bloques de PMMA, con el punto y la línea de inyección (circular, PK y CGD), e incluso con piedra arenisca como un bloque (para comprobar el efecto de la pérdida de fluido a la formación). Sólo la simulación circular se comporta bien, pero aun así hubo los siguientes problemas:

- 1) La fluencia visco-elástica aumentó en ensayos de reapertura (disminución de tiempo del orden del 50%).
- 2) Había una dependencia inesperada en  $\sigma_c$  con  $\epsilon\sigma$ , que se cree que es causada por el esfuerzo interfaz, no uniforme, debido al confinamiento de carga (una

observación importante para otros experimentos de grupos, donde  $\sigma_c$  siempre ha sido inducida por la carga externa de tales bloques).

- 3) Las fuerzas y presiones requeridas eran demasiado altas, los cambios para los parámetros fueron restringidos.

En la versión mejorada, se trató de mantener las dimensiones, escalas de tiempo y transparencia, para reducir la presión, eliminar la respuesta visco-elástica sólida y para aumentar la apertura, con el fin de dominar aún más las imperfecciones de la superficie. El resultado, llamado DISLASH (Aparato de Laboratorio de Escritorio de Separación de Interface, para la simulación del hidro-fracturamiento), es compacto, económico, versátil y no requiere ni un armazón de carga pesada, ni un sistema de alta presión de fluido (véanse la Figura 5-78 a Figura 5-79). En resumen, el ensayo se ejecuta por medio de unos pernos en un cilindro de goma lleno de un bloque de PMMA. Se presurizan la goma con aire, luego se inyecta el fluido en la interfaz caucho/PMMA y se observa el movimiento del fluido en el perímetro. Un aparato servo-controlado también se desarrolló para operar este proceso según fuera necesario.

Con la Ecuación 5-18, se observa que para obtener mayor  $\Delta$  con  $R$  fijo, se requiere reducir sustancialmente el valor de  $\bar{E}/\sigma$ . Cuando esto se inserta en la ecuación 5-21, un resultado consistente, es que para mantener la  $R$  y reducir  $\bar{E}/\sigma$ , se requiere un mayor  $\bar{\mu}/\bar{E}$ , o también un valor más pequeño de  $\bar{E}$ . Se adoptó un material moldeable, de baja contracción, la goma de silicona de alta elasticidad, con un valor de  $\bar{E} = G/2(1 - \nu) = 83/(1 - 0.43) = 146 \text{ psi}$ , dando una reducción del módulo de  $10^3$ . Para conservar la transparencia para la visualización, se presionó un bloque contra un compartimento en el bloque de PMMA deformable, en vez de usar dos bloques de caucho.

Una vez que se establecieron los principales elementos de DISLASH los siguientes factores fueron considerados:

- 1) La caída de presión en la línea del suministro del fluido y del pozo eliminado de forma verificable los diámetros de tuberías y longitudes y la viscosidad.
- 2) La adición del caucho al PMMA, reduciendo por 0,5 mil, 1 hoja de Mylar aluminizado.
- 3) El problema de la no homogeneidad de la viscosidad del fluido, es un problema sólo con solución al adicionarle sacarosa.

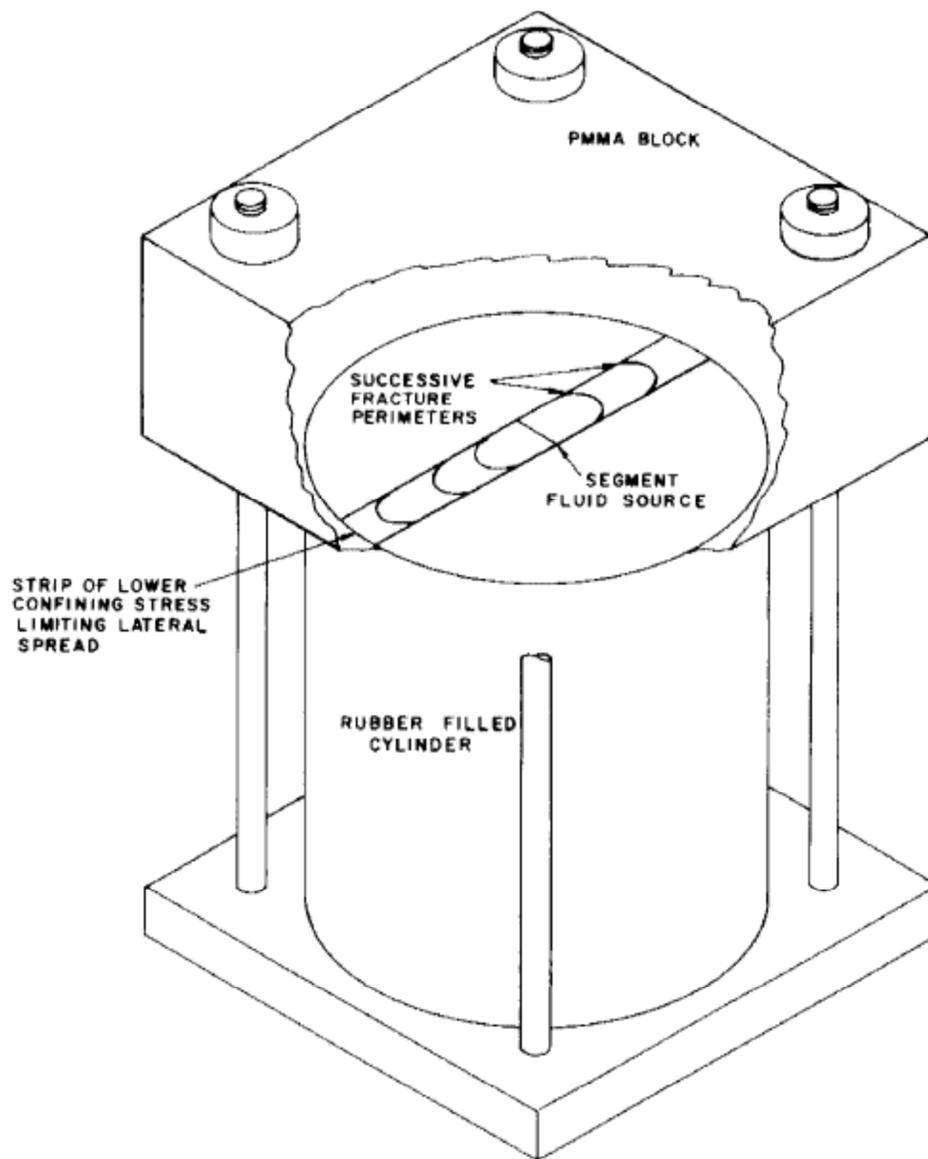


Figura 5-78. Modelo Perkins y Kern (PK), para la simulación de las fracturas delimitadas en altura, pero que se extiende lateralmente desde el pozo.  
Fuente: Papadopoulos, [27].

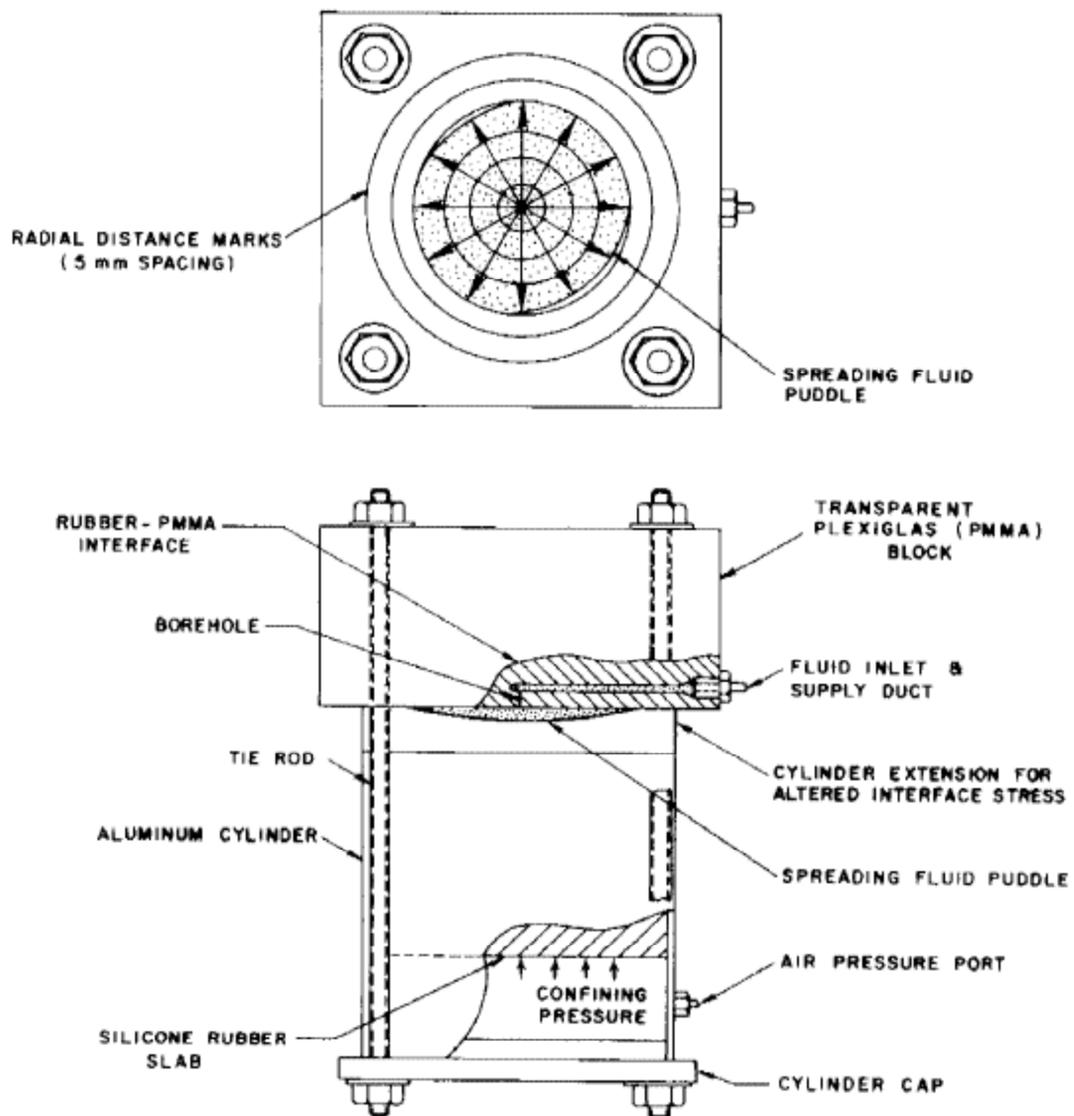


Figura 5-79. Aparato de interfaz del escritorio de laboratorio para la simulación de hidrofrac (DISLASH), se muestra el modelado de una grieta circular.

Fuente: Papadopoulos, [27].

- 4) Al no controlar la temperatura se puede generar una sensibilidad de la viscosidad y el esfuerzo de contacto a la goma, como por ejemplo, el contacto de las manos con la goma cambia los esfuerzos. Por eso es recomendable instalar un sistema de control de la temperatura.
- 5) Las fuerzas capilares en "fractura" de punta, producen una tenacidad del material.
- 6) La interfaz de marcado permanente sin afectar el crecimiento de la fractura si no se estudia la redondez, las finas rayas sobre un pequeño sector son adecuadas.

En la Figura 5-80, se muestran los datos de la simulación Penny con los bloques PMMA, algunos datos DISLASH buenos recientes y una zona de resultados teóricos. Los primeros resultados representativos muestran dependencias inesperadas en  $\sigma_c/\sigma$ , probablemente explicado por la coincidencia de interfaz imperfecta, ya que son generalmente más rápidos que los que se computan. La principal conclusión que puede extraerse es que  $\tau_c$  actúa como una escala de tiempo sobre una gran variedad de parámetros del experimento.

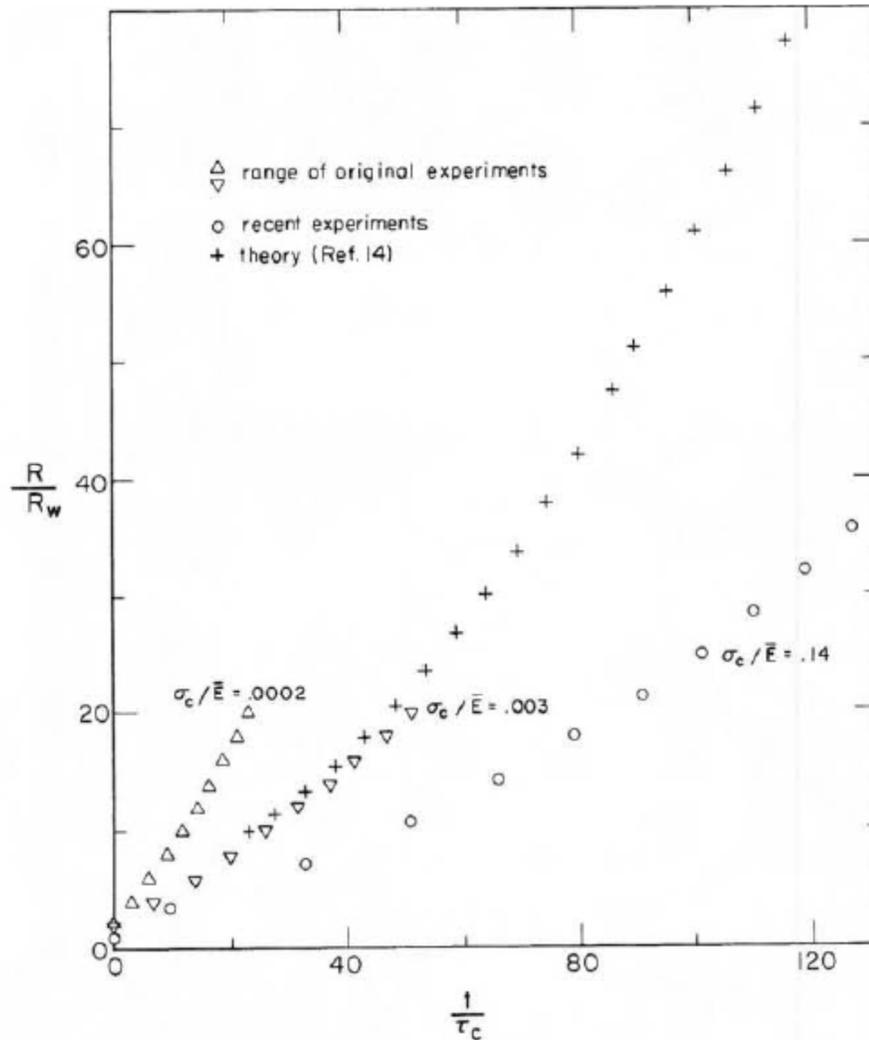


Figura 5-80. Gráfico escalado de resultados originales, resultados recientes y los teóricos.  
Fuente: Papadopoulos, [27].

#### 5.8.4 Experimentos de interacción de la fractura

La dureza del material es típicamente insignificante al decidir el alcance general, pero no la orientación de las fracturas en la escala de las operaciones subterráneas típicas y que

el estado general de esfuerzos es necesariamente dominante en el orden de las formas secuenciales y orientaciones del crecimiento de las fracturas hidráulicas.

Se puede simular este proceso escalando adecuadamente la resistencia al tamaño y la presión en el interior de las muestras y luego someterlas a esfuerzos sesgados (por ejemplo, limitando el esfuerzo y aumentando la carga axial) mientras se produce simultáneamente fracturas internas por la presurización del pozo.

Los supuestos y las leyes de escala utilizados en los experimentos son similares a los descritos anteriormente para los experimentos de separación de la interfaz. Sin embargo, en contraste con DISLASH, la resistencia a la fractura de los bloques de cemento no es cero; aunque es insignificante en comparación con el trabajo realizado contra los esfuerzos externos aplicados, que desempeñan un papel dominante en el proceso de descohesión importante que afecte a la orientación de la punta de la fractura.

Se hizo evidente que se puede aprender un poco más, una vez la capacidad experimental en general ha sido completamente desarrollada:

- Si las fracturas hidráulicas en general se vuelven una hacia la otra y se unen, la fractura masiva resultante podría ser utilizada prácticamente.
- Ese conocimiento también permitiría predecir cómo se comporta una fractura cerca de una superficie libre o la falta de homogeneidad de la formación.
- Se podría determinar cómo evolucionan las fracturas después de la iniciación de un pozo.
- Se podría predecir el crecimiento en diversos campos de tensión.
- Por último, el tema realmente merece un estudio fundamental, ya que de ninguna manera están generalmente entendidos y muchos experimentos (al parecer, con un crecimiento intrínsecamente inestable) están actualmente en curso, con varias demandas resultantes sobre las leyes de crecimiento.

En las siguientes secciones, se describen brevemente las principales consideraciones en el diseño de los experimentos de interacción de la grieta, para simular las condiciones de campo en la mayor medida posible, así como para proporcionar una comparación útil entre teoría y experimento.

- A. Elección del Material - Cemento Pegante. En el campo, la fracturación hidráulica se realiza en capas de rocas que suelen ser miles de metros de profundidad. A estas profundidades hay altos esfuerzos de compresión; estos esfuerzos actúan para cerrar una grieta, un efecto que es equivalente a una mayor tenacidad del material. Si los esfuerzos de confinamiento son lo suficientemente altos, la tenacidad del material real está eclipsada por esta aparente dureza, lo que hace

que la tenacidad del material sea insignificante. Con el fin de simular esto en el laboratorio, se requiere un material con muy baja tenacidad. Sobre la base de este criterio, junto con las consideraciones de costos, tiempo y disponibilidad, la pasta de cemento fue elegida como el medio de la fractura. La pasta de cemento es una mezcla de cemento hidráulico y agua. Su dureza, está en el intervalo de 70 a 240 psi  $\sqrt{\text{in}}$

- B. Confinamiento. Con el fin de simular el efecto de las tensiones de confinamiento subterráneas en la estabilización de crecimiento de la fractura, las pruebas se realizaron en un gran (12 pulgadas de diámetro interno por 16 pulgadas de longitud) recipiente a presión que proporciona la tensión hidrostática, con un actuador hidráulico interno para proporcionar el esfuerzo desviador (por lo tanto evitando convenientemente un marco de ensayo). Las altas presiones se eligieron para producir la apertura de grietas razonablemente grande y especialmente para ayudar a escalar correctamente la tenacidad de la fractura de los materiales disponibles.
- C. Líquido viscoso de fracturamiento. El fluido de fracturación viscoso, que tiene una viscosidad de aproximadamente  $6 \times 10$  centipoises, fue elegido para retardar el proceso de rompimiento a niveles aceptables (de orden de pulgadas por hora), dado el alto exceso de presión que se utiliza.

Después de la aplicación de las tensiones hidrostáticas y parciales, las fracturas se propagan mediante la inyección de fluido internamente a presiones por encima los del recipiente. Todo el proceso está dirigido por un micro-ordenador de laboratorio, con servo control de la presión y las fuentes de fluidos, y la grabación automática de la presión y del flujo.

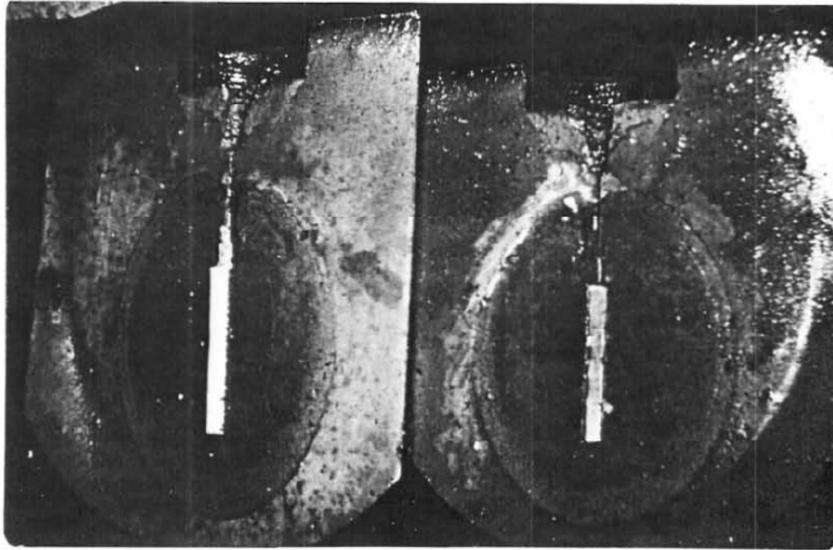
Se realizaron un gran número de pruebas con el aparato, con el desarrollo de la confianza en él, extrayendo mucha nueva fenomenología y la verificación de las predicciones del modelo teórico correspondiente. Lo principal de estos experimentos fueron los siguientes puntos:

- 1) Las grietas individuales en muestras homogéneas bajo presión hidrostática. Estos crecen hacia adelante (Figura 5-81), como se esperaba, a excepción del giro inducido cuando se acercan a los límites de las muestras, que también está de acuerdo con las predicciones de los modelos.
- 2) Dos grietas en muestras homogéneas bajo presión hidrostática. Estos muestran distinta interacción (Figura 5-82a), ya que la curva que se rodean y se vinculan en configuraciones típicas de la fracturación de pozos adyacentes en el campo. Como se muestra en la Figura 5-82b, las predicciones teóricas de las trayectorias de fractura se comparan muy bien con los obtenidos experimentalmente;

3) Las grietas individuales en un campo de esfuerzos (es decir, no isotrópica o no hidrostática) de confinamiento parcial, en diversas orientaciones iniciales, cambian dramáticamente hacia la dirección del esfuerzo máximo (Figura 5-83a), con una rapidez que aumenta como una función fuerte que depende de la tensión dividida por el exceso de presión.

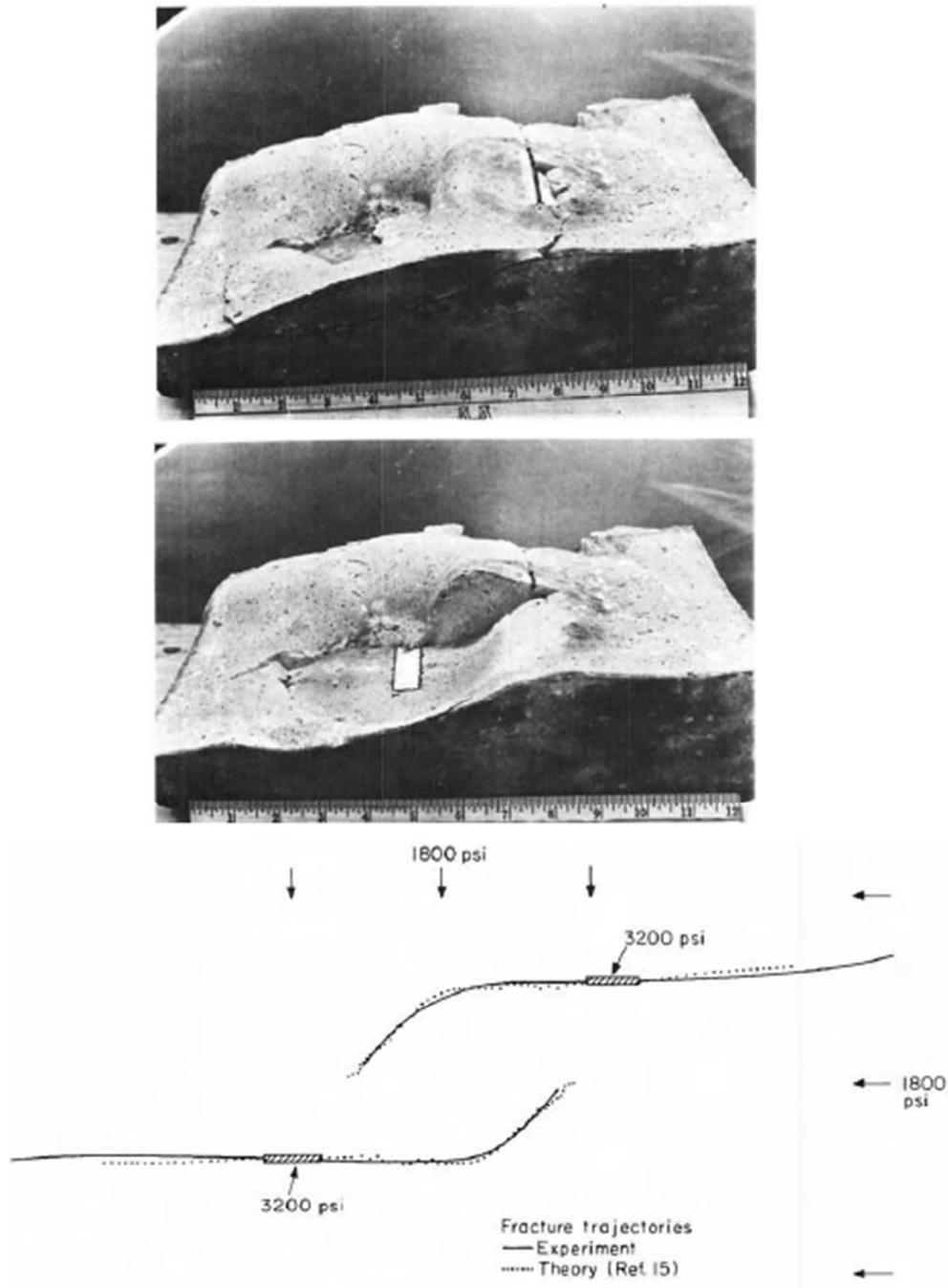
4) Dos grietas en un campo de esfuerzos desviador. El crecimiento resultante es una interesante combinación de (2) y (3), con los efectos de la competencia en la región media (entre los pozos). Un gran número de pruebas del estudio de repetitividad y de parámetros, ha sido dirigido para las configuraciones anteriores, y también se realizaron una serie de pruebas exploratorias para las siguientes situaciones (que se planean explorar más a fondo).

5) El crecimiento de una sola fractura cerca de una inclusión. Aquí se observan fenómenos como el avance de una sección de la fractura, mientras que otro segmento logró curvarse alrededor de la inclusión (más rígido) cuando se acercaba.



**Figura 5-81. Superficies de crecimiento de la fractura en la muestra bajo esfuerzo hidrostático.**

**Fuente: Papadopoulos, [27].**



**Figura 5-82. La interacción entre las fracturas que crecen en pozos adyacentes, a) las superficies de crecimiento de la fractura. b) Comparación entre las trayectorias teóricas y experimentales.**

**Fuente: Papadopoulos, [27].**



Figura 5-83. Crecimiento de la fractura en el campo de esfuerzos sesgados. a) superficies de fracturas típicas. b) Comparación entre las trayectorias teóricas y experimentales.

Fuente: Papadopoulos, [27].

### 5.8.5 Conclusiones

Una capacidad global fue desarrollada para estudiar el crecimiento de las fracturas hidráulicas, especialmente en dos grandes regímenes distintos: interacción mutua/tectónica y de reorientación de las fracturas en diversas geometrías (incluyendo pozos) y de extensión (por ejemplo, posteriormente masiva) a lo largo de las superficies predeterminadas. Un gran número de experimentos fue ejecutado, dando buenos resultados repetibles con una variedad aparentemente ilimitada de experimentos de fracturas.

Se espera que los experimentos futuros, tengan en cuenta los siguientes aspectos a detallar, por ejemplo:

- 1) Efectos detallados de no homogeneidad del  $\sigma_c$ : El salto inter-estrato, u otra variación del  $\sigma_c$ , puede ser capturada por moldeos de caucho para que sea no plano, lo que ya se ha alcanzado aproximadamente. Esto requiere mecanismos precisos para hacer un molde, pero no hay otras dificultades que son evidentes.
- 2) El valor de  $E$  no homogéneo: Para simular el salto del inter-estrato, el caucho de silicona puede rodear bloques de goma de diferentes módulos, cada uno que simule un estrato de roca, por ejemplo.

La geometría de inyección variada, desde el punto a la línea segmentada.

- 3) La afectación de los poros en el fluido: las fugas en el caucho permeable y el esfuerzo inducido por los cambios de presión de poros.

Además, se debe llevar a cabo extensas pruebas de interacción de la grieta, en las siguientes investigaciones:

- 1) El crecimiento de una fractura en una capa de material diferente en sus alrededores, que muestre el papel de módulo, la permeabilidad y el esfuerzo contrastado; algunos experimentos preliminares parecen mostrar fuertes efectos de la interfaz de unión.
- 2) El papel de la distribución de presión de poros en el crecimiento de la fractura, en especial el fenómeno de la atracción de la fractura con la disposición de los pozos.
- 3) El crecimiento de las fracturas locales a fracturas globales con formas distintas.

## 5.9 MÉTODO DE ENSAYO DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO PARA LA MEDICIÓN DE ESFUERZOS EN ITALIA (Barla, [28])

### 5.9.1 Introducción

En Italia, donde el territorio es caracterizado por la presencia de colinas y montañas, con un patrón muy irregular, por tal motivo la identificación y cuantificación de las propiedades significativas del macizo rocoso, es un problema muy relevante para muchos proyectos de ingeniería subterránea. Por el contrario, la medición de los esfuerzos se llevaba a cabo, en su mayoría en estructuras subterráneas cerca a la superficie por medio del método de “doorstopper” y “flat-jack”, lo cual daba un resultado irregular y con una incertidumbre en la distribución de los esfuerzos con la profundidad. Teniendo esto en mente, se está haciendo un esfuerzo para tener un acercamiento real con la técnica del fracturamiento hidráulico para la determinación de los esfuerzos en la ingeniería de rocas.

### 5.9.2 Medición del esfuerzo de la roca en Italia

Por 15 años, se han documentado los resultados de mediciones de esfuerzos in-situ, en algunas plantas de generación subterráneas o minas importantes. Se ha utilizado el método de “doorstopper”, para dichas mediciones, así cubriendo diferentes condiciones geológicas, estructurales y morfológicas (Figura 5-84).

Según las ilustraciones mostradas en las Figura 5-85 y Figura 5-86, se pueden tener en cuenta las siguientes observaciones:

- El esfuerzo vertical  $\sigma_v$ , tiene un valor igual o mayor que los valores de  $\sigma_h$  calculados por el sobrepeso del estrato h (Figura 5-85). Análisis teóricos realizados al asumir que el comportamiento elástico o elasto-plástico de la roca, muestran que en relación al talud, el valor de  $\sigma_v$  debe ser de cierta manera mayor que el valor de  $\sigma_h$ .
- En taludes de montañas o contrafuertes, la inclinación del esfuerzo máximo en la sección vertical, está localizada entre el talud y la vertical. Esto concuerda con la evaluación teórica del esfuerzo que se genera con el macizo rocoso después de la excavación de la montaña (Figura 5-86).



Figura 5-84. Localización de los sitios en Italia donde se han realizado mediciones de los esfuerzos in-situ.

Fuente: Barla, [28].

- En las minas Raibl, S. Giovanni y Masua, los esfuerzos verticales son mucho mayores que los correspondientes a la sobrecarga. Para el primer caso, esto se da gracias a que el sitio de medición está localizado en el fondo del valle alrededor de montañas altas y para el segundo caso, es más difícil dar alguna explicación. En la mina Masua los resultados fueron afectados por la vecindad, en la zona del ensayo, con una mina a campo abierto.
- El esfuerzo principal secundario, localizado en el plano horizontal, están usualmente orientados según el eje del valle.

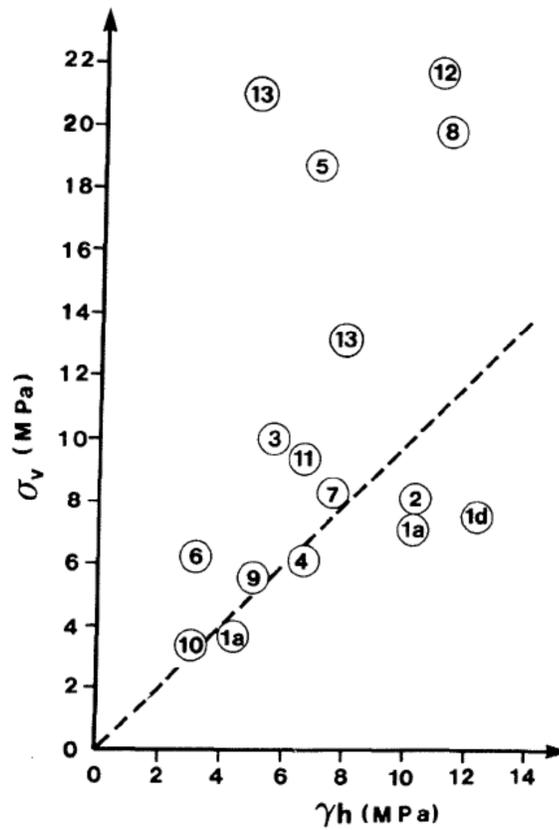


Figura 5-85. El esfuerzo vertical del ensayo versus la presión de sobrecarga.  
Fuente: Barla, [28].

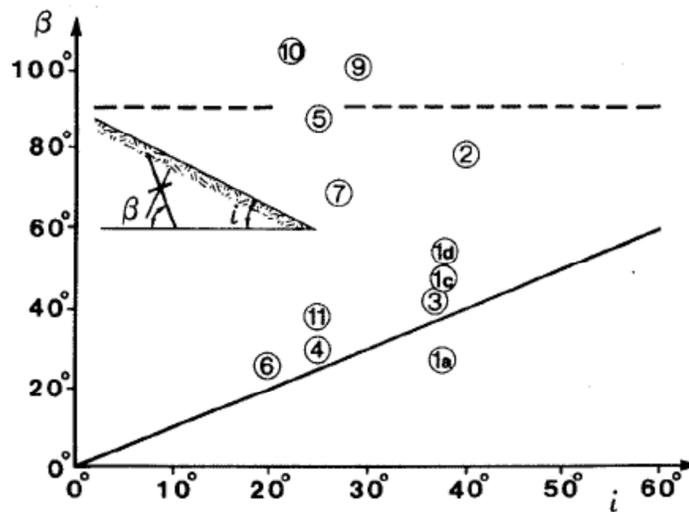


Figura 5-86. La inclinación  $\beta$  del esfuerzo secundario versus la inclinación del talud.  
Fuente: Barla, [28].

### 5.9.3 Acercamiento al fracturamiento hidráulico

La suposición de las condiciones geostacionarias, introducidas en el diseño inicial, induce a error con respecto a la forma, el tamaño y la orientación de las aberturas subterráneas, a fin de hacer que algún cambio durante la excavación real, salga muy costoso. Este hecho, relacionados con las desventajas comunes a los métodos indirectos para mediciones del esfuerzo de la roca (es decir, CSIR “doorstopper”) tales como:

- La dificultad y los gastos asociados con la conducción de una galería piloto o de acceso a los túneles en el área de una cavidad subterránea planificada.
- La profundidad del túnel que va a ser diseñado, que solamente se puede llegar por medio de sondeos perforados desde la superficie.
- Las mediciones puntuales que se desarrollan en áreas muy pequeñas.
- La necesidad de medir los parámetros elásticos para convertir la deformación medida en esfuerzo.

Todos estos puntos, hacen que sea imperativo buscar una posible aplicación de la fracturación hidráulica para la ingeniería de rocas, en la etapa de diseño de cavidades y túneles subterráneos.

La técnica de fracturación hidráulica, se puede utilizar en agujeros profundos o en agujeros cortos alrededor de túneles. Por ejemplo, teniendo un sitio de un proyecto hidráulico subterráneo planificado, la técnica de fracturación hidráulica se puede utilizar directamente en los agujeros de exploración perforados en el área general de las cavernas planificadas (Haimson, 1984). Por lo tanto, no son necesarios los gastos adicionales para la perforación de agujeros especiales para mediciones de tensión. Además, los esfuerzos se estiman como parte de la investigación preliminar antes del diseño real, sin causar retrasos y no requiere de cambios en el diseño. Si es necesario, las pruebas de overcoring también se pueden llevar a cabo más adelante, cuando se excaven las galerías pilotos o de acceso a los túneles. Ellos pueden proporcionar un control sobre los resultados de fracturación hidráulica y aumentar la confianza en las condiciones de esfuerzo de contorno utilizados en el diseño. Además, es de destacar que tradicionalmente la forma de los túneles y cavernas y sus orientaciones se deciden al principio del proceso de diseño, mientras que las mediciones overcoring se llevan a cabo considerablemente después.

Los diferentes factores antes mencionados llevaron a iniciar un programa de investigación sobre la fracturación hidráulica, orientado a destacar las mediciones con fines en la ingeniería de rocas. En la actualidad, se tiene en cuenta sobre todo, para pruebas de laboratorio en muestras de roca (forma cilíndrica) y el material remodelado (forma cúbica); el equipo ha de ser establecido y debe a ser probado en el campo.

### 5.9.4 Pruebas de laboratorio

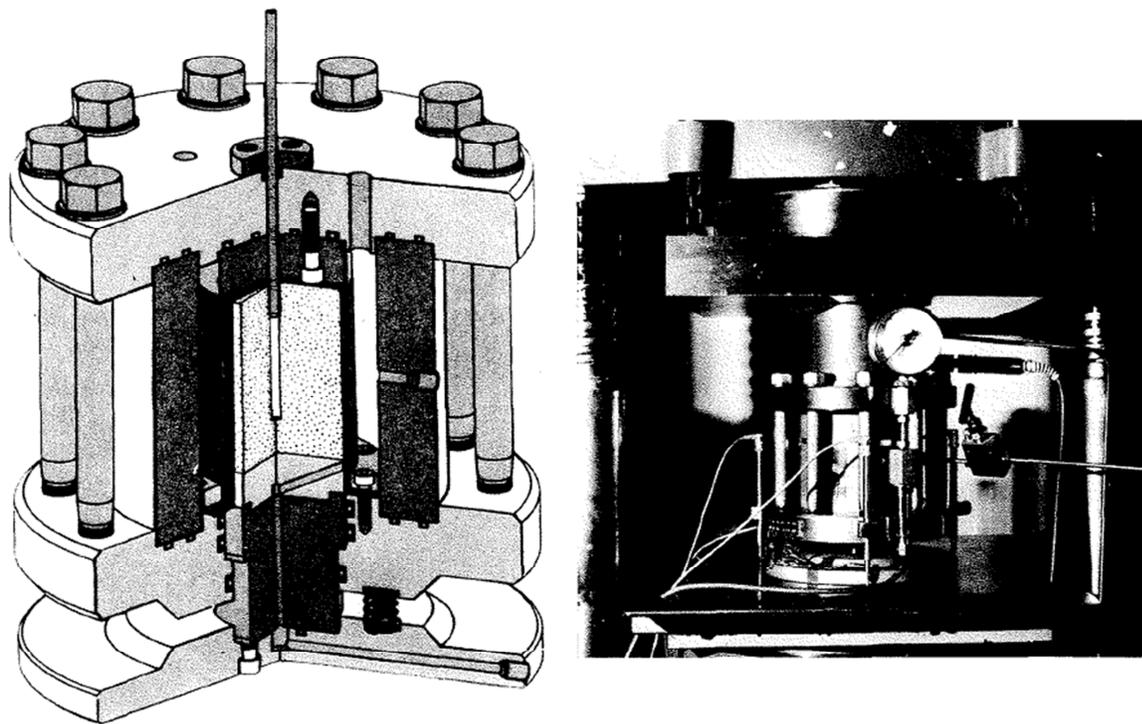
Un número de factores son conocidos por influir en los resultados de la interpretación teórica de los datos de campo. Se consideran de interés los siguientes:

- Diámetro del agujero.
  - Resistencia a la tracción de la roca.
  - Líquido de viscosidad y permeabilidad de la roca.
  - Rigidez de los envasadores.
  - Flujo y/o tasa de presurización.
  - Condiciones térmicas (para agujeros más profundos).
  - La interacción entre las fracturas inducidas y la roca con juntas preexistentes (Zoback et Al.1977), que a menudo se reunieron durante la excavación en Italia y se están investigando en toda las pruebas de laboratorio.
- Ensayando los especímenes de roca

Una célula triaxial fue utilizada bajo una presión de confinamiento hidrostática de hasta 75 MPa y un esfuerzo vertical (aplicado por una máquina de carga 5 MN), en un rango de temperatura de 18° a 200°C, se ha diseñado y desarrollado en el Laboratorio de Mecánica de Roca de ENEL-CRIS (Figura 5-87).

Se pueden ensayar muestras de roca, de 80 mm de diámetro y 100 mm de altura; cada muestra contiene un agujero de 8 mm de diámetro, para ser utilizado en la inyección del fluido en el proceso de fracturamiento hidráulico. El tubo de entrada se sella con una resina especial, en la parte superior de la muestra; de una manera similar, la unión en la parte inferior también está sellada, con el fin de obtener la misma rigidez en ambos extremos del agujero. La cámara que rodea la muestra de roca (encapsulado por una membrana de silicona) se obtiene por un cilindro hueco de acero, cerrado en sus extremos por medio de dos monturas. Estas están bloqueadas por diez tirantes verticales, que permiten que las pruebas que puedan realizar en condiciones en que el esfuerzo lateral es mayor que el esfuerzo vertical. Un sistema hidráulico se utiliza para aplicar las presiones laterales y de fracturación hidráulica (hasta 140 MPa) de la muestra de roca.

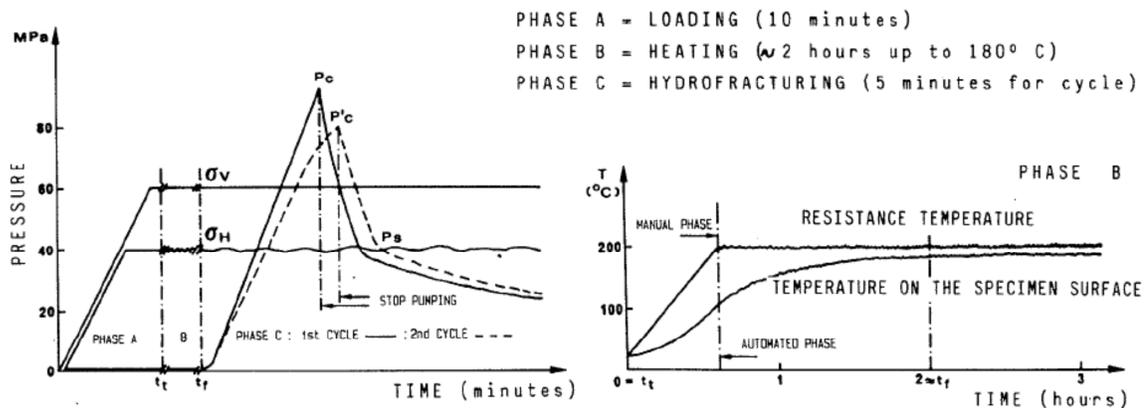
En todos los casos, los gradientes de presión son controlados muy cuidadosamente, con un número de transductores montados a fin de medir la presión en la celda y cerca del tubo de inyección de fluido.



**Figura 5-87.** Izquierda; una vista isométrica de la cámara triaxial usada para los ensayos con muestras de roca. Derecha; fotografía de la celda entre los pistones de carga.  
Fuente: Barla, [28].

La muestra de roca se puede calentar gradualmente, de acuerdo con el ciclo de calentamiento elegido antes de la prueba. Dos sistemas diferentes se han creado para este fin. Cualquiera de los elementos de calefacción cerca de la muestra, como un horno dentro de la célula (diez grupos de resistencias térmicas conectadas para calentar poco a poco y así para evitar perturbar a la roca), o se pueden utilizar, un intercambiador de calor, externo a la célula. Un número de controladores y sensores térmicos se aplican para el monitoreo. Además, la carga vertical y diferentes condiciones de presión (presiones laterales de fracturación hidráulica) son controladas y continuamente trazadas durante las pruebas.

Los resultados de una prueba típica, llevados a cabo para reproducir el fenómeno de fracturación hidráulica en condiciones de alta temperatura y presión, se muestran en la Figura 5-88 (prueba realizada con el control de la tasa de presurización). Con un determinado estado de "esfuerzo" ( $\sigma_v$  = esfuerzo vertical;  $\sigma_h = \sigma_{h \text{ máx}} = \sigma_{h \text{ mín}}$  = esfuerzo horizontal) aplicada a la muestra, se inicia el ciclo de calentamiento, a fin de obtener de forma gradual (5~7°C/min) la temperatura deseada. Con que se alcancen condiciones de estado constantes, el agua es inyectada en el orificio central del espécimen; las condiciones de presión se monitorizan continuamente con el fin de conocer la ruta de esfuerzo que se aplica durante la prueba.



**Figura 5-88. Resultados de un ensayo típico de fracturamiento hidráulico.**  
**Fuente: Barla, [28].**

En el valor de pico, cuando se alcanza una disminución repentina de presión; una palanca libera un actuador neumático, que está situado en el lado de la entrega, para detener de bombeo de fluido. En consecuencia, las condiciones de equilibrio  $P_s = \sigma_h$ , se pueden alcanzar. La prueba se repite con un nuevo ciclo de presión, para obtener el límite inferior de presión  $P'_c$ . Se sabe que el  $P_c$  de dos valores de pico y  $P'_c$ , permiten medir la resistencia a la tracción en la roca  $\sigma_t = P_c - P'_c$ , para las condiciones reproducidas durante la prueba.

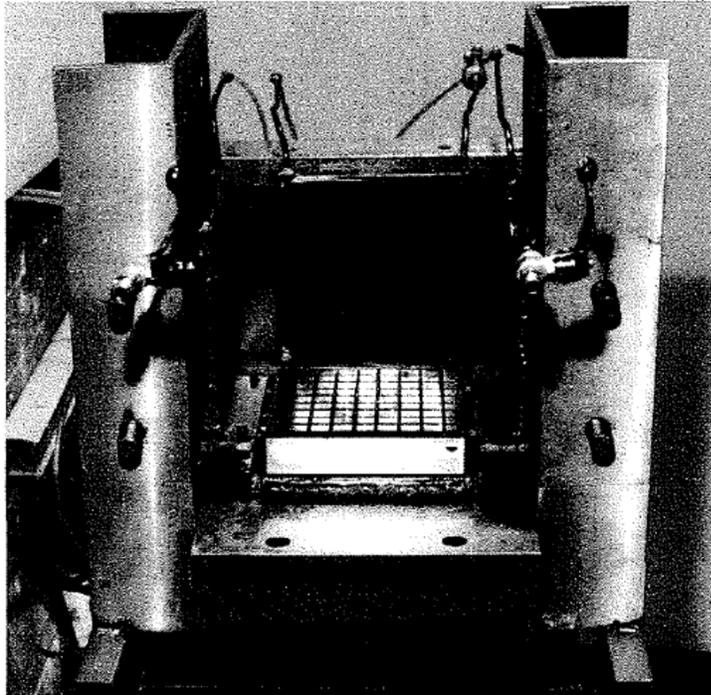
- Las pruebas en materiales modelados.

Verdaderas condiciones de esfuerzo triaxiales, están siendo investigados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de 'ISMES, Bergamo, mediante el uso de probetas cúbicas de 180 mm de lado. Las pruebas de fracturación hidráulica se realizan en un material remodelado (es decir, obtenido por medio de mezclas de tiza de celito y el agua), dando una resistencia a la compresión uniaxial  $\sigma_c = 1,32 \text{ MPa}$ . Este material se muestra un comportamiento elástico lineal hasta la rotura frágil. Un fluido muy viscoso se utiliza como fluido de fracturación hidráulica, dado que el material remodelado es permeable.

Esto es lo contrario de lo que se asume para ensayos in situ (roca impermeable con agua como fluido de hidro-fractura), sin embargo los resultados son comparables satisfactoriamente.

Un marco metálico rígido y seis gatos planos permiten la aplicación de un estado triaxial de la tensión en el espécimen cúbico que se están probando (Figura 5-89). Una bomba interfaz de gas-aceite, se utiliza para mantener los esfuerzos constantes durante la prueba. Transductores de presión, son aplicados para la medición y control. Una placa suave, provista de elementos de neopreno prismáticas y papeles de teflón sin fricción, se inserta entre los flat-jacks y la muestra, dando así una distribución de la presión uniforme

en cada superficie plana. Después de cargar la muestra, el fluido de fracturación hidráulica se inyecta en un agujero vertical en la muestra. La presión de entrada se mide y es controlada por medio de un ordenador, que está programado para detener inmediatamente la fase de bombeo, cuando se alcanza la presión de disgregación. Esta disposición en las pruebas es extremadamente importante, con el fin de evitar la propagación de la fractura.



**Figura 5-89. Fotografía del dispositivo triaxial usado para el ensayo de muestras remoldeadas.**

**Fuente: Barla, [28].**

Una serie de pruebas fue realizado a la comprobación de los siguientes factores y condiciones de ensayo que influye, en diferentes estados de esfuerzo (Figura 5-90):

- La viscosidad del fluido, se ha investigado en una gama de grandes tamaños (27 a 10.000 centipoise a 20°C), para simular diferentes condiciones de permeabilidad (Figura 5-91 y Figura 5-92); resultados satisfactorios se han obtenido mediante el uso de glicerina.
- Diferentes tipos de presurización ( $2.5 \times 10^{-3}/1$  MPa/s), han sido analizados con respecto a la presión de ruptura (Figura 5-93).
- Diámetros y áreas de distribución a presión en la perforación (Figura 5-94 y Figura 5-95 respectivamente) fueron correlacionados con los tamaños de muestra: los resultados son muy buenos, de acuerdo con las experiencias realizadas por otros autores.

- Se dedicó particular atención a la resistencia a la tracción de la roca, obtenido como la diferencia entre los valores de presión de pico en el primero el segundo, para diferentes condiciones de esfuerzo, o por la prueba de fracturación hidráulica sin aplican presiones de confinamiento ( $\sigma_t = 1,48 \pm 0,13$  MPa contra  $1,45 \pm 0,15$  MPa respectivamente).

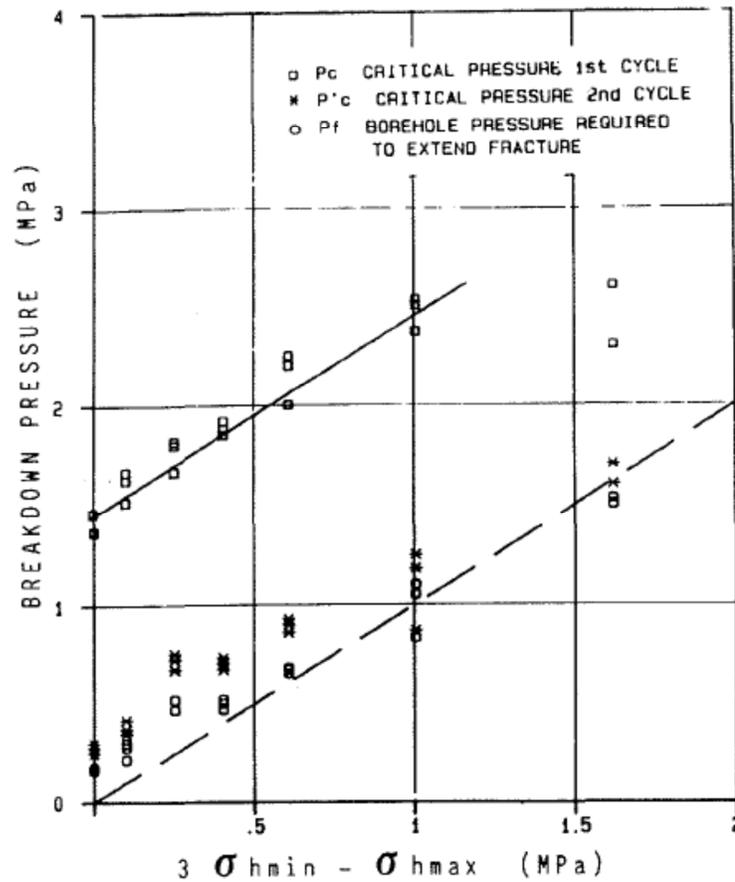


Figura 5-90. Relación entre la presión de rotura y el esfuerzo horizontal.  
Fuente: Barla, [28].

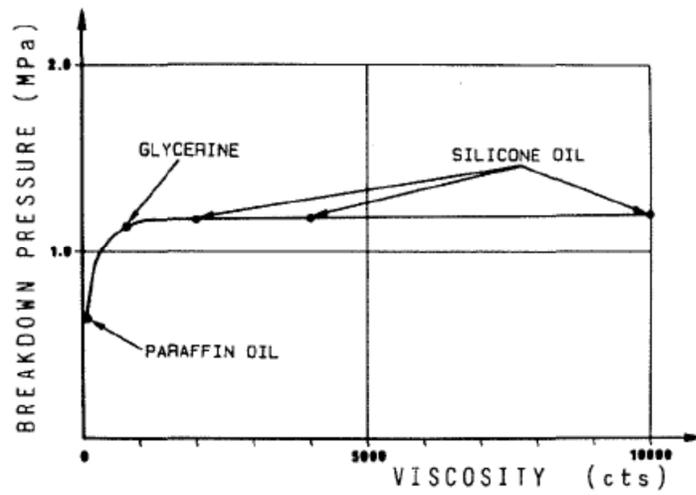


Figura 5-91. Influencia de la viscosidad del fluido.  
Fuente: Barla, [28].

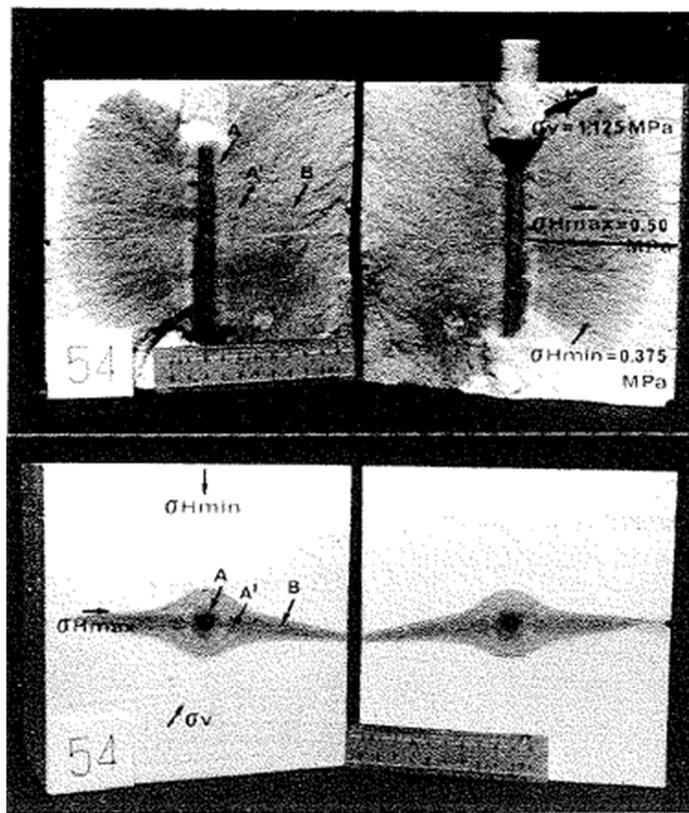


Figura 5-92. Secciones horizontales y verticales de la muestra ensayada.  
Fuente: Barla, [28].

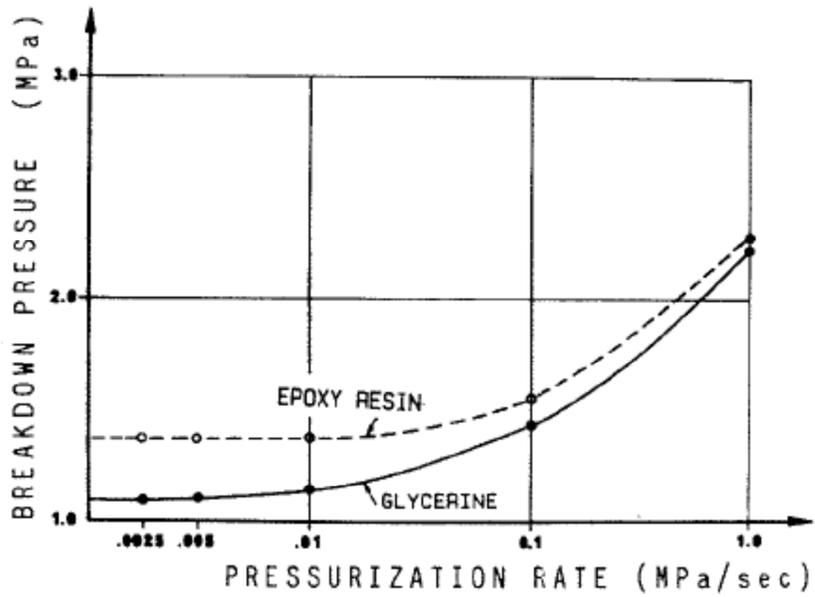


Figura 5-93. Influencia de la velocidad de la presurización en una presión de la rotura.  
Fuente: Barla, [28].

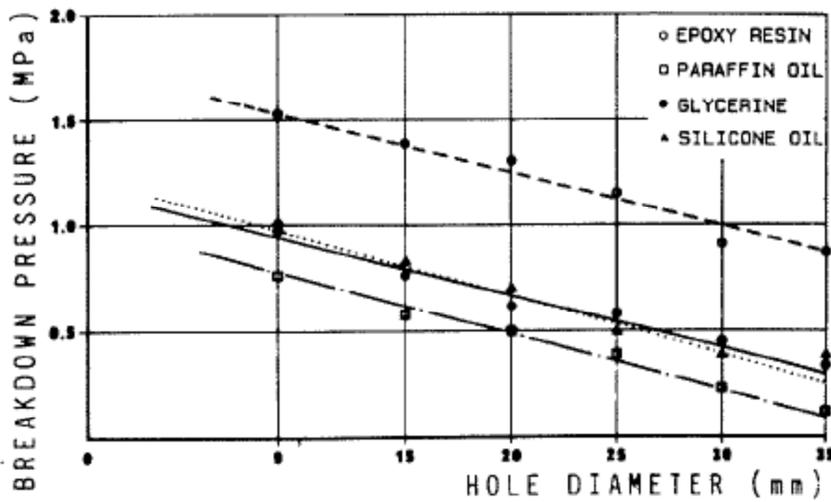


Figura 5-94. Influencia del diámetro de la perforación en la presión de rotura con diferentes fluidos de fractura.  
Fuente: Barla, [28].

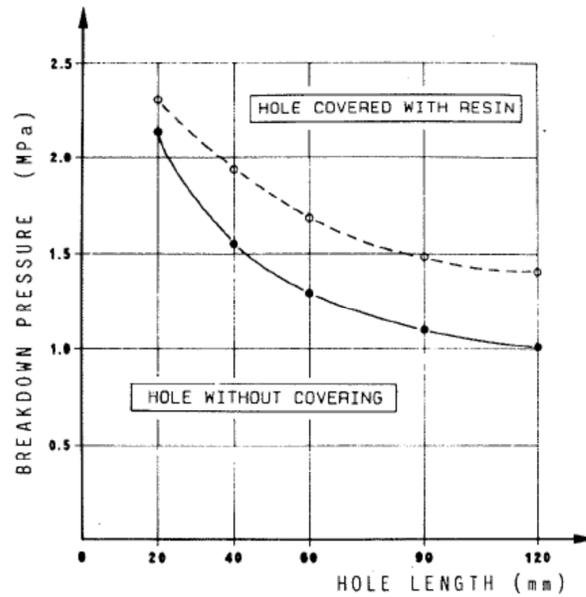


Figura 5-95. Influencia de la presurización de la longitud de la perforación en la presión de rotura.

Fuente: Barla, [28].

- Ensayos in-situ

Una serie de pruebas fueron realizadas con la misma técnica en la ingeniería de rocas, sobre todo con referencia al diseño de lechada en la cortina de una presa (Figura 5-96) y el pretensado de la roca alrededor de túneles. La experiencia obtenida de esta manera es de ayuda para la creación efectiva de los equipos necesarios para las mediciones de esfuerzos in situ.

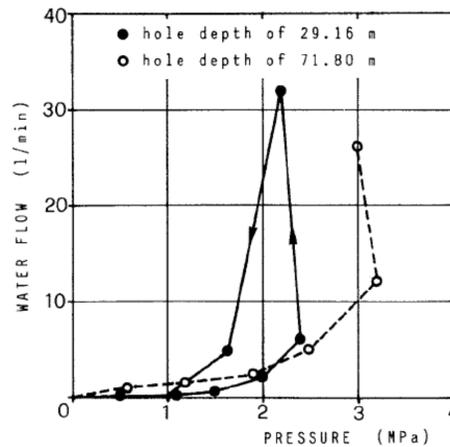


Figura 5-96. Caudal del agua versus la presión obtenida en la presa de Ridracoli.

Fuente: Barla, [28].

Se analizaron las pruebas realizadas por fracturamiento hidráulico en Consonda (Milan) en el sitio de presa de Ridracoli, en agujeros de 72 m de profundidad. Como se muestra en la Figura 5-96, estas pruebas fueron dirigidas hacia la medición de la absorción máxima de flujo de agua a través de las fracturas existentes en la masa de roca, bajo diferentes niveles de presión. El propósito fue evaluar correctamente la influencia del acuífero, la presión del fluido de fracturación y la inyección de compactación en las condiciones de campo dadas.

### **5.9.5 Conclusiones**

Con el objetivo principal de aumentar el conocimiento actual de la situación in situ del esfuerzo en Italia, en relación con la ingeniería de rocas (es decir, grandes cavidades subterráneas y túneles), se está creando un equipo de prueba para el fracturamiento hidráulico in-situ. Las aplicaciones posibles están previstas en un futuro próximo, en un sitio donde se llevaron a cabo las mediciones anteriores del estado in situ del esfuerzo por overcoring.

Al mismo tiempo, el trabajo de laboratorio experimental en la fracturación hidráulica se continuó, con más énfasis en la influencia de factores tales como juntas preexistentes, discontinuidades y la anisotropía. La reacción de la fracturación hidráulica en el contorno y alrededores de la perforación, se debe investigar en investigaciones futuras, con el fin de ayudar a la interpretación de las pruebas llevadas a cabo en los complejos rocosos italianos.

## 6. RECOMENDACIONES PARA SIMULAR EL LABORATORIO DE FRACTURAMIENTO HIDRAULICO

En el presente capítulo se realiza una serie de recomendaciones para el montaje de un ensayo de laboratorio para recrear el fracturamiento hidráulico en un macizo rocoso.

Como primera medida se dará una recomendación para el montaje en laboratorio y para que el ensayo de fracturamiento hidráulico sea el más óptimo. De acuerdo con el montaje recomendado se adentrará en los equipos necesarios para que el montaje se pueda realizar. Luego se realizará un acercamiento a las correlaciones de escala necesarias para que el ensayo en el laboratorio sea lo más representativo a un ensayo de campo. Y finalmente se mostrarán otras opciones de montaje del laboratorio.

### 6.1 SELECCIÓN DE MONTAJE

Según lo recopilado por varios autores, que han realizado el ensayo de fracturamiento hidráulico en el laboratorio, el utilizar un montaje para un muestreo cúbico ( $1 \text{ m}^3$ ), resulta óptimo para el éxito del mismo. Esto debido a que con una muestra así de grande, se puede controlar mejor la presión de inyección y manipular los esfuerzos principales para que puedan ser de diferente magnitud, esto elimina algunas variables que hacen que el experimento pueda resultar alterado.

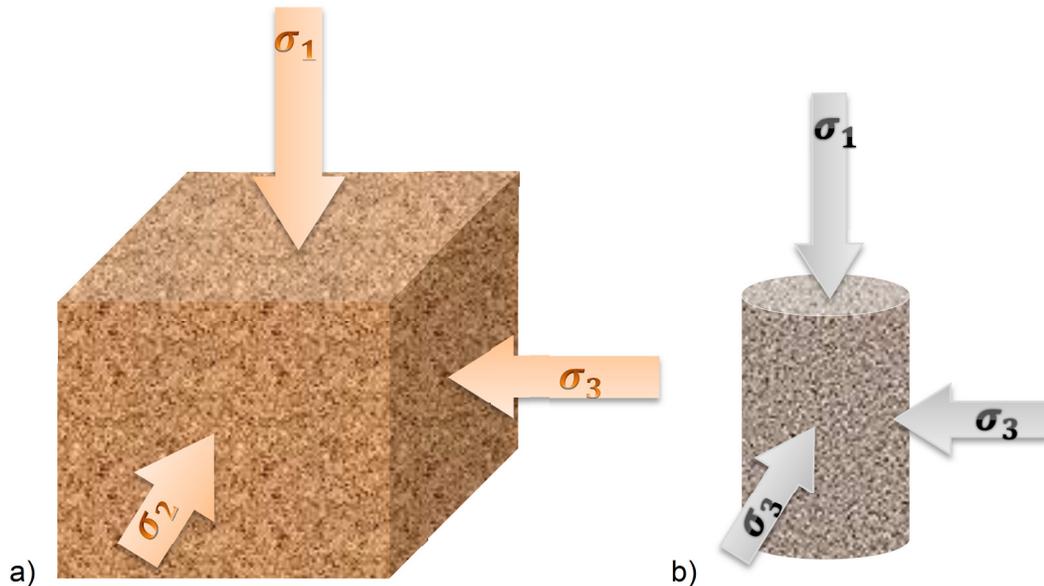
Cuando se trabaja con una muestra grande, así como se pueden controlar muchas variables, también se pueden alterar algunas de ellas para poder tener mayor acercamiento a lo que realmente sucede en la fractura en campo. Como por ejemplo, el poder variar la inclinación de la perforación o el revisar como las diaclasas afectan el desarrollo de la fractura.

El utilizar una muestra cúbica implica la utilización de un aparato triaxial verdadero o también llamado aparato de esfuerzos poliaxiales. El "verdadero", quiere decir, que es un aparato que puede simular los tres esfuerzos principales por separado con magnitudes distintas, tal como se encuentra in-situ la muestra. Cuando se trabaja con muestras cilíndricas, se utiliza un aparato triaxial común en roca, el cual sólo maneja dos esfuerzos, el de confinamiento ( $\sigma_3 = \sigma_2$ ) y el esfuerzo desviador ( $\sigma_1$ ). Esto se puede ver mejor en la Figura 6-1.

La desventaja que posee realizar un ensayo con una muestra tan grande es, primero, que es muy complicado conseguir una muestra de ese tamaño. Segundo, que el transporte de la muestra se torna complicado lo cual lo hace inoficioso. Y tercero el

aparato triaxial para el montaje de una muestra de este tamaño implica poseer un gran espacio en el laboratorio y hay circunstancias donde eso no es posible.

En cambio cuando se trabaja con aparato triaxial normal de roca en una muestra cilíndrica, la muestra puede tener una altura máxima de 20 cm, lo cual la hace más asequible de conseguir. También el aparato triaxial es más pequeño en comparación con el aparato triaxial verdadero.



**Figura 6-1. Esquema representativo de la distribución de esfuerzos en un ensayo triaxial verdadero cúbico(a) y un triaxial normal cilíndrico (b).**

Existen dos tipos de montajes del aparato de esfuerzos poliaxiales, el primero comprende un gran bloque de cemento cilíndrico con cilindros de acero alrededor, para darle mayor resistencia, con un orificio cúbico central (Véase Figura 6-2 y Figura 6-3). Y también existe otro tipo de montaje del aparato de esfuerzos poliaxial, el cual consiste en un aro de acero de alta resistencia en el cual adentro, se encuentra un bloque de concreto con un orificio rectangular (Véase Figura 6-4 y Figura 6-5). En ambos casos de montajes, se le colocan tres pares placas de presión o “flatjacks”, en las tres caras de la muestra cúbica. Los tres pares de flatjacks se presurizan para que una cara reaccione contra el frente de la roca y la otra reaccione contra la pared de la cámara interna y así simular los tres esfuerzos principales in-situ.

Las dimensiones de los montajes depende del espacio, la disponibilidad económica que se disponga, la dimensión del flatjack y de las muestras que se quieran conseguir. Se han encontrado montajes con muestras desde 30x30x30 cm<sup>3</sup>, hasta de 76x76x91 cm<sup>3</sup>.

Cualquiera de los dos montajes es óptimo para realizar el ensayo de fracturamiento hidráulico.

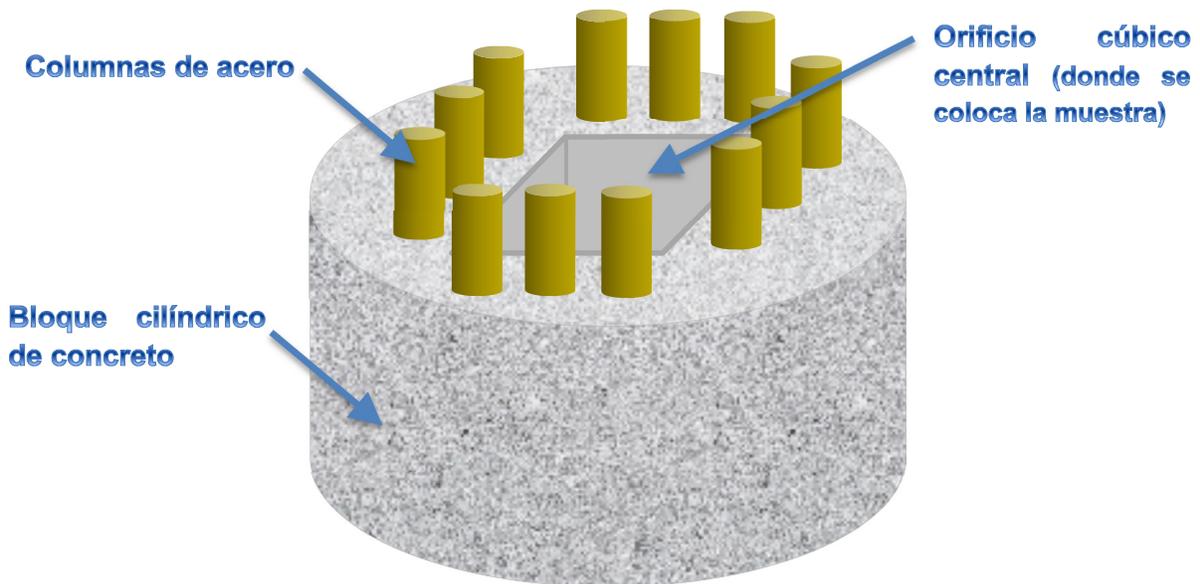


Figura 6-2. Esquema del montaje del aparato de esfuerzos poliaxiales, tipo bloque de concreto.

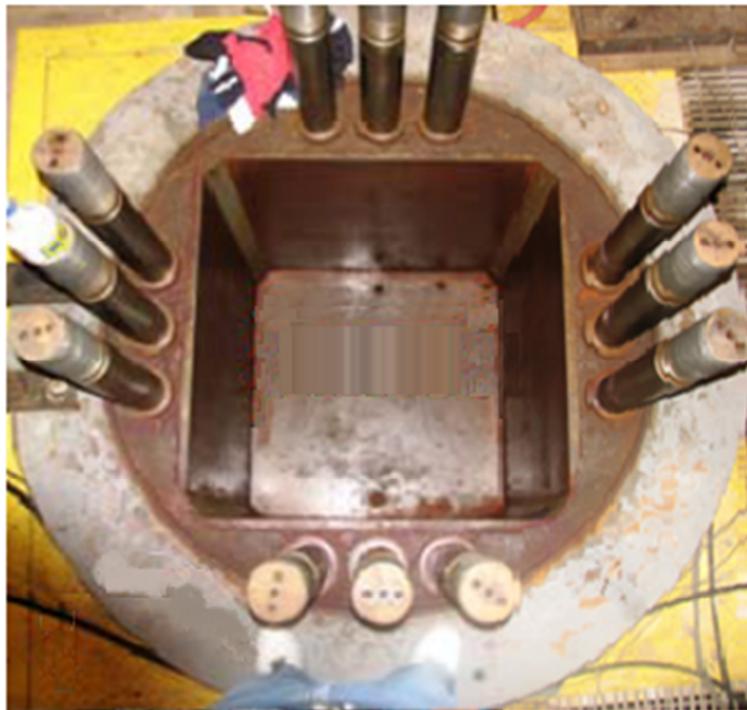


Figura 6-3. Fotografía de un montaje del aparato de esfuerzos poliaxiales, tipo bloque de concreto.

Fuente: CASAS [18].

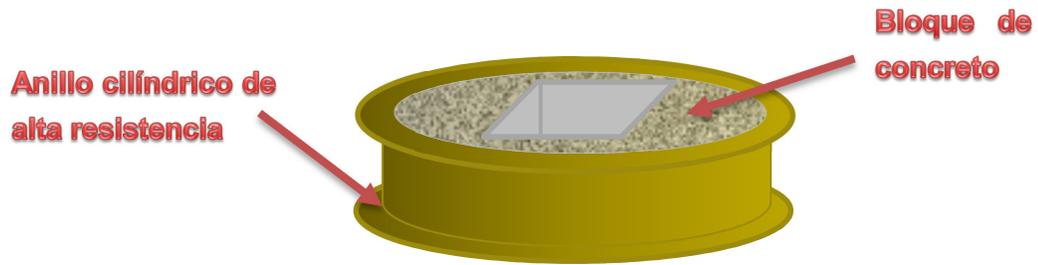


Figura 6-4. Esquema del montaje del aparato de esfuerzos poliaxiales, tipo bloque de concreto envuelto en un anillo de acero de alta resistencia.



Figura 6-5. Fotografía del aparato de esfuerzos poliaxiales, tipo bloque de concreto envuelto en un anillo de acero de alta resistencia.

Fuente: Frash [24].

## 6.2 EQUIPOS

Para poder recrear el ensayo de fracturamiento hidráulico, es necesario tener equipos que generen la inyección del fluido, la presión de confinamiento y equipos para el monitoreo del ensayo. A continuación se muestran los equipos necesarios para recrear el ensayo de fracturamiento hidráulico en el laboratorio.

### 6.2.1 Equipo de inyección

Este tipo de montaje requiere de la inyección de un fluido para:

- La presión de confinamiento, recreada por los flatjacks.
- La inyección del fluido en la muestra, recreando el ensayo de fracturamiento hidráulico.

- Flatjacks

Los flatjacks son unas capsulas de acero delgado de forma circular plana (Véase Figura 6-6), con una sección transversal similar a una pesa (Véase Figura 6-7). Esta capsula de acero están equipados con dos tubos, uno de entrada y uno de salida. En la tubería de salida se puede colocar un medidor de presión. Cuando se le inyecta líquido por el tubo de entrada este se infla (Véase Figura 6-8), de tal motivo que la presión inyectada sea transmitida a la muestra como un esfuerzo al ejercer presión entre la pared y la muestra.



Figura 6-6. Esquema de un flatjack.

Fuente: [http://www.fagioli.it/Pages/Flat\\_Jacks.aspx?lang=en-US](http://www.fagioli.it/Pages/Flat_Jacks.aspx?lang=en-US).



Figura 6-7. Fotografía transversal de un flatjack antes de inflarse.

Fuente: [http://www.fagioli.it/Pages/Flat\\_Jacks.aspx?lang=en-US](http://www.fagioli.it/Pages/Flat_Jacks.aspx?lang=en-US).

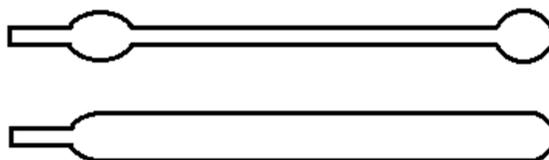
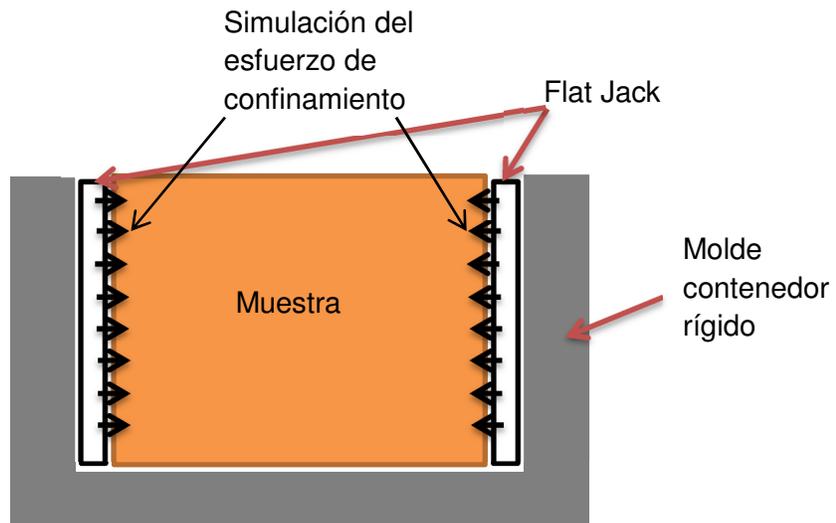


Figura 6-8. Esquema ilustrativo de un corte transversal de un flatjack, antes de la inyección del fluido (arriba) y después de la inyección (abajo).



**Figura 6-9. Esquema ilustrativo de un corte transversal de cómo actúan los flatjacks sobre la muestra.**

- Sistema de inyección

El sistema de inyección para suministrar en los flatjacks e interior de la muestra está compuesto por un sistema de bombeo, unas válvulas hidráulicas y un programa para el control de las bombas.

El sistema de bombeo puede generarse con bombas tipo Teledyne 65MD (usadas en Frash [24]) o una bomba intensificadora servo MTS 816 (usada por Zhou [26]). Cualquiera sistema de bombeo que genere la presión necesaria para el ensayo sirve para realizar la prueba de fracturamiento hidráulico. La bomba Teledyne de 65D tiene un costo en el mercado a la fecha de preparación de esta tesis de grado del orden de \$56'816.800,00 pesos Colombianos.

Una bomba intensificadora que genera 70 MPa de presión, 500 cc de volumen (HPVC-70C CELL Pressure/Volume Servo Controlled Intensifier), tiene un precio comercial de USD\$26.310,00 (Véase Anexo 1).

El sistema de inyección está unido con la muestra por medio de conexiones hidráulicas, ya sea por tubos metálicos rígidos o reticulados, o por mangueras neumáticas. Se recomienda utilizar tubería metálica reticulada para el sistema hidráulico, ya que este es más versátil para su uso, aunque este genera más pérdidas de presión que al utilizar una tubería metálica debido a que tiene más cambios de dirección aleatorios que pueden generar pérdidas hidráulicas.

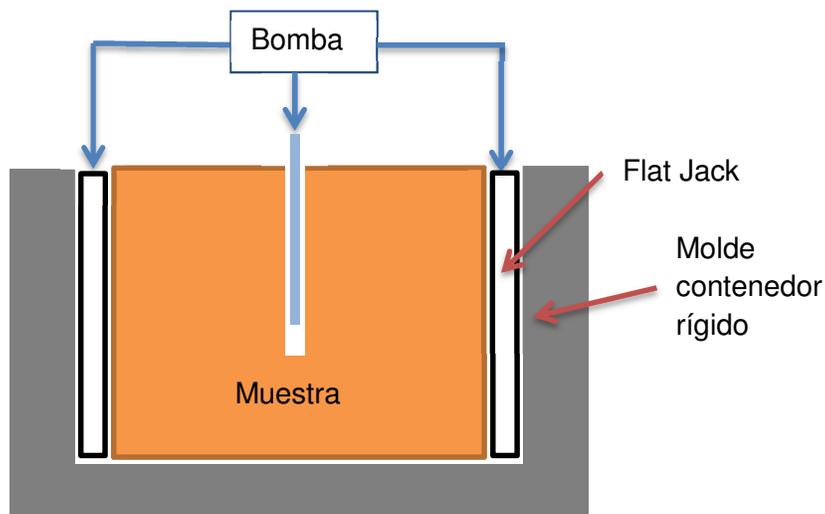


Figura 6-10. Esquema ilustrativo de un corte transversal mostrando la función de la bomba de inyección.

## 6.2.2 Equipo de monitoreo

Para monitorear las presiones, las deformaciones, desplazamientos y la temperatura, es necesario colocar sensores en diferentes lugares de la muestra y el equipo. Para toda esta instrumentación es necesario un sistema de adquisición de datos.

- Transductor de presión

Para monitorear la presión se utiliza un transductor de presión, que tiene como función convertir la presión en una señal eléctrica análoga. Los transductores eléctricos de presión están disponibles en tres tipos de salida eléctrica; en milivoltios, en voltios y 4-20 mA.

El transductor de presión con salida en milivoltios es un aparato que no utiliza mucha electrónica en el acondicionamiento de la señal integrada, por tal motivo es más resistente a las temperaturas altas. Debido a las transmisiones eléctricas bajas, no es conveniente utilizarlo cercano a un entorno con mucho ruido eléctrico, o la señal puede verse afectada.

El transductor de presión con salida en voltios proporciona una salida más potente en comparación con la de milivoltios. Esta genera una salida de 0-5V o 0-10Vcc. Estos tipos de transductores al tener mayor potencia, no son tan susceptibles al ruido eléctrico.

Y finalmente el transductor de presión con salida 4-20 mA, son también conocidos como transmisores de presión. Estos al tener una potencia alta, no son afectados por el ruido

eléctrico ni por la resistencia en los cables de señal. Los transductores son más utilizados en largas distancias

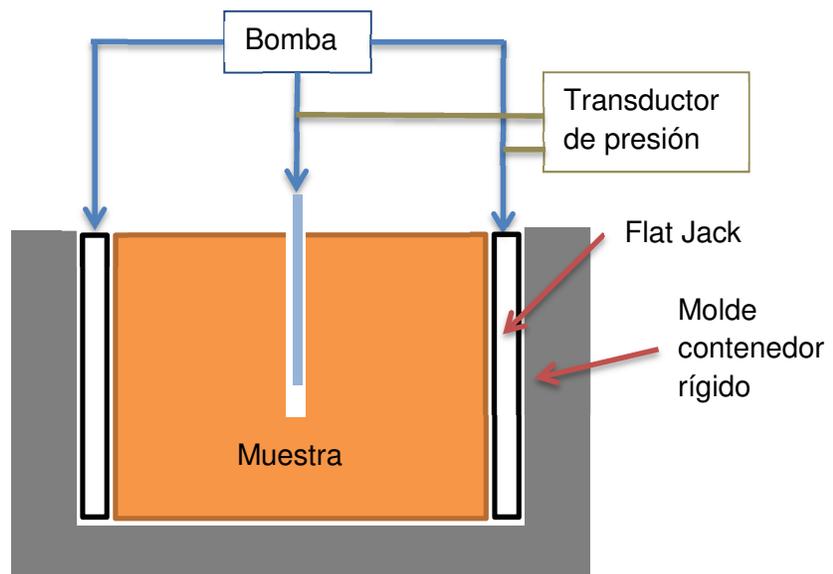
Frash (2013), utiliza el transductor de presión eléctrica Omega® PX309 con un precio comercial de mínimo USD\$175.00 (Véase Figura 6-11 y Anexo 1).



**Figura 6-11. Fotografía del transductor de presión Omega® PX309.**

**Fuente:** <http://www.omega.com/pptst/PX309.html>.

Estos transductores son usados en el ensayo para medir la presión de confinamiento y la presión de inyección en la muestra.



**Figura 6-12. Esquema ilustrativo de un corte transversal mostrando la función de la bomba de inyección.**

- Transductor de desplazamiento y deformación

Los transductores de desplazamiento lineal miden el movimiento de un cuerpo a lo largo de una trayectoria rectilínea. Frash (2013), utiliza un transductor de deformación lineal tipo Omega® LD621 – 30, para uso auxiliar. Tiene un costo de USD\$469,00 (Véase Figura 6-13).

El transductor de deformación está diseñado para medir las deformaciones estáticas y dinámicas de la muestra. Estos transductores se anclan al área de una superficie sólida y por medio de la fricción mide la deformación (Véase Figura 6-14).



**Figura 6-13. Fotografía de un transductor de desplazamiento.**

Fuente: <http://es.omega.com/pptst/ld620.html>.



**Figura 6-14. Fotografía de un transductor de deformación.**

Fuente: <http://www.hbm.com/es/menu/productos/transductores-y-sensores/deformacion/slb700a/#c55315>.

- Adquisición de datos

Los sistemas de medición de presión, deformación y temperatura, necesitan un sistema que adquiera los datos generados y los convierta en datos para el computador. Para este motivo se utiliza un aparato de adquisición de datos (Véase Figura 6-15). Estos aparatos tienen un costo de mínimo USD\$189,00.



Figura 6-15. Fotografía de un aparato de adquisición de datos.

Fuente: <http://www.hbm.com/es/menu/productos/medicion-electronica-software/sistema-universal-de-adquisicion-de-datos/quantumx-mx840a/#c38105>.

Todos los equipos de monitoreo, se conectan a este aparato de adquisición de datos para así conectarse a un computador, el cual con un determinado software muestra los datos de cada medición.

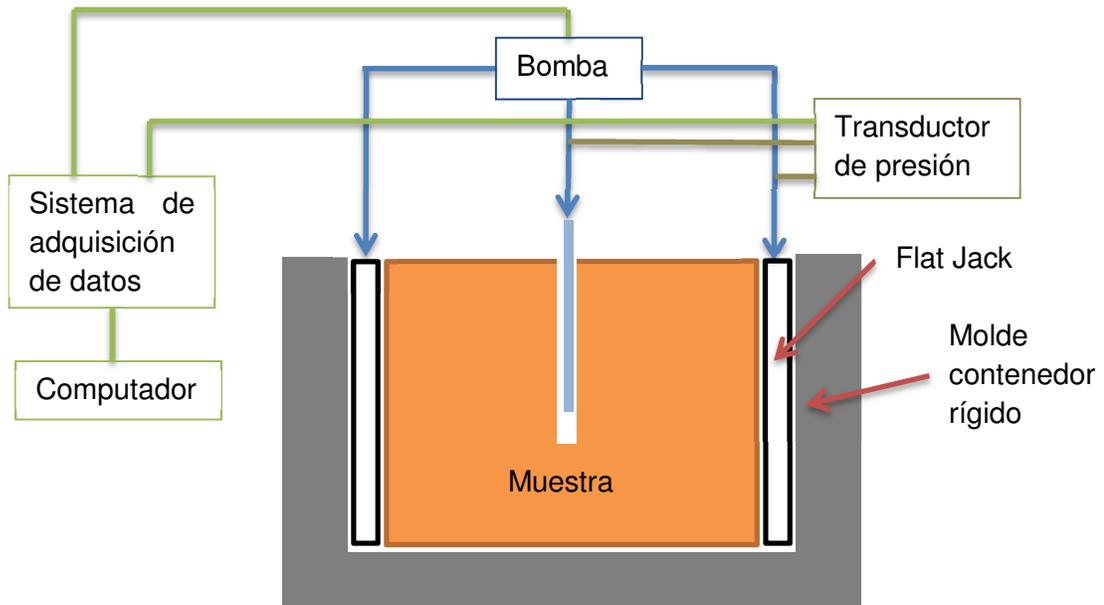


Figura 6-16. Esquema ilustrativo de un corte transversal mostrando la función de la bomba de inyección.

### 6.3 CORRELACIONES DE ESCALA

El ensayo de fracturamiento hidráulico en campo, se realiza en una perforación de aproximadamente 3,5 pulgadas, por lo que es muy difícil recrear un ensayo de fracturamiento hidráulico en el laboratorio con una muestra en la que se le pueda hacer una perforación de dicho tamaño. Por tal motivo, se necesita una serie de correlaciones de escala para que un ensayo de laboratorio de fracturamiento hidráulico realizado con

una perforación de menor tamaño, pueda generar valores representativos que se puedan comparar con una perforación real. A continuación se muestran las correlaciones y ecuaciones que hacen la similitud entre el ensayo en campo con el de laboratorio.

Según los modelos teóricos provistos por Casas, 2006 [18], que describen la propagación de la fractura radial en un material elástico lineal, con pérdidas de goteo despreciables y teniendo en cuenta los efectos de la rigidez, se tiene que:

- La propagación de la fractura hidráulica:

$$6-1 \quad r_f/r_w = \gamma_r (t/\tau^*)^{4/9}$$

- Tiempo característico:

$$6-2 \quad \tau^* = \left(\frac{r_w^3}{i}\right)^{3/4} \left(\frac{\bar{\mu}}{E}\right)^{1/4}$$

- Presión adimensional:

$$6-3 \quad \frac{p_{net}}{p^*} = \gamma_p (t/\tau^*)^{-1/3}$$

- Presión característica:

$$6-4 \quad p^* = \left[\left(\frac{E}{r_w}\right)^3 \bar{\mu} i\right]^{1/4}$$

- Ancho adimensional:

$$6-5 \quad \frac{b_w}{b^*} = \gamma_b (t/\tau^*)^{1/9}$$

- Ancho característico:

$$6-6 \quad b^* = \left(\frac{\bar{\mu} i r_w}{E}\right)^{1/4}$$

Dónde:

$r_f$  = Radio de la fractura en pulgadas

$\gamma_r, \gamma_p, \gamma_b$  = Coeficientes funcionales, donde  $\gamma_r = 0,83$ ,  $\gamma_p$  y  $\gamma_b$  son aproximadamente 1,00.

$\tau^*$  = Tiempo característico, de un modelo de propagación de una fractura en escala de campo, en segundos.

$p^*$  = La presión característica, de un modelo de propagación de una fractura en escala de campo, en psi.

$b^*$  = Ancho característico, de un modelo de propagación de una fractura en escala de campo, en pulgadas.

$b_w$  = Ancho de la perforación en el campo, en pulgadas.

Estas formas adimensionales son acordes para la comparación de ensayos de fracturamiento hidráulico similares con diferentes variables de operación.

Antes de calcular los factores de escala, es necesario determinar las condiciones que la presión en la malla ( $p_{net}$ ) para fracturas que se propagan en el bloque ensayado. Dado que la extensión de la grieta esta descrito por la teoría lineal elástica, las condiciones de propagación está ligado al factor de intensidad de los esfuerzos ( $K_I$ ) y la presión del fluido en la fractura. Hay una expresión que integra la intensidad de los esfuerzos para una grieta radial, que provee un criterio de propagación a una presión constante en la parte humedecida de la fisura y con una presión igual a cero en la zona que no ha penetrado el fluido.

$$6-7 \quad K_I = K_{IC} = \frac{2}{\pi} [p_{net} \sqrt{\pi r_f} - (p_{net} + \sigma_{h \min}) \sqrt{2\pi \omega}]$$

Dónde:

$\omega$  = Tamaño efectivo de la zona de retraso del fluido, en pulgadas.

$K_I$  = Factor de la intensidad de los esfuerzos, en psi.in<sup>1/2</sup>.

Por lo tanto, el grado en que las condiciones de campo como de propagación de la fractura hidráulica se pueden alcanzar en una prueba de laboratorio en escala, dependen de cual grande sea el término de la presión de fluido en la ecuación 6-7, que el valor de la dureza de la roca, es decir:

$$6-8 \quad p_{net} \sqrt{\pi r_f} > K_{IC} \text{ (valor para la muestra a ensayar)}$$

Y el valor de la presión de la malla, se obtiene al unir las ecuaciones 6-3 y 6-4.

$$6-9 \quad p_{net} = \gamma_p \left( \frac{t}{\tau^*} \right)^{-1/3} \left[ \left( \frac{E}{r_w} \right)^3 \bar{\mu} l \right]^{1/4}$$

Siendo que la viscosidad del fluido de fracturación es limitado a un rango pequeño, el poder obtener las condiciones para el ensayo ideal, requieren de una serie de iteraciones calculando la presión de la malla para una viscosidad dada, variando los rangos de inyección. Entonces el método para obtener condiciones de laboratorio ideales, se puede entender mejor con la Figura 6-17 propuesta por Casas (2006).

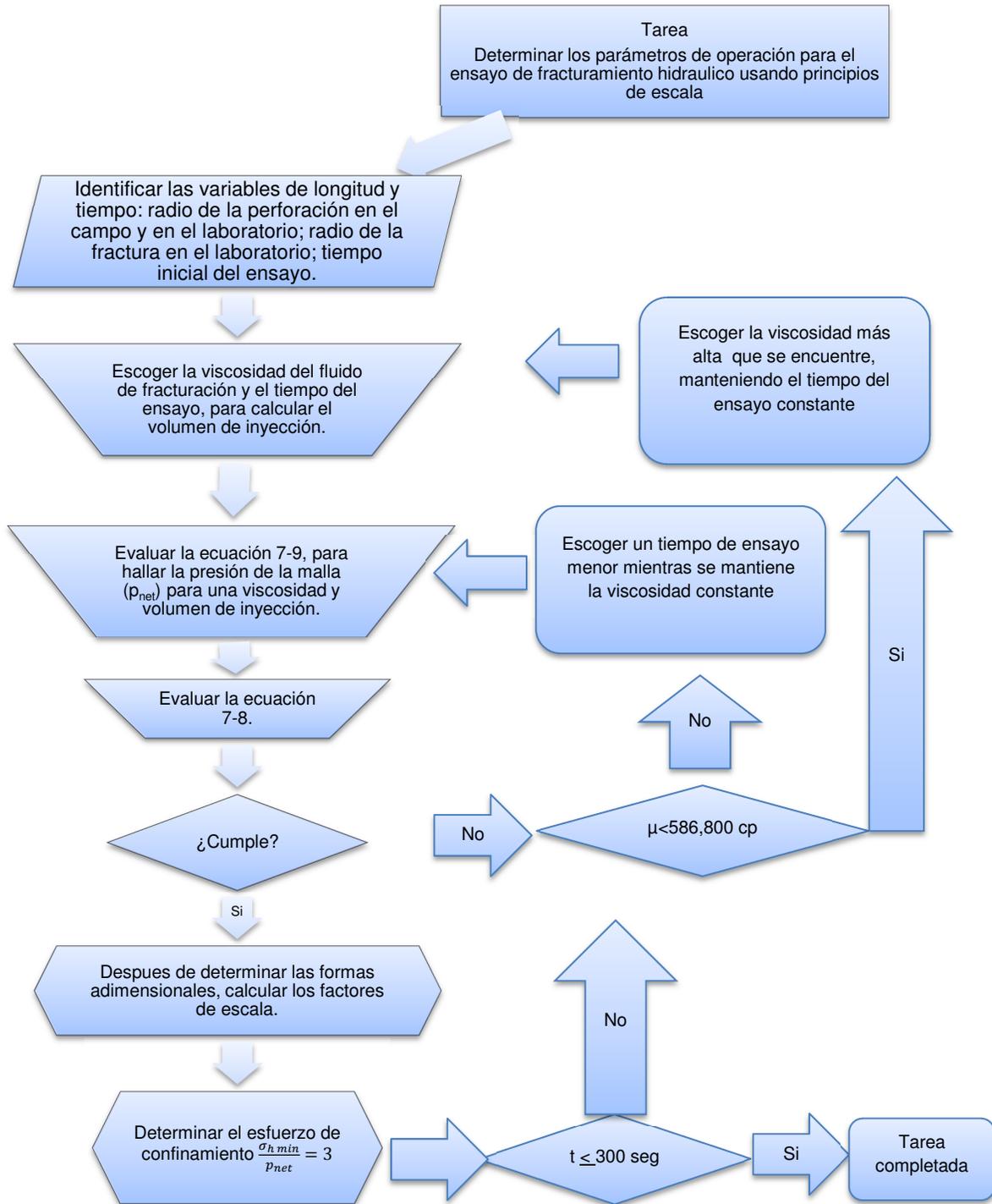


Figura 6-17. Diagrama de flujo mostrando el método utilizado para las condiciones ideales. Los cálculos son limitados por una viscosidad de 586.800 cp y un tiempo de 5 minutos.

Fuente: CASAS [18].

Ya al haber calculado la viscosidad y el volumen de inyección, se calculan las otras dimensiones para completar el modelo del crecimiento de la fractura. Este análisis de escala se puede realizar usando los productos adimensionales.

## 6.4 OTRAS ALTERNATIVAS DE MONTAJES

Si el ensayo de fracturamiento hidráulico en una máquina triaxial real, no es conveniente por razones de espacio o precio. Existen equipos para realizar solo el ensayo en muestra cilíndrica de fracturamiento hidráulico en el mercado. En el Anexo 1, se muestra una cotización de un equipo de fracturamiento hidráulico para una muestra cilíndrica de máximo 10 cm de diámetro y 20 cm de largo. Con una capacidad de confinamiento de 70 MPa y una carga axial de 1.000 kN.



**Figura 6-18. Fotografía del aparato de fracturamiento hidráulico HFT-70.  
Fuente: Fotografía proporcionada por GCTS.**

El precio de este aparato de fracturamiento hidráulico a la fecha de este trabajo de grado, es de USD\$205.226,00, con todos los accesorios, listo para ser usado.



**Figura 6-19. Fotografía del aparato triaxial que también funciona para el ensayo de fracturamiento hidráulico RTX-1000.**

**Fuente: Fotografía proporcionada por GCTS.**

También existe otro tipo de aparatos que en principio funcionan para realizar un ensayo triaxial en roca, pero con una serie de accesorios, se puede realizar también el ensayo de fracturamiento hidráulico. Este aparato triaxial en roca, que acepta muestras de 65 mm de diámetro máximo y una longitud de 130 mm, con el accesorio para realizar el ensayo de fracturamiento hidráulico tiene un costo a la fecha de este trabajo de grado de USD\$223.303,00.

## 7. CONCLUSIONES

El ensayo de fracturamiento hidráulico consiste en poder hallar el esfuerzo principal mínimo in-situ del macizo rocoso. Este estado del arte del fracturamiento hidráulico, recoge los aspectos conceptuales que rodean el ensayo. Estos aspectos son:

Teniendo estos aspectos conceptuales que rodean el ensayo de fracturamiento hidráulico claros, se genera un completo marco teórico del ensayo. El cual aborda su historia, la mecánica de la fractura hidráulica, los procedimientos, las normas, los aspectos geotécnicos que se involucran en el ensayo, la descripción de los equipos necesarios, la obtención de los parámetros, la interpretación de los resultados, sus ventajas y desventajas, la comparación con otros métodos y la presentación de los resultados. Con este marco teórico, se conceptualiza todo lo referente al ensayo.

La orientación de las fracturas no necesariamente es siempre en sentido horizontal. Ya que mediante experimentos se comprobó que la fractura crece dependiendo de los esfuerzos encontrados en el sitio. Si la fractura es horizontal, esto implica que el esfuerzo mayor es horizontal y el menor es vertical. Si la fractura es vertical, los esfuerzos son al contrario, el mayor es vertical y el menor es horizontal. Y si el sondeo no está alineado con algún esfuerzo principal, la grieta se va desplegando de tal manera que cuando esté completamente desarrollada, esta llegará a estar normal al esfuerzo principal menor in-situ.

Cuando la perforación está paralela a un esfuerzo principal, se puede interpretar el ensayo de fracturamiento clásico. Si al realizar el ensayo, la fractura se desarrolla escalonadamente, el ensayo está mal orientado y por consiguiente el ensayo clásico no se podría validar.

En el mundo no se han realizado muchas recreaciones en el laboratorio del ensayo de fracturamiento hidráulico. Al recopilar la información de estos ensayos en el laboratorio, se genera un concepto más claro de las dificultades y las conclusiones establecidas en todas las recreaciones. También se estableció, que todavía quedan muchas dudas acerca de cómo todas las variables que están involucradas en el ensayo afectan los resultados del mismo. Como por ejemplo las discontinuidades en el macizo, o la influencia de la inclinación de la perforación en los resultados.

Al recopilar los montajes, equipos y procedimientos necesarios para poder recrear los diferentes ensayos en el laboratorio del fracturamiento hidráulico, se pudo establecer que el montaje en un marco poliaxial cúbico, es el más óptimo, pero el más complicado de crear. En cambio, el montaje en un aparato triaxial cilíndrico tradicional, es el más sencillo de armar, ya que en nuestro medio existen más aparatos triaxiales en roca que aparatos poliaxiales.

Se realiza una recopilación de todos los aspectos, ya sean de los equipos y de la relación de la escala, para poder tener las bases para realizar un ensayo de fracturamiento hidráulico en el laboratorio. También se dan precios estimados en el mercado de los equipos, así como una cotización de un montaje triaxial cilíndrico para la realización del ensayo.

Se encontró que los aspectos que interfieren en la interpretación de los resultados del ensayo de fracturamiento hidráulico, son:

- La permeabilidad y los macizos rocosos fracturados. Entre las fracturas pueden existir pequeños bloques que o material de llenado entre las fisuras, que se mueven con el flujo de inyección y pueden producir que la fractura se mantenga abierta, lo que hace que la presión caiga abruptamente.
- Los macizos rocosos impermeables y poco fracturados. Se necesita un equipo con turbinas de flujo o medidores de flujo ultrasónicos, para que se pueda medir el caudal y presión, con una buena precisión y efectividad. Para que los resultados no sean afectados.
- El transporte hidráulico que hay entre las rocas. Se genera un flujo turbulento cerca y dentro de la boca de la perforación, un flujo laminar a los alrededores de la fractura y a una distancia suficiente de la fractura, el flujo es pre-laminar o nulo.
- La influencia de la inelasticidad. En un ensayo de fracturamiento hidráulico, la masa de roca de la fractura se comporta elásticamente, mientras que la región cerca a la punta, debido a una alta concentración de tensión, se comporta plásticamente. El tamaño está influenciado por el contraste entre la magnitud de las tensiones de campo lejanas, la fuerza de la roca, el módulo de Young efectivo, la viscosidad del fluido de fracturación y la velocidad de la propagación. Las puntas al estar en un comportamiento plástico, reducen el nivel de intensidad de la tensión, lo que implica una presión mayor. También las presiones altas en las puntas pueden deberse al módulo de deformación de la roca o las anisotropía en la zona o debido a las fracturas naturales.
- El retraso del fluido. Esto implica que el fluido de fracturación no llega a la punta de la fractura, esto debido a la formación de presión de poros en los materiales permeables. Cuando mayor es la tenacidad de la fractura, menor será el tamaño del desfase del fluido.
- La influencia de la dilatancia. Cuanto mayor es la dilatación, mayor es el tamaño de las zonas plásticas y más amplia serán las aberturas.
- La rugosidad en el macizo. Si la grieta tiene una superficie rugosa y es enfrentada con otra superficie rugosa pero con un desfase entre el uno y el otro, se puede provocar que la grieta no se cierre completamente y así los volúmenes de

inyección se pueden reducir significativamente. También la rugosidad puede aumentar el gradiente de presión del fluido en la fractura, cuando la amplitud de la rugosidad es del mismo orden de la magnitud del ancho promedio de la fractura.

- Efectos térmicos. El macizo rocoso se puede encoger debido a los cambios de temperatura de caliente a frío. Esto puede reducir el esfuerzo menor in-situ, a un nivel por debajo de la presión de inyección del sondeo.

Cada uno de estos aspectos hay que tenerlos en cuenta cuando se va a interpretar los resultados obtenidos en el ensayo de fracturamiento hidráulico. Ya que si hay alguna varianza en los resultados, estos pueden explicarse con los aspectos ya mencionados.

## **7.1 Aspectos sobresalientes de las recreaciones en el laboratorio**

Según los ensayos recreados en el laboratorio, se pueden recoger los siguientes aspectos:

- ✓ Hay que realizar una corrección en la tasa de inyección al realizar el ensayo, esto por medio de la relación entre la diferencia entre la medida de la tasa de inyección y la tasa efectiva de inyección. Esta diferencia se da a causa de la compresibilidad del fluido. Otra razón es que el fluido almacenado en el sistema de inyección no se mantuvo constante a causa de la deformación de la perforación y los tubos con la presión de inyección. La tasa de flujo aplicada a la bomba difirió de la tasa de flujo que realmente fue aplicada a la perforación de la muestra.
- ✓ La fractura es insensible al tamaño de la muestra, cuando la longitud de la fractura es menor que el radio medio de la muestra.
- ✓ Las fracturas residuales cortas adyacentes a la perforación, pueden permanecer abiertas, aún después de un periodo muy largo del shut-in, debido a la deformación plástica de la muestra.
- ✓ La reología del fluido tiene una fuerte influencia sobre la tendencia de la fractura, en materiales de alta permeabilidad.
- ✓ La desviación más importante del comportamiento de las fracturas elásticas es una presión más grande de inyección, anchura más grande, y la presión de cierre mucho más baja que las presiones de confinamiento.
- ✓ Cuando se tiene una roca muy porosa, la propagación de la grieta en un ensayo de fracturamiento hidráulico, es muy dependiente a la resistencia intergranular del material.

- ✓ Al graficar la parte ascendente de la curva presión-tiempo, de los resultados del ensayo de fracturamiento hidráulico, en la forma de  $dP/dt$ , en función de la presión, se pueden obtener los valores de presión pico y presión de reapertura, más precisos y realísticos.
- ✓ Los criterios clásicos del fracturamiento hidráulico de Hubbert y Willis (1997), y Haimson y Fairhurst (1997), son insuficientes para una roca arenisca, ya que no tiene en cuenta el efecto de la tasa de presurización al realizar el ensayo.
- ✓ El modelo de fracturamiento hidráulico de Detournay-Cheng, 1992 (D-C), muestra cómo la tasa de presurización de la perforación influye en la condición de la falla a tensión y no depende de si la roca es impermeable o permeable.
- ✓ La velocidad de la presurización se ve muy afectada cuando se tienen rocas muy permeables ya que es indispensable aumentar la velocidad de flujo de la inyección o incrementar la viscosidad del fluido para sobreponer las pérdidas debido a las fugas que ocurren entre los poros de la roca. El criterio de fracturamiento hidráulico de Detournay-Cheng (1992) es uno de los más adecuados, ya que incorpora implícitamente, el efecto de la velocidad de la presurización en la presión de ruptura.
- ✓ Experimentos realizados con muestras a las que se les varió la presión de confinamiento, a una velocidad constante, mostraron que el modelo de D-C (1992), requiere de la incorporación de una ley general de la tensión efectiva, para así lograr que el modelo pudiera describir correctamente la relación entre la presión de ruptura y la tensión en alta porosidad en una roca arenisca.
- ✓ Cuando se llega a su presión pico, en un ensayo de fracturamiento hidráulico, existe un valor cumbre en las emisiones acústicas medidas en el ensayo.
- ✓ La aplicación de los principios de escala en el diseño de una prueba de fracturamiento hidráulico, produce el crecimiento de la fractura similar a las condiciones de campo.
- ✓ El aumento de la viscosidad del fluido de fracturación, desacelera el crecimiento de la fractura, produciendo la propagación de fracturas similares a las de campo y con un tiempo suficiente para la recolección de datos.
- ✓ Cuando se realiza el ensayo en el laboratorio con un confinamiento alto, la propagación de la fractura plana es similar al modelo en tres dimensiones.
- ✓ El utilizar un control piezométrico de Emisión Acústica (AE), ha mostrado que durante el ensayo de fracturamiento hidráulico primario, una fractura delimitada y plana, se propaga desde el pozo del sondeo en una dirección perpendicular al esfuerzo mínimo de confinamiento horizontal.

- ✓ Un ensayo de fracturamiento hidráulico en una muestra cúbica ( $1 \text{ m}^3$ ), provee los esfuerzos de confinamiento desiguales, lo cual se aproxima a lo que se encuentra en la corteza terrestre. Mientras que en muestras cilíndricas se suponen que los esfuerzos horizontales son de igual magnitud.
- ✓ Cuando se utiliza un agente propante en el fluido de inyección para el ensayo de fracturamiento hidráulico, se aumenta la conductividad hidráulica de la fractura hidráulica primaria, que cuando no se utiliza el agente.
- ✓ El diámetro del orificio en el laboratorio al ser pequeño, tiene un efecto impredecible en el esfuerzo a la tracción al fracturamiento hidráulico de la roca, esto se debe a que el radio de la perforación del laboratorio, es a veces del mismo orden de magnitud que el tamaño de grano, amplificando indebidamente la importancia de las imperfecciones menores en la roca.
- ✓ Cuando se realiza un ensayo de fracturamiento hidráulico en el laboratorio, si la fractura alcanza la superficie exterior de la muestra, las condiciones de contorno se pierden.
- ✓ Las pruebas a pequeña escala tienen limitaciones muy claras con respecto a la iniciación y la extensión de las fracturas de la roca.
- ✓ La presión diferencial horizontal es tan importante en las mediciones del esfuerzo, que recomienda la realización de un ensayo de fracturamiento hidráulico en unas instalaciones grandes con una gran muestra cúbica con los tres esfuerzos principales diferentes.
- ✓ Al realizar el ensayo de fractura hidráulica en laboratorio, con muestras grandes y cúbicas, se pueden abordar temas como; la fractura inducida, la intersección de la fractura con discontinuidades existentes, pruebas con sondeos inclinados, la determinación del crecimiento de la fractura, la relación entre la inmersión de la fractura y la dirección de los esfuerzos principales, etc.
- ✓ La propagación de la fractura depende de una variedad de factores; de la presión del pozo o del caudal, de la viscosidad del fluido, del módulo de apertura y del confinamiento.
- ✓ Las fracturas naturales aleatorias y los esfuerzos diferenciales in-situ, dominan la geometría y el comportamiento en que se propagan.
- ✓ La fractura hidráulica tiende a ser una fractura dominante con múltiples ramas aleatorias al encontrarse con una gran diferencia en los esfuerzos horizontales. Y la fractura hidráulica tiende a ser en parte vertical y plana con ramas, cuando se presenta una baja diferencia entre los esfuerzos horizontales.

- ✓ Cuando se realiza un ensayo de fracturamiento hidráulico y se generan fluctuaciones en los valores de la presión, se ha podido establecer que la razón está muy relacionada a la presencia de muchas pequeñas fracturas naturales aleatorias. Y cuando los valores de presión son lineales, se establece que las fracturas presentes son radiales.
- ✓ Cuando se tiene un material no isotrópico y no hidrostático, las grietas que se produzcan en el ensayo pueden comenzar con diversas orientaciones iniciales y pueden cambiar drásticamente hacia la dirección del esfuerzo máximo. Esto depende también de la tensión dividida a causa del exceso de presión.
- ✓ Existe una diferencia en la propagación de la fractura, cuando esta se realiza en estratos diferentes, con módulos distintos.

Estos aspectos resuelven algunas de las dudas que existen en la realización del ensayo de fracturamiento hidráulico. Una de esas dudas, es la incertidumbre que se puede generar al realizar el ensayo en rocas porosas, pero según el autor Dong (2010), se puede realizar el ensayo en rocas muy porosas, siempre y cuando se maneje bien el fluido a utilizar y su caudal. Hay que tener en cuenta que en una roca porosa, el fracturamiento hidráulico se desarrolla inter granular mente.

Otro punto en discusión, es el de conocer qué tipo de fluido se debe utilizar para una mayor eficiencia en los resultados de los ensayos. Según Casas (2006), es necesario realizar un procedimiento de escala para hallar la viscosidad del fluido a utilizar, esto para que la fractura se abra de manera adecuada y simule las condiciones de campo. Este autor recomienda los aceites a base de silicio con viscosidades de hasta 488.500 centipoises. Y según los resultados obtenidos por Barla (1986), recomienda la glicerina como fluido para la realización del ensayo, ya que da unos resultados satisfactorios en cuanto a la presión de cierre.

Una tercera inquietud que se tiene en la realización de los ensayos, es la relación que pueden tener las grietas que existen alrededor del sondeo con los resultados. El autor Zhou (2011), dice que, las grietas aleatorias generan pequeñas fluctuaciones en la presión durante el ensayo. Estas grietas dominan la geometría y el comportamiento de cómo se propaga una grieta.

Estos artículos además de generar soluciones, también generan nuevas inquietudes, como por ejemplo:

- Qué papel tiene el crecimiento de la fractura, cuando se tiene un material que alrededor de la fractura es diferente en cuanto al módulo y la permeabilidad.
- Que diferencias se generan en los resultados cuando se tiene una fractura inducida.

- Cómo la intersección de la fractura con discontinuidades existentes, puede variar el caudal o la presión.
- Qué diferencia hay entre realizar una prueba con sondeos inclinados y verticales.

## Bibliografía

- [1] **TARBUCK, E.; LUTGENS, F. (2005). Ciencias de la Tierra 8 Edición – Una introducción a la geología física. Pearson Education.**
- [2] **GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I.; FERRER, M.; & ORTUÑO, L. (2003). Ingeniería Geológica, Ed. Pearson – Prentice Hall.**
- [3] **HOEK, E.; KAISER, P.K.; BAWDEN, W.F. (1998). Support of underground excavations in hard rock, Funding by Mining Research Directorate and Universities Research Incentive Fund.**
- [4] **BARRIENTOS, V. (2010). Geología y Morfología del Terreno, Universidad de Cataluña.**
- [5] **JACQUELYNE KIOUS, W.; TILLING, R. (1996). This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics (online edition), <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/dynamic.html>.**
- [6] **KLARICA, S. (2011). La Física y la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Web del profesor, [http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/klarica/Clases/FISICA\\_TIERRA.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/klarica/Clases/FISICA_TIERRA.pdf)**
- [7] **AMADEI, B.; STEPHANSSON, O. (2007). Rock Stress and its Measurement (1st Ed). Chapman & Hall.**
- [8] **ANON. (1997). World Stress Map, Página de Internet. <http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/index.html>**
- [9] **RAMIREZ OYANGUREN, P.; ALEJANO MONGE, L. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, Ed. Red DESIR.**
- [10] **ASTM. Annual Book of Standards. Standard test method for the determination of the in situ stress using the hydraulic fracturing method (Designación D 4645-87). American Society for Testing and Materials, Section 4, vol. 04.08, 1989. p. 851–6.**
- [11] **HAIMSON, B.C.; CORNET, F. H. (2003). ISRM. Suggested Methods for rock stress estimation – Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences 40 page, 1011-1020.**
- [12] **LJUNGGREN, C.; CHANG, Y.; JANSON, T.; CHRISTIANSSON, R. (2003). ISRM. An overview of rock stress measurement methods. International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences 40, 975-989.**
- [13] **FJÆR, E.; HOLT, R.M.; HORSRUD, P.; RAAEN, A.M. & RISNES, R. (2008). Petroleum Related Rock Mechanics, 2nd Edition. Elsevier's publications, Oxford.**

- [14] MARULANDA, A.; AMAYA, F.; MARULANDA ESCOBAR, A.; GUTIÉRREZ, R. (2006). Modificación del esquema de un proyecto hidroeléctrico a partir de los resultados de ensayos de fracturamiento hidráulico.
- [15] DONG Y. (2010). Hydraulic Fracture Containment in Sand. Tesis para obtener el grado de Doctor. Universidad Tecnológica de Delft. ISBN 978-90-9025459-3.
- [16] SONG I.; SUH M.; WON K.; HAIMSON B. (2001). A laboratory study of hydraulic fracturing breakdown pressure in tablerock sandstone. *Geosciences Journal*. Vol. 5, No. 3, p. 263-271.
- [17] LIBERMAN, M. (2012). Hydraulic Fracturing Experiments to Investigate Circulation Losses. M.Sc. Petroleum Engineering Dissertation, Missouri University of Science and Technology. Rolla, Missouri, USA.
- [18] CASAS, L. (2006). Large scale hydraulic fracturing test on a rock with discontinuities. 41th US Rock Mech. Symposium. Golden, CO, Junio 17-12.
- [19] DE PATER, C.J., M.P. CLEARY, T.S. QUINN, D.T. BARR, D.E. JOHNSON AND L. WEIJERS. (1994). "Experimental Verification of Dimensional Analysis for Hydraulic Fracturing". SPE Artículo No.24994, SPE Production and Facilities (November 1994): p. 230-238.
- [20] MARULANDA, A.; GUTIÉRREZ, R.; VALLEJO, H. (1990). Selection of equipment for hydro fracturing test in permeable rocks. *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Rossmainth
- [21] REINICKE, A. (2011). Mechanical and Hydraulic Aspects of Rock-Proppant Systems Laboratory Experiments and Modeling Approaches. Scientific Technical Report STR11/09. Helmholtz-Zentrum Postdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
- [22] VAN DAM, D.B.; DE PATER, C.J.; DELFT U. OF TECHNOLOGY. (2001). Roughness of Hydraulic Fractures: Importance of In-Situ Stress and Tip Processes. Society of Petroleum Engineers 68775-PA. SPE Journal. Volume 6, Number 1, March 2001.
- [23] MARULANDA, A.; MARULANDA, C.; GUTIÉRREZ, R. (2011). La Fracturación hidráulica como elemento determinante en la optimización del diseño de túneles a presión.
- [24] FRASH, L.; GUTIERREZ, M.; HAMPTON, J. (2013). Scale Model simulation of Hydraulic Fracturing for EGS Reservoir Creation Using a Heated True-Triaxial Apparatus. *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*, Dr. Rob Jeffrey (Ed.), ISBN: 978-953-51-1137-5, InTech, DOI: 10.5772/56113. <http://www.intechopen.com/books/effective-and-sustainable-hydraulic-fracturing/scale-model-simulation-of-hydraulic-fracturing-for-egs-reservoir-creation-using-a-heated-true-triaxi>

- [25] HAIMSON, B. C. (1981). Large scale laboratory testing of hydraulic fracturing. *Geophysics. Res. Lett.*, 8(7), 715–718.
- [26] ZHOU, J., XUE, C. (2011). Experimental Investigation of Fracture Interaction between Natural Fractures and Hydraulic Fracture in Naturally Fractured Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/142890-MS
- [27] PAPADOPOULOS, J. M., NARENDRAN, V. M., & CLEARY, M. P. (1983). Laboratory Simulations of Hydraulic Fracturing. *Society of Petroleum Engineers*. Doi: 10.2118/11618-MS.
- [28] BARLA, G., BERTACCHI, P., ZANINETTI, A., ROSSI, P.P., VILEMO, I. (1986). Hydraulic fracturing testing method for rock stress measurements in Italy. *Proceedings of the International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements/Stockholm*.

## **ANEXO 1**

- **Equipos para el montaje poliaxial**

## Triaxial Rock Testing System (RTX-1000)



- 1,000 kN (225 kip) axial load and 70 MPa (10,000 psi) confining pressure capacity
- Direct closed-loop digital servo control of axial stress, axial strain, radial strain, and several other calculated triaxial variables
- GCTS High Pressure Triaxial cell with internal instrumentation to measure local axial & radial strains
- Ideal for performing unconfined compression, triaxial, bending, indirect tension, fracture, creep, post failure behavior, & other compression tests
- Available options: High stiffness loading frame, platens with ultrasonic transducers, high temperature control subsystem, and upgrades for axial loads up 4,500 kN and confining pressures up to 210 MPa.
- Economical "turn-key" systems built to customer specifications.

### DESCRIPTION

GCTS Triaxial Rock Testing Systems are manufactured according to your design specifications (load capacity and system stiffness, sample size, confining and pore pressures, internal instrumentation, temperature testing, and ultrasonic velocity measurements). The top cross head height can be

adjusted to accommodate a wide variety of test specimens and triaxial cells. The RTX-1000 meets the specifications of the International Society for Rock Mechanics (ISRM) for triaxial testing of rock samples.

The system is capable of performing static and dynamic closed-loop strain or stress controlled as well as post failure behavior tests. Included with this system is our true 32-bit Windows XP Software. It allows sending directly your test data to any computer connected to your local network. Our new software includes a database system to keep track of all the data generated at your lab with any of our testing systems. Using a Windows network system in your lab facilitates the transferring of your test data directly into other Windows programs such as Word or Excel for report generation as well as to easily backup your important test results

The Graphical User Interface with context-sensitive on-line help and intuitive color windows helps minimize learning time and enables laboratory personnel to conduct more complex, but realistic, testing programs at substantially lower operating cost and also with minimal operator error. The system manages all the instrumentation and continuously monitors sensor outputs to accurately account for uplift pressures acting on the loading piston, area changes, deformation and volume change sensors setup and re-positioning, etc.

### SPECIFICATIONS

Contact GCTS

# Termopares aislados listos para utilizarse con conductores pelados

Disponibilidad de longitudes, aislamientos y configuraciones personalizadas

Serie 5-TC, paquete de 5 unidades



Se muestran en un tamaño inferior al real.



- Disponible en prácticos paquetes de 5 unidades
- Aislamiento PFA, Kapton® o trenzado de vidrio
- Conductores con diámetro de 0,8, 0,5, 0,25, 0,13 y 0,08 mm
- Longitudes estándar de 1 y 2 m
- Calibración disponible
- Cantidades OEM disponibles

OMEGA & SUPRA  
LÍMITES ESPECIALES (SLE)  
y EN 60584-2:  
Tolerancia clase 1

“TT” Aislamiento PFA



Cable con aislamiento PFA y calibre fino de 40

“GG” Aislamiento de trenzado de vidrio



Aislamiento KAPTON®

## ¡Etiquetas adhesivas TAP también disponibles!

Las etiquetas adhesivas del termopar fijan las sondas de alambre a la superficie. Las etiquetas adhesivas TAP tienen un grosor de 0,064 mm y pueden utilizarse a una temperatura máxima de 180 °C. Están hechas de una película de poliamida con un adhesivo de silicona sensible a la presión.

Consulte [es.omega.com](http://es.omega.com) para obtener más detalles e información sobre pedidos.



El modelo TAP, rollo de 100 etiquetas adhesivas, se muestra en un tamaño inferior al real.

Para hacer su pedido, visite [es.omega.com/5tc](http://es.omega.com/5tc) para consultar precios y detalles

N.º de modelo y de color conforme a IEC	Calibre CAE	Diámetro en mm	Aislamiento
5TC-GG-(*)I-20-(**)	20	0,81	Trenzado de vidrio
5TC-GG-(*)I-24-(**)	24	0,51	Trenzado de vidrio
5TC-GG-(*)I-30-(**)	30	0,25	Trenzado de vidrio
5TC-TT-(*)I-20-(**)	20	0,81	PFA
5TC-TT-(*)I-24-(**)	24	0,51	PFA
5TC-TT-(*)I-30-(**)	30	0,25	PFA
5TC-TT-(*)I-36-(**)	36	0,13	PFA
5TC-TT-(*)I-40-(**)	40	0,08	PFA
5TC-KK-(*)I-20-(**)	20	0,81	Kapton®
5TC-KK-(*)I-24-(**)	24	0,51	Kapton®
5TC-KK-(*)I-30-(**)	30	0,25	Kapton®

\* Insertar calibración J, K, T, o E. \*\* Especificar longitud, insertar "1M" para 1 m o "2M" para una longitud de 2 m.  
Nota: para cables GG, KK o TT existe un coste adicional por metro, por paquete de 5 unidades.  
Ejemplo de pedido: 5TC-TT-KI-36-1M, 5 cada uno, termopares con aislamiento PFA, calibración de tipo K (CHROMEKA®-ALOMEGA®), conductor de 0,13 mm de diámetro, 1 m de largo, terminales de conductores desnudos.

# SLB-700A/06-1

# SLB-700A/12-1

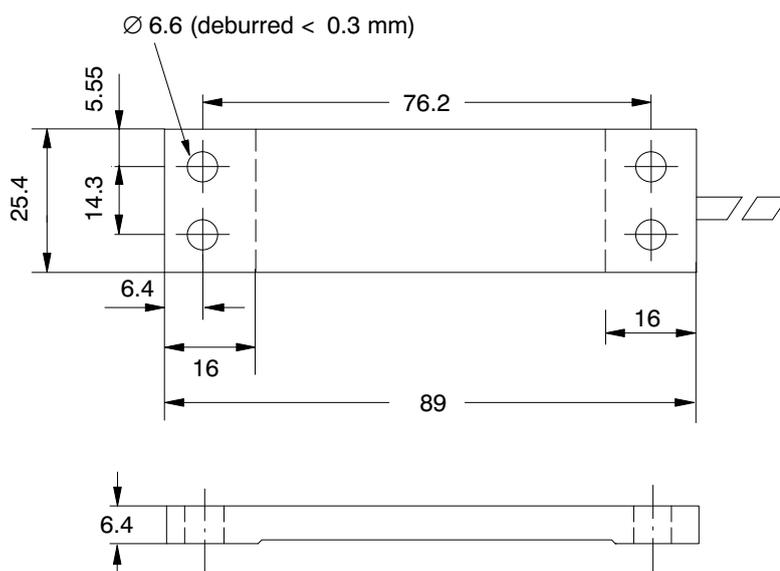
## Strain Transducer

### Special features

- For monitoring strain on statically and dynamically loaded components, e.g. on cranes, presses and roll stands
- Simple, bolted mounting
- Stainless steel
- Protected against environmental influences



### Dimensions (in mm; 1 mm = 0.03937 inches)



four-wire cable  
length 6 m (SLB-700A/06) or  
12 m (SLB-700A/12)  
Ø approx. 3

### SLB-700A cable wire assignment

Assignment	Color code
Excitation voltage (+)	blue
Excitation voltage (-)	black
Measurement signal (+)	white
Measurement signal (-)	red
Shield	connected to housing

## Specifications

Type		SLB-700A/06	SLB-700A/12
Nominal (rated) measuring range	μm/m	0 ... 500	
Nominal (rated) sensitivity	mV/V	1.5 ±0.15	
Relative zero signal error	%	5	
Relative reversibility error	%	0.5	
Relative linearity error	%	0.5	
Effect of temperature on sensitivity, per 10 K	%	0.2	
Effect of temperature on zero signal, per 10 K	%	0.2	
Output resistance	Ω	1000 ±10	
Input resistance	Ω	> 1000	
Insulation resistance	Ω	> 5 · 10 <sup>10</sup>	
Nominal (rated) range of the excitation voltage	V	2 ... 15	
Nominal (rated) temperature range	°C	-10 ... 40	
Operating temperature range	°C	-20 ... 60	
Storage temperature range	°C	-40 ... 85	
Adapted to a material with a thermal expansion coefficient of	1/°C	12 · 10 <sup>-6</sup>	
Maximum operating strain	μm/m	750	
Restoring force	N	approx. 3110	
Breaking strain	μm/m	1500	
Max. permissible vibrational stress per VDI/VDE 2638	%	150	
Vibration per DIN EN 60068-2-6	Hz	10 ... 500	
Maximum impact load per DIN EN 60068-2-27	g	50	
Degree of protection per DIN EN 60529		IP65	
Mounting bolt tightening torque at least	N·m	8	
nominal (rated) value	N·m	16	
Cable sheath		PUR	
Cable length	m	6	12
Cable diameter	mm	3	

Ordering number	SLB-700A/06-1	SLB-700A/12-1
-----------------	---------------	---------------

Modifications reserved.  
All product descriptions are for general information only. They are not to be understood as a guarantee of quality or durability and do not constitute any liability whatsoever.

### Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Im Tiefen See 45 · 64293 Darmstadt · Germany  
Tel. +49 6151 803-0 · Fax: +49 6151 803-9100  
E-mail: [info@hbm.com](mailto:info@hbm.com) · [www.hbm.com](http://www.hbm.com)

measure and predict with confidence



# TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO DE CARRERA LARGA CON SALIDA DE 5 VCC

## Serie LD620

- ✓ Linealidad inferior al 0,2%
- ✓ Longitudes de recorrido disponibles de 5 a 300 mm
- ✓ Cuerpo de acero inoxidable resistente de 19 mm de diá.
- ✓ Conductores rígidos de acero inoxidable
- ✓ Núcleo guiado con muelle extraíble
- ✓ Calificación ambiental IP67
- ✓ Gran margen de diámetro interno-núcleo



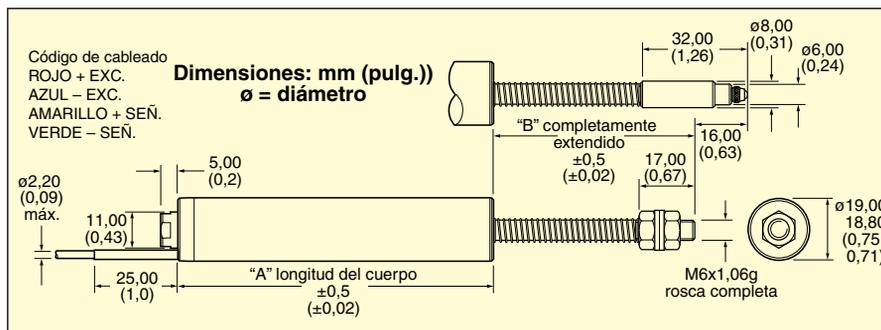
El modelo LD620-25 se muestra en un tamaño inferior al real.



LD-UJOINT-KIT, se muestra en un tamaño inferior al real.

Los transductores de desplazamiento con salida de CC de la Serie LD620 han mejorado el sellado con calificación IP67 junto con guías de polímero y conductores rígidos. Estos transductores son precisos y fiables, en especial en condiciones corrosivas y de humedad.

Las opciones de salida incluyen  $\pm 5$  Vcc (LD620) o 0 a 10 Vcc (LD621). Se mantiene un margen de diámetro interno-núcleo excepcionalmente grande a lo largo del rango. Ello facilita la instalación y ayuda a evitar una alineación incorrecta.



### ESPECIFICACIONES

**Linealidad:** <0,2% salida a escala completa

**Tensión de excitación:** De 10 a 30 Vcc @ 25 mA máximo

**Salida:** LD620,  $\pm 5$  Vcc; LD621, 0 A 10 Vcc

**Ondulación de salida:** 0,02% salida a escala completa

**Ancho de banda:** 500 Hz (-3 dB)

**Temperatura de almacenamiento:**

-20 a 85 °C (-4 a 185 °F)

**Temperatura de funcionamiento:**

0 a 65 °C (32 a 149 °F)

**Sellado:** IP67

**Vibración (Frecuencia sinusoidal):**

10 a 50 Hz: 1 a 10 g rms

amplitud lineal

50 Hz a 1 kHz: 10 g rms amplitud

**Choque:**

**Ensayo de caída:** 1 m (3') en superficie dura

**Ensayo de vuelco:** 10 veces cada extremo en superficie dura

**Material de la carcasa:** Acero inoxidable 300

**Cable:** PFA, 2 m (6') de largo

**Material del núcleo:** Níquel-hierro

**Para hacer su pedido, visite [es.omega.com/ld620](http://es.omega.com/ld620) para consultar precios y detalles**

N.º DE MODELO $\pm 5$ VCC	RANGO MM (PULG.)	N.º DE MODELO 0 a 10 Vcc	RANGO mm (pulg.)	DIM. "A" mm (pulg.)	DIM. "B" mm (pulg.)
LD620-2,5	$\pm 2,5$ ( $\pm 0,1$ )	LD621-5	0 a 5 (0 a 0,2)	94,0 (3,7)	35,3 (1,4)
LD620-5	$\pm 5$ ( $\pm 0,2$ )	LD621-10	0 a 10 (0 a 0,4)	113,5 (4,5)	46,3 (1,8)
LD620-7,5	$\pm 7,5$ ( $\pm 0,3$ )	LD621-15	0 a 15 (0 a 0,6)	120,7 (4,8)	50,3 (2,0)
LD620-10	$\pm 10$ ( $\pm 0,4$ )	LD621-20	0 a 20 (0 a 0,8)	135,0 (5,3)	61,3 (2,4)
LD620-15	$\pm 15$ ( $\pm 0,6$ )	LD621-30	0 a 30 (0 a 1,2)	149,4 (5,9)	79,3 (3,1)
LD620-25	$\pm 25$ ( $\pm 1,0$ )	LD621-50	0 a 50 (0 a 2,0)	170,9 (6,7)	102,3 (4,0)
LD620-50	$\pm 50$ ( $\pm 2,0$ )	LD621-100	0 a 100 (0 a 3,9)	228,5 (9,0)	160,3 (6,3)
LD620-75	$\pm 75$ ( $\pm 3,0$ )	LD621-150	0 a 150 (0 a 5,9)	278,7 (11,0)	231,3 (9,1)
LD620-100	$\pm 100$ ( $\pm 3,9$ )	—	—	336,2 (13,2)	291,2 (11,5)
LD620-150	$\pm 150$ ( $\pm 5,9$ )	—	—	450,9 (17,8)	457,3 (18,0)
—	—	LD621-200	0 a 200 (7,9)	336,2 (13,2)	291,2 (11,5)
—	—	LD621-300	0 a 300 (11,8)	450,9 (17,8)	457,3 (18,0)

**Ejemplo de pedido:** LD620-2,5, sensor de desplazamiento CC con rango de  $\pm 2,5$  mm ( $\pm 0,1$  pulg.) con salida  $\pm 5$  Vcc.

### ACCESORIOS

N.º DE MODELO	DESCRIPCIÓN
LD-TIP	Adaptador de punta/punta redonda
LD-UJOINT-KIT	Kit de ajuste de junta universal

# ALL STAINLESS STEEL TRANSDUCER MULTIMEDIA COMPATIBILITY HIGH-PERFORMANCE SILICON TECHNOLOGY

**LARGE  
INVENTORY  
Fast Shipment!**

0-1 to 0-10,000 psi  
0-0.07 to 0-690 bar  
100 mV, 0 to 5 V,  
and 4 to 20 mA Outputs

## PX309 Series



- ✓ 1, 2 & 5 psi Low Pressure Ranges!
- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ Gage or Absolute Pressure
- ✓ Rugged Solid State Design
- ✓ High Stability, Low Drift
- ✓ 0.25% Static Accuracy
- ✓ IP 65 Protection Class

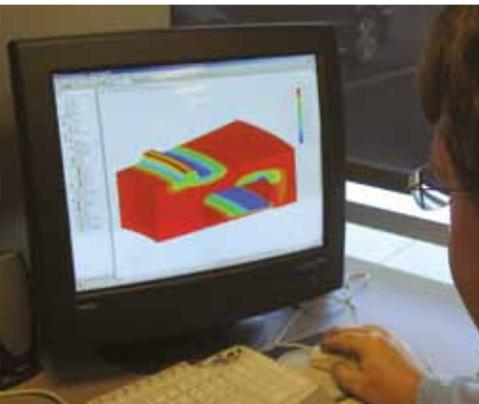
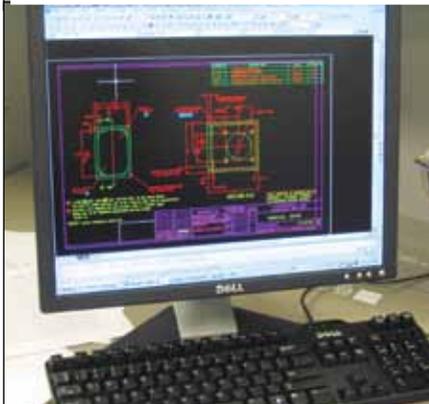


MILLIVOLT OUTPUT  
PRESSURE TRANSDUCERS  
**B**



All models shown actual size.

We provide a complete range of services—from product inception, through design and prototypes, to manufacturing and testing. Our application engineers work closely with our customers to **customize, design** or create entirely **new products**. Call us—whether you're an OEM, manufacturer, or end user.



**Now Available  
with M12  
Connector**

**Engineered from  
1 to 10,000 psi.  
Low Pressure Ranges:  
1, 2 & 5 psi.**

# RUGGED, GENERAL PURPOSE TRANSDUCER

## COMMON SPECIFICATIONS

mV Output Wiring			
Wiring	Cable	M12 and mini DIN	Twist-Lock
Excitation (+)	Red	Pin 1	Pin A
Output (+)	White	Pin 3	Pin C
Output (-)	Green	Pin 4	Pin D
Excitation (-)	Black	Pin 2	Pin B
Spare Vent			Pin E Pin F

5 Vdc Output Wiring			
Wiring	Cable	M12 and mini DIN	Twist-Lock
Excitation (+)	Red	Pin 1	Pin A
Excitation (-)	Black	Pin 2	Pin B
Output (+)	White	Pin 3	Pin C
N/C†		Pin 4	Pin D
Spare Vent			Pin E Pin F

mA Output Wiring			
Wiring	Cable	M12 and mini DIN	Twist-Lock
Supply (+)	Red	Pin 1	Pin A
Supply (-)	Black	Pin 2	Pin B
N/C†		Pin 3	Pin C
N/C†		Pin 4	Pin D
Spare Vent			Pin E Pin F

† N/C: Do not connect any wires to this pin.

### SPECIFICATIONS

OMEGA's PX309 Series models below 100 psi use a high-accuracy silicon sensor protected by an oil-filled stainless steel diaphragm. Units 100 psi and above use silicon strain gages molecularly bonded to the stainless steel diaphragm

#### Long-Term Stability (1 Year):

±0.25% typical

**Typical Life:** 10 million cycles typical

**Operating Temperature:** -40 to 85°C (-40 to 185°F)

#### Proof Pressure:

**All psia and ≤50 psig Ranges:**

3x capacity or 20 psi, whichever is greater

**100 psig Ranges:** 2x capacity

**Burst Pressure:** 500% of capacity or 25 psi, whichever is greater

**Response Time:** <1 ms

**Shock:** 50 g, 11 ms half-sine

**Vibration:** ±20 g

**Protection Class:** IP 65

#### Wetted Parts:

316 SS for all psia and 1 to 50 psig ranges; 17-4 PH stainless steel for ranges 100 to 10,000 psig

**Pressure Port:** ¼-18 MNPT

#### Electrical Connections:

PX309: 1.5 m (5') 2-, 3-, or 4-conductor cable (mA, 5V, mV outputs, respectively)

**PX319:** mini DIN connector with mating connector included

**PX329:** Twist-lock connector, vented mating connector sold separately (PT06V-10-6S)

**PX359:** M12, 4-pin connector

#### Weight:

**PX309:** 154 g (5.4 oz)

**PX319, PX329, PX359:** 100 g (3.5 oz)

### 100 mV OUTPUT

#### Excitation:

**0 to 50 psig and All psia Ranges:**

10 Vdc (ratiometric), (5 to 12 Vdc limits)

**100 to 10,000 psig Ranges:**

5 Vdc (ratiometric), (3 to 10 Vdc limits)

**Output:** 0 to 100 mV, except

2 psi = 40 mV and 1 psi = 20 mV

**Accuracy:** ±0.25% FS BSL at 25°C; includes linearity, hysteresis and repeatability

**Zero Offset:** ±2% FSO;

±4% for 1 and 2 psi ranges

**Span Setting:** ±2% FSO;

±4% for 1 and 2 psi ranges

**Compensated Temperature:** 0 to 50°C (32 to 122°F)

#### Thermal Zero and Span Effects

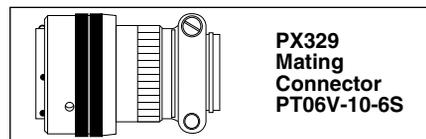
**(Over Compensated Range):**

**15 to 10,000 psi Ranges:** ±2% FSO

**5 psi Range:** ±3% FSO

**2 psi Range:** ±4% FSO

**1 psi Range:** ±5% FSO



### 5V OUTPUT

**Excitation:** 9 to 30 Vdc (reverse polarity and overvoltage protected)

**Output:** 0 to 5 Vdc or 4 to 20 mA

**Static Accuracy 5 to 10,000 psi:** ±0.25% FS BSL at 25°C; includes linearity, hysteresis and repeatability

**Zero Offset:** ±2% FSO;

±4% for 1 and 2 psi ranges

**Span Setting:** ±2% FSO; ±4% for 1 and 2 psi ranges

#### Compensated Temperature:

**>5 psi Range:** -20 to 85°C (-4 to 185°F)

**≤5 psi Range:** 0 to 50°C (32 to 122°F)

**Total Error Band:** ±2% FSO; includes linearity, hysteresis, repeatability, thermal hysteresis and thermal errors (except 2 psi = ±3% and 1 psi = ±4.5%)

Order a snubber to protect your pressure transducer!



PS-4G, shown actual size.

Snubbers protect sensors from fluid hammers/spikes.

# HOW TO ORDER PX309 SERIES WITH 100 mV OUTPUTS

**100 mV Output**  
**0-1 to 0-10,000 psi**  
**0-70 mbar to 0-690 bar**



PX319-050GV,  
mini DIN connector  
included, shown smaller  
than actual size.

Metric thread  
adaptors available,  
visit [omega.com/mta\\_brk](http://omega.com/mta_brk)

## PX309 Series



- ✓ Gage or Absolute Pressure
- ✓ Low Pressure to 1 psig
- ✓ Rugged Solid State Design
- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ High Stability, Low Drift
- ✓ 0.25% Accuracy

### 100 mV OUTPUT SPECIFICATIONS

#### Excitation:

- 0 to 50 psig and All psia Ranges:  
10 Vdc (ratiometric), (5 to 12 Vdc limits)
- 100 to 10,000 psig Ranges:  
5 Vdc (ratiometric), (3 to 10 Vdc limits)

**Output:** 0 to 100 mV, except  
2 psi = 40 mV and 1 psi = 20 mV

**Accuracy:** ±0.25% FS BSL at 25°C;  
includes linearity, hysteresis and  
repeatability

**Zero Offset:** ±2% FSO;  
±4% for 1 and 2 psi ranges

**Span Setting:** ±2% FSO;  
±4% for 1 and 2 psi ranges

**Compensated Temperature:** 0 to 50°C  
(32 to 122°F)

**Thermal Zero and Span Effects  
(Over Compensated Range):**

- 15 to 10,000 psi Ranges: ±2% FSO
- 5 psi Range: ±3% FSO
- 2 psi Range: ±4% FSO
- 1 psi Range: ±5% FSO

### To Order

RANGE		1.5 m CABLE CONNECTION	MINI DIN CONNECTION	TWIST-LOCK CONNECTION
bar	psi			
<b>ABSOLUTE PRESSURE</b>				
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005AV	PX319-005AV	PX329-005AV
0 to 1	0 to 15	PX309-015AV	PX319-015AV	PX329-015AV
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030AV	PX319-030AV	PX329-030AV
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050AV	PX319-050AV	PX329-050AV
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100AV	PX319-100AV	PX329-100AV
0 to 14	0 to 200	PX309-200AV	PX319-200AV	PX329-200AV
0 to 21	0 to 300	PX309-300AV	PX319-300AV	PX329-300AV
<b>GAGE PRESSURE</b>				
0 to 0.07	0 to 1	PX309-001GV	PX319-001GV	PX329-001GV
0 to 0.14	0 to 2	PX309-002GV	PX319-002GV	PX329-002GV
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005GV	PX319-005GV	PX329-005GV
0 to 1	0 to 15	PX309-015GV	PX319-015GV	PX329-015GV
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030GV	PX319-030GV	PX329-030GV
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050GV	PX319-050GV	PX329-050GV
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100GV	PX319-100GV	PX329-100GV
0 to 10	0 to 150	PX309-150GV	PX319-150GV	PX329-150GV
0 to 14	0 to 200	PX309-200GV	PX319-200GV	PX329-200GV
0 to 21	0 to 300	PX309-300GV	PX319-300GV	PX329-300GV
0 to 34	0 to 500	PX309-500GV	PX319-500GV	PX329-500GV
0 to 69	0 to 1000	PX309-1KGV	PX319-1KGV	PX329-1KGV
0 to 138	0 to 2000	PX309-2KGV	PX319-2KGV	PX329-2KGV
0 to 207	0 to 3000	PX309-3KGV	PX319-3KGV	PX329-3KGV
0 to 345	0 to 5000	PX309-5KGV	PX319-5KGV	PX329-5KGV
0 to 517	0 to 7500	PX309-7.5KGV	PX319-7.5KGV	PX329-7.5KGV
0 to 690	0 to 10,000	PX309-10KGV	PX319-10KGV	PX329-10KGV

Comes complete with 5-point NIST-traceable calibration.

**Notes:** 1. Units 100 psig and above may be subjected to vacuum on the pressure port without damage. 2. For alternative performance specifications to suit your application, contact Engineering.

**Ordering Examples:** **PX309-100GV**, 100 psi gage pressure transducer with 100 mV output at 5 Vdc excitation and 1.5 m cable termination. **PX319-015AV**, 15 psi absolute pressure transducer with 100 mV output @ 10 Vdc excitation and mini DIN termination.

**PX329-3KGV**, 3000 psi gage pressure transducer with 100 mV output @ 5 Vdc excitation and twist-lock termination. Mating connector sold separately, order **PT06V-10-6S**, Consult Sales for OEM pricing.

#### ACCESSORIES

MODEL NO.	DESCRIPTION
CAL-3	Recalibration: 5-point NIST traceable
PT06V-10-6S	Mating connector for PX329
CA-39-4PC22-5	4-conductor mating twist-lock connector with 1.5 m (5') cable for PX329
CX5302	Extra mini DIN connector for PX319



MILLIVOLT OUTPUT  
PRESSURE TRANSDUCERS  
**B**

# HOW TO ORDER PX309 SERIES WITH 0 TO 5 Vdc OUTPUT

**0 to 5 Vdc Output**  
**0-1 to 0-10,000 psi**  
**0-70 mbar to 0-690 bar**



Twist-lock style.  
PX329-015G5V  
shown actual size.

Metric thread  
adaptors available,  
visit [omega.com/mta\\_brk](http://omega.com/mta_brk)

## PX309 Series



- ✓ Gage or Absolute Pressure
- ✓ Low Pressure to 1 psig
- ✓ Rugged Solid State Design
- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ High Stability, Low Drift
- ✓ 0.25% Static Accuracy

### 5V OUTPUT SPECIFICATIONS

**Excitation:** 9 to 30 Vdc (reverse polarity and overvoltage protected)

**Output:** 0 to 5 Vdc or 4 to 20 mA

**Static Accuracy 5 to 10,000 psi:** ±0.25% FS BSL at 25°C; includes linearity, hysteresis and repeatability

**Zero Offset:** ±2% FSO; ±4% for 1 and 2 psi ranges

**Span Setting:** ±2% FSO; ±4% for 1 and 2 psi ranges

**Compensated Temperature:**

>5 psi Range: -20 to 85°C (-4 to 185°F)

≤5 psi Range: 0 to 50°C (32 to 122°F)

**Total Error Band:** ±2% FSO; includes linearity, hysteresis, repeatability, thermal hysteresis and thermal errors (except 2 psi = ±3% and 1 psi = ±4.5%)

To Order				
RANGE		1.5 m CABLE CONNECTION	MINI DIN CONNECTION	TWIST-LOCK CONNECTION
bar	psi			
<b>ABSOLUTE PRESSURE</b>				
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005A5V	PX319-005A5V	PX329-005A5V
0 to 1	0 to 15	PX309-015A5V	PX319-015A5V	PX329-015A5V
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030A5V	PX319-030A5V	PX329-030A5V
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050A5V	PX319-050A5V	PX329-050A5V
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100A5V	PX319-100A5V	PX329-100A5V
0 to 14	0 to 200	PX309-200A5V	PX319-200A5V	PX329-200A5V
0 to 21	0 to 300	PX309-300A5V	PX319-300A5V	PX329-300A5V
<b>GAGE PRESSURE</b>				
0 to 0.07	0 to 1	PX309-001G5V	PX319-001G5V	PX329-001G5V
0 to 0.14	0 to 2	PX309-002G5V	PX319-002G5V	PX329-002G5V
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005G5V	PX319-005G5V	PX329-005G5V
0 to 1	0 to 15	PX309-015G5V	PX319-015G5V	PX329-015G5V
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030G5V	PX319-030G5V	PX329-030G5V
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050G5V	PX319-050G5V	PX329-050G5V
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100G5V	PX319-100G5V	PX329-100G5V
0 to 10	0 to 150	PX309-150G5V	PX319-150G5V	PX329-150G5V
0 to 14	0 to 200	PX309-200G5V	PX319-200G5V	PX329-200G5V
0 to 21	0 to 300	PX309-300G5V	PX319-300G5V	PX329-300G5V
0 to 34	0 to 500	PX309-500G5V	PX319-500G5V	PX329-500G5V
0 to 69	0 to 1000	PX309-1KG5V	PX319-1KG5V	PX329-1KG5V
0 to 138	0 to 2000	PX309-2KG5V	PX319-2KG5V	PX329-2KG5V
0 to 207	0 to 3000	PX309-3KG5V	PX319-3KG5V	PX329-3KG5V
0 to 345	0 to 5000	PX309-5KG5V	PX319-5KG5V	PX329-5KG5V
0 to 517	0 to 7500	PX309-7.5KG5V	PX319-7.5KG5V	PX329-7.5KG5V
0 to 690	0 to 10,000	PX309-10KG5V	PX319-10KG5V	PX329-10KG5V

Comes complete with 5-point NIST-traceable calibration.

**Notes:** 1. Units 100 psig and above may be subjected to vacuum on the pressure port without damage.

2. For alternative performance specifications to suit your application, contact Engineering.

**Ordering Examples:** PX309-100G5V, 100 psi gage pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and 1.5 m cable termination.

PX319-015A5V, 15 psi absolute pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and mini DIN termination.

PX329-3KG5V, 3000 psi gage pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and twist-lock termination. Mating connector sold separately; order PT06V-10-6S. Consult Sales for OEM pricing.

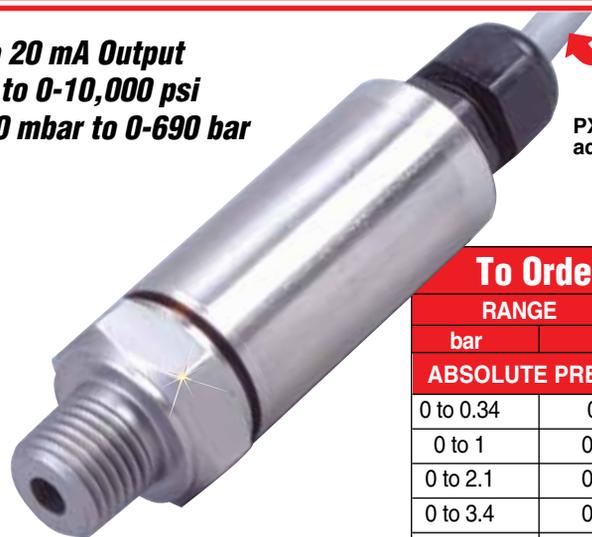
### ACCESSORIES

MODEL NO.	DESCRIPTION
CAL-3	Recalibration: 5-point NIST traceable
PT06V-10-6S	Mating connector for PX329
CA-329-4PC24-005	4-conductor mating twist-lock connector with 1.5 m (5') cable for PX329
CX5302	Extra mini DIN connector for PX319

# HOW TO ORDER PX309 SERIES

## WITH 4 TO 20 mA OUTPUT

**4 to 20 mA Output**  
**0-1 to 0-10,000 psi**  
**0-70 mbar to 0-690 bar**



PX309-030GI shown actual size.

Metric thread adaptors available, visit [omega.com/mta\\_brk](http://omega.com/mta_brk)

### PX309 Series



- ✓ Gage or Absolute Pressure
- ✓ Low Pressure to 1 psig
- ✓ Rugged Solid State Design
- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ High Stability, Low Drift
- ✓ 0.25% Static Accuracy

#### 4 to 20 mA OUTPUT SPECIFICATIONS

**Excitation:** 9 to 30 Vdc (reverse polarity and overvoltage protected)

**Output:** 4 to 20 mA

**Static Accuracy 5 to 10,000 psi:** ±0.25% FS BSL at 25°C; includes linearity, hysteresis and repeatability

**Zero Offset:** ±2% FSO; ±4% for 1 and 2 psi ranges

**Span Setting:** ±2% FSO; ±4% for 1 and 2 psi ranges

**Compensated Temperature:**

>5 psi Range: -20 to 85°C (-4 to 185°F)

≤5 psi Range: 0 to 50°C (32 to 122°F)

**Total Error Band:** ±2% FSO; includes linearity, hysteresis, repeatability, thermal hysteresis and thermal errors (except 2 psi = ±3% and 1 psi = ±4.5%)

### To Order

RANGE		1.5 m CABLE CONNECTION	MINI DIN CONNECTION	TWIST-LOCK CONNECTION
bar	psi			
<b>ABSOLUTE PRESSURE</b>				
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005AI	PX319-005AI	PX329-005AI
0 to 1	0 to 15	PX309-015AI	PX319-015AI	PX329-015AI
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030AI	PX319-030AI	PX329-030AI
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050AI	PX319-050AI	PX329-050AI
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100AI	PX319-100AI	PX329-100AI
0 to 14	0 to 200	PX309-200AI	PX319-200AI	PX329-200AI
0 to 21	0 to 300	PX309-300AI	PX319-300AI	PX329-300AI
<b>GAGE PRESSURE</b>				
0 to 0.07	0 to 1	PX309-001GI	PX319-001GI	PX329-001GI
0 to 0.14	0 to 2	PX309-002GI	PX319-002GI	PX329-002GI
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005GI	PX319-005GI	PX329-005GI
0 to 1	0 to 15	PX309-015GI	PX319-015GI	PX329-015GI
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030GI	PX319-030GI	PX329-030GI
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050GI	PX319-050GI	PX329-050GI
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100GI	PX319-100GI	PX329-100GI
0 to 10	0 to 150	PX309-150GI	PX319-150GI	PX329-150GI
0 to 14	0 to 200	PX309-200GI	PX319-200GI	PX329-200GI
0 to 21	0 to 300	PX309-300GI	PX319-300GI	PX329-300GI
0 to 34	0 to 500	PX309-500GI	PX319-500GI	PX329-500GI
0 to 69	0 to 1000	PX309-1KGI	PX319-1KGI	PX329-1KGI
0 to 138	0 to 2000	PX309-2KGI	PX319-2KGI	PX329-2KGI
0 to 207	0 to 3000	PX309-3KGI	PX319-3KGI	PX329-3KGI
0 to 345	0 to 5000	PX309-5KGI	PX319-5KGI	PX329-5KGI
0 to 517	0 to 7500	PX309-7.5KGI	PX319-7.5KGI	PX329-7.5KGI
0 to 690	0 to 10,000	PX309-10KGI	PX319-10KGI	PX329-10KGI

Comes complete with 5-point NIST-traceable calibration.

**Notes:** 1. Units 100 psig and above may be subjected to vacuum on the pressure port without damage. 2. For alternative performance specifications to suit your application, contact Engineering.

**Ordering Examples:** **PX309-100GI**, 100 psi gage pressure transducer with 4 to 20 mA output and 1.5 m cable termination. **PX319-015AI**, 15 psi absolute pressure transducer with 4 to 20 mA output and mini DIN termination. **PX329-3KGI**, 3000 psi gage pressure transducer with 4 to 20 mA output and twist-lock termination. Mating connector sold separately; order **PT06V-10-6S**. Consult Sales for OEM pricing.

#### ACCESSORIES

MODEL NO.	DESCRIPTION
<b>CAL-3</b>	Recalibration: 5-point NIST traceable
<b>PT06V-10-6S</b>	Mating connector for PX329
<b>CA-329-4PC24-005</b>	4-conductor mating twist-lock connector with 1.5 m (5') cable for PX329
<b>CX5302</b>	Extra mini DIN connector for PX319



MILLIVOLT OUTPUT  
 PRESSURE TRANSDUCERS  
**B**



# HOW TO ORDER PX309 SERIES M12 CONNECTOR WITH 100 mV, 0 TO 5 Vdc, OR 4 TO 20 mA OUTPUTS

**M12 Connector Series**  
**0-1 to 0-10,000 psia**  
**0-70 mbar to 0-690 bar**

## PX309 Series



PX359-100GV, M12 connector style, shown actual style.



P002414 cable, shown smaller than actual size.



- ✓ 5-Point NIST Traceable Calibration
- ✓ Gage or Absolute Pressure
- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ Rugged solid State Design
- ✓ High Stability, Low Drift
- ✓ 0.25% Accuracy

To Order				
RANGE		10 mV/V OUTPUT MODEL NO.	0 to 5 Vdc OUTPUT MODEL NO.	4 to 20 mA OUTPUT MODEL NO.
psi	bar			
<b>ABSOLUTE PRESSURE</b>				
0 to 5	0 to 0.34	PX359-005AV	PX359-005A5V	PX359-005AI
0 to 15	0 to 1	PX359-015AV	PX359-015A5V	PX359-015AI
0 to 30	0 to 2.1	PX359-030AV	PX359-030A5V	PX359-030AI
0 to 50	0 to 3.4	PX359-050AV	PX359-050A5V	PX359-050AI
0 to 100	0 to 6.9	PX359-100AV	PX359-100A5V	PX359-100AI
0 to 200	0 to 14	PX359-150AV	PX359-150A5V	PX359-150AI
0 to 300	0 to 21	PX359-200AV	PX359-200A5V	PX359-200AI
<b>GAGE PRESSURE</b>				
0 to 1	0 to 0.07	PX359-001GV	PX359-001G5V	PX359-001GI
0 to 2	0 to 0.14	PX359-002GV	PX359-002G5V	PX359-002GI
0 to 5	0 to 0.34	PX359-005GV	PX359-005G5V	PX359-005GI
0 to 15	0 to 1	PX359-015GV	PX359-015G5V	PX359-015GI
0 to 30	0 to 2.1	PX359-030GV	PX359-030G5V	PX359-030GI
0 to 50	0 to 3.4	PX359-050GV	PX359-050G5V	PX359-050GI
0 to 100	0 to 6.9	PX359-100GV	PX359-100G5V	PX359-100GI
0 to 150	0 to 10.3	PX359-150GV	PX359-150G5V	PX359-150GI
0 to 200	0 to 14	PX359-200GV	PX359-200G5V	PX359-200GI
0 to 300	0 to 21	PX359-300GV	PX359-300G5V	PX359-300GI
0 to 500	0 to 34	PX359-500GV	PX359-500G5V	PX359-500GI
0 to 1000	0 to 69	PX359-1KGV	PX359-1KG5V	PX359-1KGI
0 to 2000	0 to 138	PX359-2KGV	PX359-2KG5V	PX359-2KGI
0 to 3000	0 to 207	PX359-3KGV	PX359-3KG5V	PX359-3KGI
0 to 5000	0 to 345	PX359-5KGV	PX359-5KG5V	PX359-5KGI
0 to 7500	0 to 517	PX359-7.5KGV	PX359-7.5KG5V	PX359-7.5KGI
0 to 10,000	0 to 690	PX359-10KGV	PX359-10KG5V	PX359-10KGI

Comes complete with 5-point NIST traceable calibration. M12 cables sold separately, see accessories.

**Note:** Ranges 100 psi and above may be subjected to a vacuum on the process port without damage.

**Ordering Examples:** PX359-100GV, 100 psi gage pressure transducer 10 mV/V output and M12 connector termination.

PX359-030A5V, 30 psi absolute pressure transducer 0 to 5 Vdc output and M12 connector termination.

PX359-3KGI, 3000 psi gage pressure transducer 4 to 20 mA output and M12 connector termination.

P002414-1, 2 m (6') vented cable for PX359.

### ACCESSORIES

MODEL NO.	DESCRIPTION
DP25B-S	4-digit strain meter for mV/V models
DP25B-E	4-digit process meter for amplified models
PT06V-10-6S	Mating connector for PX359
P002414-1	2 m (6') vented cable with M12 connector for PX359 for gage ranges >100 psi
P002414-2	5 m (16') vented cable with M12 connector for PX359 for gage ranges >100 psi
M12C-PVC-4-S-F-5	5 m (16') PVC cable, straight 4-pin M12 female connector one end, flying leads one end, for all PX359 absolute ranges and gage ranges >100 psi
CAL-3	Recalibration with 5 pt NIST traceable documentation



# ALL STAINLESS STEEL TRANSDUCER MULTIMEDIA COMPATIBILITY HIGH-PERFORMANCE SILICON TECHNOLOGY

## PX309 Series

0 to 5 Vdc Output  
0-1 to 0-10,000 psi  
0-70 mbar to 0-690 bar

Starts at  
**\$225**



- ✓ 1, 2, and 5 psi Ranges
- ✓ Rugged, Solid State Design
- ✓ All Stainless Steel
- ✓ High Stability, Low Drift
- ✓ 0.25% Accuracy Typical
- ✓ RoHS Compliant
- ✓ IP65 Protection Class

### SPECIFICATIONS

**Excitation:** 9 to 30 Vdc (<10 mA)  
(reverse polarity and overvoltage protected)

**Output:** 0 to 5 Vdc

**Accuracy:** ±0.25% includes linearity, hysteresis and repeatability

**Zero Offset:** ±2% FSO;  
±4% 1 and 2 psi ranges

**Span Setting:** ±2% FSO;  
±4% 1 and 2 psi ranges

**Total Error Band:** ±2% FSO, includes linearity, hysteresis, repeatability, thermal hysteresis and thermal errors (except 1 psi = ±4.5% and 2 psi = ±3%)

**Long-Term Stability (1 Year):**  
±0.25% typical

**Typical Life:** 10 million cycles

**Operating Temperature:** -40 to 85°C  
(-40 to 185°F)

**Compensated Temperature:**  
>5 psi Range: -20 to 85°C (-4 to 185°F)  
≤5 psi Range: 0 to 50°C (-18 to 122°F)

**Proof Pressure:**  
psia and ≤50 psig: 3x capacity  
or 20 psi, whichever is greater  
≥100 psi: 2x capacity

**Burst Pressure:** 5x capacity or 25 psi,  
whichever is greater

**Response Time:** <1 ms

PX309-100G5V, \$225, shown smaller than actual size.



Engineered from  
1 to 10,000 psi.

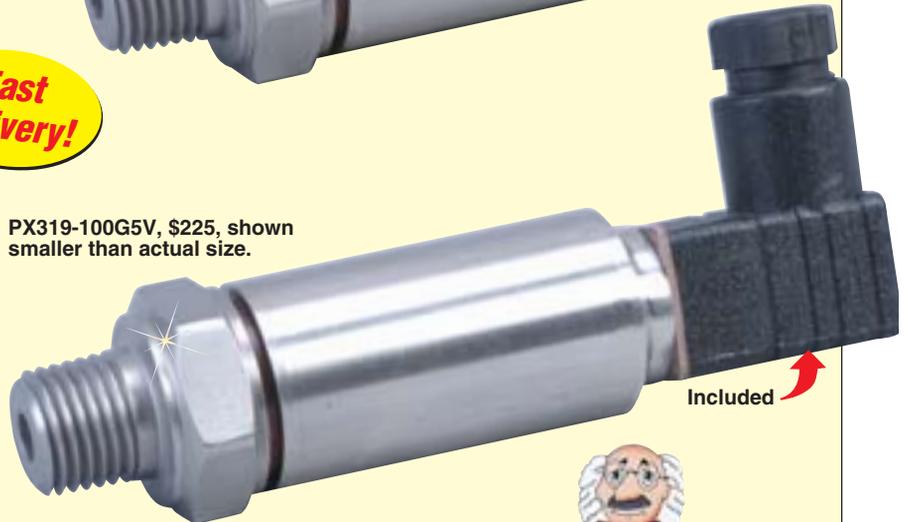
New Low Ranges:  
1, 2, and 5 psi.

PX329-100G5V, \$275, shown smaller than actual size.



Fast  
Delivery!

PX319-100G5V, \$225, shown smaller than actual size.



Included

**Shock:** 50 g, 11 ms half-sine shock

**Vibration:** ±20 g

**Wetted Parts:** 316 SS for all psia ranges and 1 to 50 psig; 17-4 PH SS for ranges 100 to 10,000 psig

**Pressure Port:** ¼-18 MNPT

**Electrical Connections:**

**PX309:** 1.5 m (5') 3-conductor cable

**PX319:** Mini DIN connector with mating connector included

**PX329:** Twist-lock connector, mating connector sold separately (PT06V-10-6S)

**Weight:** 155 g (5.4 oz) max

**Note:** Units 100 psig and above may be subjected to vacuum on the pressure port without damage

For alternative performance specifications contact Engineering.



books1.com  
omega.com

Order a snubber to protect your pressure transducer!



PS-4G, \$10, shown actual size.

Snubbers protect sensors from fluid hammers/spikes.



# RUGGED, GENERAL PURPOSE TRANSDUCER



VOLTAGE OUTPUT  
PRESSURE TRANSDUCERS

**B**

5 Vdc Output Wiring			
Wiring	Cable	Mini DIN	Twist-Lock
Excitation (+)	Red	Pin 1	Pin A
Excitation (-)	Black	Pin 2	Pin B
Output (+)	White	Pin 3	Pin C
NIC <sup>†</sup>		Pin 4	Pin D
Spare			Pin E
Vent			Pin F

Dimensions: mm (in)

  **NEW, LOW-PRESSURE RANGES HIGHLIGHTED**

## To Order (Specify Model Number)

RANGE		1.5 m CABLE CONNECTION	PRICE	MINI DIN CONNECTION	PRICE	TWIST-LOCK CONNECTION	PRICE
bar	psi						
<b>ABSOLUTE PRESSURE</b>							
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005A5V	\$325	PX319-005A5V	\$325	PX329-005A5V	\$350
0 to 1	0 to 15	PX309-015A5V	245	PX319-015A5V	245	PX329-015A5V	295
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030A5V	245	PX319-030A5V	245	PX329-030A5V	295
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050A5V	245	PX319-050A5V	245	PX329-050A5V	295
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100A5V	245	PX319-100A5V	245	PX329-100A5V	295
0 to 14	0 to 200	PX309-200A5V	245	PX319-200A5V	245	PX329-200A5V	295
0 to 21	0 to 300	PX309-300A5V	245	PX319-300A5V	245	PX329-300A5V	295
<b>GAGE PRESSURE</b>							
0 to 0.07	0 to 1	PX309-001G5V	\$345	PX319-001G5V	\$345	PX329-001G5V	\$370
0 to 0.14	0 to 2	PX309-002G5V	325	PX319-002G5V	325	PX329-002G5V	350
0 to 0.34	0 to 5	PX309-005G5V	300	PX319-005G5V	300	PX329-005G5V	325
0 to 1	0 to 15	PX309-015G5V	225	PX319-015G5V	225	PX329-015G5V	275
0 to 2.1	0 to 30	PX309-030G5V	225	PX319-030G5V	225	PX329-030G5V	275
0 to 3.4	0 to 50	PX309-050G5V	225	PX319-050G5V	225	PX329-050G5V	275
0 to 6.9	0 to 100	PX309-100G5V	225	PX319-100G5V	225	PX329-100G5V	275
0 to 10	0 to 150	PX309-150G5V	225	PX319-150G5V	225	PX329-150G5V	275
0 to 14	0 to 200	PX309-200G5V	225	PX319-200G5V	225	PX329-200G5V	275
0 to 21	0 to 300	PX309-300G5V	225	PX319-300G5V	225	PX329-300G5V	275
0 to 34	0 to 500	PX309-500G5V	225	PX319-500G5V	225	PX329-500G5V	275
0 to 69	0 to 1000	PX309-1KG5V	225	PX319-1KG5V	225	PX329-1KG5V	275
0 to 138	0 to 2000	PX309-2KG5V	225	PX319-2KG5V	225	PX329-2KG5V	275
0 to 207	0 to 3000	PX309-3KG5V	225	PX319-3KG5V	225	PX329-3KG5V	275
0 to 345	0 to 5000	PX309-5KG5V	225	PX319-5KG5T	225	PX329-5KG5V	275
0 to 517	0 to 7500	PX309-7.5KG5V	225	PX319-7.5KG5V	225	PX329-7.5KG5V	275
0 to 690	0 to 10,000	PX309-10KG5V	225	PX319-10KG5V	225	PX329-10KG5V	275

## ACCESSORIES

MODEL NO.	PRICE	DESCRIPTION
-NIST	\$75.00	5-point NIST-traceable calibration (must be ordered as a suffix with new transducer)
CAL-3	150.00	Recalibration: 5-point NIST traceable
PT06V-10-6S	26.50	Mating twist-lock connector for PX329
CA-39-4PC22-5	90.00	Mating twist-lock connector with 1.5 m (5') cable for PX329
CX5302	15.00	Extra mating mini DIN connector for PX319
ES-2272	190.00	Reference Book: Handbook of Heating, Ventilation, and Air Conditioning

Comes with certificate of conformance to specifications.

**Ordering Examples:** PX309-100G5V, 100 psi gage pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and 1 m cable termination, \$225.

PX319-015A5V, 15 psi absolute pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and mini DIN termination, \$300. PX329-3KG5V, 3000 psi gage pressure transducer with 0 to 5 Vdc output and twist-lock termination, \$275. Mating connector sold separately; order PT06V-10-6S, \$26.50.

# omega.co.uk<sup>®</sup>

Your One-Stop Source for Process Measurement and Control!

Freephone 0800 488 488 | International +44(0) 161 777 6622 | Fax +44(0) 161 777 6622 | Sales@omega.co.uk

[www.omega.co.uk](http://www.omega.co.uk)



#### UNITED STATES

[www.omega.com](http://www.omega.com)

1-800-TC-OMEGA  
Stamford, CT.

#### CANADA

[www.omega.ca](http://www.omega.ca)

Laval(Quebec)  
1-800-TC-OMEGA

#### GERMANY

[www.omega.de](http://www.omega.de)

Deckenfronn, Germany  
0800-8266342

#### UNITED KINGDOM

[www.omega.co.uk](http://www.omega.co.uk)

Manchester, England  
0800-488-488  
+44-(0)161-777-6611

#### FRANCE

[www.omega.fr](http://www.omega.fr)

0800-466-342

#### BENELUX

[www.omega.nl](http://www.omega.nl)

0800-099-33-44



## More than 100,000 Products Available!

### • Temperature

Calibrators, Connectors, General Test and Measurement Instruments, Handheld Instruments for Temperature Measurement, Ice Point References, Indicating Labels, Crayons, Cements and Lacquers, Infrared Temperature Measurement Instruments, Recorders, Relative Humidity Measurement Instruments, PT100 Probes, PT100 Elements, Temperature & Process Meters, Timers and Counters, Temperature and Process Controllers and Power Switching Devices, Thermistor Elements, Probes and Assemblies, Thermocouples, Thermowells and Head and Well Assemblies, Transmitters, Thermocouple Wire, RTD Probes

### • Flow and Level

Air Velocity Indicators, Doppler Flowmeters, Level Measurement, Magnetic Flowmeters, Mass Flowmeters, Pitot Tubes, Pumps, Rotameters, Turbine and Paddle Wheel Flowmeters, Ultrasonic Flowmeters, Valves, Variable Area Flowmeters, Vortex Shedding Flowmeters

### • pH and Conductivity

Conductivity Instrumentation, Dissolved Oxygen Instrumentation, Environmental Instrumentation, pH Electrodes and Instruments, Water and Soil Analysis Instrumentation

### • Data Acquisition

Communication Products and Converters, Data Acquisition and Analysis Software, Data Loggers Plug-in Cards, Signal Conditioners, USB, RS232, RS485, Ethernet and Parallel Port Data Acquisition Systems, Wireless Transmitters and Receivers

### • Pressure, Strain and Force

Displacement Transducers, Dynamic Measurement Force Sensors, Instrumentation for Pressure and Strain Measurements, Load Cells, Pressure Gauges, Pressure Reference Section, Pressure Switches, Pressure Transducers, Proximity Transducers, Regulators, Pressure Transmitters, Strain Gauges, Torque Transducers, Valves

### • Heaters

Band Heaters, Cartridge Heaters, Circulation Heaters, Comfort Heaters, Controllers, Meters and Switching Devices, Flexible Heaters, General Test and Measurement Instruments, Heater Hook-up Wire, Heating Cable Systems, Immersion Heaters, Process Air and Duct, Heaters, Radiant Heaters, Strip Heaters, Tubular Heaters

- **Cotizaciones para el ensayo de fracturamiento hidráulico en una máquina triaxial en roca**

## Hydraulic Fracturing Tester (HFT-70)



- Perform hydraulic fracture, well bore stability, and rock permeability tests
- 70 MPa cell and fracture pressure capacity
- Hydraulic balance for hydrostatic stress state, can also be used to apply deviatoric stresses for anisotropic stress state with up to 140 MPa vertical stress on NX diameter specimen
- 32 electrical feed-through lines
- 7 fluid ports (5 specimen, 2 cell)
- Lift mechanism to facilitate specimen setup
- Systems built to customer specifications

### DESCRIPTION

The GCTS Hydraulic Fracture Tester allows for the performance of fracture tests with HPVC pressure intensifier. This fixture is typically used for hydraulic fracture, well bore stability, and permeability tests. Tests can be performed with or without confining pressure.

The HFT triaxial cell comes with a hydraulic balance for application of hydrostatic stress state, but it can also be used for applying deviatoric stresses for anisotropic stress state with up to 140 MPa vertical stress on NX diameter specimens. A loading frame can be used to induce larger axial loads. The cell has 4 pore fluid ports plus a hydraulic fracturing fluid port, in addition to 2 confining fluid ports.

Typically fracturing pressure is ramped up at a constant rate while radial strain is measured during the fracturing test to determine the fracturing stress. The system can also be upgrade with temperature control option for up to 200 °C (332 °F).



6103 S Maple Av.  
Tempe, AZ 85283  
USA

Ph.: 480-456-0110  
Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
www.gcts.com

Date	EST. Completion
6/12/2013	24 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
1	HFT-70	HFT-70 GCTS Hydraulic Fracture Tester allows for the performance of fracture tests with HPVC pressure intensifier.	1	117,590.00	117,590.00
1.1	HTRX-070-HFL	HTRX-070-HFL HIGH PRESSURE TRIAXIAL CELL * 70 MPa (10,000 psi) confining pressure capacity. * 1,000 kN axial load capacity. * Stainless steel construction triaxial cell. * Low-friction spring loaded graphite seals. * Accepts samples with a diameter from 25 mm to 100 mm and with a length of 2 times the diameter. * Supplied with 32 electrical feed-through lines for in-vessel instrumentation. * 7 fluid pressure connectors: Cell, Pore Bottom fluid ports, Pore Top fluid port, Drain, and Bleed ports. * 175 mm inside diameter. * 560 mm total height with a 200 mm sample length. * 350 mm base diameter. * Accepts axial and circumferential measurement device. * Includes loading piston with spherical seating and one set of spare seals.	1		
1.2	HTRX-070-BAL	HTRX-70-BAL HYDRAULIC BALANCE FOR HIGH PRESSURE TRIAXIAL CELL Hydraulic balance for HTRX-70 triaxial cell. Includes the following: *HTRX-BAL Hydraulic balance made of hardened, heat treated stainless steel with Low-friction spring loaded graphite seals and 45 mm stroke. *70 MPa (10,000 psi) confining pressure capacity. *1,000 kN axial load capacity. NOTE: Increases the total cell height by 100 mm (4 inch)	1		
1.3	FRM-HFT-70	FRM-HFT-70 Frame with heavy duty metal base table and lift for triaxial cell assembly.	1		
1.4	HTRX-ACC-76	HTRX-ACC-76 PLATENS FOR 3 inch DIAMETER * 1 Top platen for 3 inch diameter specimens with pore pressure port and spherical loading seat. Made of hardened stainless steel (RC 58+). * 1 Bottom platen for 3 inch diameter specimens with pore pressure port. Made of hardened stainless steel (RC 58+). * 7.5 m of Heat Shrink Tubing for 3 inch Diameter Specimens. * Set of O-rings for sealing jacket to platens for 3 inch specimens.	1		
1.4	HTRX-HF-76-S	HTRX-HF-76-S Hydraulic fracturing platens for 76.2 (3 inch) diameter specimens. Includes specimen isolation. Requires standard 3 inch loading platen.	1		

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.



# PRICE LIST

6103 S Maple Av.  
Tempe, AZ 85283  
USA

Ph.: 480-456-0110  
Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
www.gcts.com

Date	EST. Completion
6/12/2013	24 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
1.5	HPVC-70P	<p>HPVC-70P Complete pressure &amp; volume control for pore fluid. Computer servo-controlled intensifier includes hydraulic servo valve. Pressure transducer with 0.005 MPa resolution, and volume change transducer with 0.01 cc resolution for direct measurement of pressure and volume.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 70 MPa service pressure.</li> <li>* 500 cc volume capacity.</li> <li>* 3.8 LPM two-stage servo valve.</li> <li>* 70 MPa Pressure transducer with 0.25% minimum accuracy.</li> <li>* 500 cc volume transducer with 0.25% minimum accuracy.</li> <li>* Fluid reservoir with pressure/vacuum/vent port for filling and draining triaxial cell. 19 liter (5 gallon) capacity.</li> <li>* Venturi vacuum pump, vacuum gage and regulator for applying low vacuum to fill reservoir</li> <li>* All necessary plumbing and high pressure valves for performing triaxial and permeability tests.</li> <li>* Metal cabinet mounted on casters to house the confining pressure / volume servo controlled intensifier, fluid reservoir, and panel.</li> <li>** Requires 700 kPa (100 psi) air pressure supply.</li> </ul>	1		
1.6	SCON-1500	<p>SCON-1500 DIGITAL SERVO CONTROLLER AND ACQUISITION SYSTEM</p> <p>Microprocessor based digital servo controller, function generator, data acquisition, and digital I/O unit. Advanced servo control from any system sensor with "on-the-fly bump-less" transfer switching between any connected transducer or calculated input. Can be configured to read up to 8 transducers or inputs and control up to 4 outputs.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 850 MHz micro-processor with 64 MB RAM and 128 MB solid state disk.</li> <li>- 6 kHz maximum loop rate (100 kHz conversion rate between channels).</li> <li>- 16-bit resolution.</li> <li>- Readout for controller internal temperature, pump oil temperature, pump oil level, external temperature.</li> <li>- 4 digital inputs and 4 digital outputs</li> <li>- Watchdog timer to detect control program status for automatic interlock shutdown.</li> <li>- TCP/IP and RS-232 Communications.</li> <li>- SIGNAL CONDITIONING mother board with 8 Universal signal conditioning module slots. Accepts up to 8 DSB-111 boards or 8 DSB-113 boards, or any combination of DSB-111 and DSB-113 output boards.</li> <li>- OUTPUT mother board with 4 output module slots. Accepts up to 4 DSB-12X series boards in any combination of DSB-121, DSB-122, DSB-123, and DSB-124 output boards.</li> </ul> <p>Power: 90-260 VAC / 50-60 Hz, 3.5 Amps max.</p>	1		

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.

6103 S Maple Av. Ph.: 480-456-0110  
 Tempe, AZ 85283 Fax: 480-456-4727  
 USA

sales@gcts.com  
 www.gcts.com

Date	EST. Completion
6/12/2013	24 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
1.7	DSB-111	DSB-111 UNIVERSAL SIGNAL CONDITIONING BOARD Universal signal conditioning module for load cells, LVDTs (AC and DC), pressure sensors, thermocouples, or other analog input signals. Each module includes digital (computer) controlled offset and gain. - 16-bit resolution. - Adjustable offset range: +/- 5 volts. - Adjustable gain range: 1 to 1000. - +/-5 volt DC excitation. - 5 Volt RMS @ 3 kHz AC excitation. - Anti-alias filter with 0-100 Hz flat response with less than 0.009 dB ripple and more than 60 dB attenuation at frequencies larger than 1,500 Hz.	2		
1.8	DSB-122	DSB-122 SERVO AMPLIFIER BOARD 16-bit resolution and 325 mA maximum output servo amplifier board to drive servo valves. Includes null, gain, dither amplitude, dither frequency, and current limit adjustments.	1		
1.9	CBL-SET1	CBL-SET1 Complete set of cables for SCON controller and sensors.	1		
1.10	HPS-5-5	HPS-5-5: 19 LPM, 5 HP, 18 MPa variable volume constant pressure pump. 60 liter reservoir (oil not included), oil temperature indicator, pressure and return filters, pressure gage, valves, thermal and low fluid level shut off protection, heat exchanger, hydraulic hoses (10 m. long), accumulator, filler strainer, drain port and motor starter. Includes computer low/high/off remote controls and oil temperature and level sensors for computer diagnostics and interlocks. Voltage: 208, 230, 380 or 460 V / 50 or 60 Hz / 3 phase (please specify electrical power and hydraulic hoses length at time of ordering).	1		
1.11	Computer	IBM-PC compatible computer to control and execute the test automatically with the following specifications: Windows XP, Vista or 7 Operating System, Intel processor, 2 GB RAM, 500 GB Hard, Ethernet port, CD & DVD ROM drives, 20" SVGA flat panel monitor, and mouse.	1		
SUBTOTAL					117,590.00
Deformation Sensors					
2.1	ACC-310-DUAL-...	ACC-310-DUAL-HBAL LVDT holder for HTRX-70L triaxial cell. To measure axial deformation outside triaxial cell using two LVDTs positioned at 180 degrees from each other. Does not include LVDTs.	1	860.00	860.00
2.2	SR-DF-D375-100	SR-DF-D375-100 Spring return AC Deformation sensor ±2.5 mm with 0.5 microns repeatability. Includes AMP 205841-2 Connector.	2	690.00	1,380.00

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.

6103 S Maple Av.  
Tempe, AZ 85283  
USA

Ph.: 480-456-0110  
Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
www.gcts.com

Date	EST. Completion
6/12/2013	24 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
2.3	DSB-111	<p>DSB-111 UNIVERSAL SIGNAL CONDITIONING BOARD</p> <p>Universal signal conditioning module for load cells, LVDTs (AC and DC), pressure sensors, thermocouples, or other analog input signals. Each module includes digital (computer) controlled offset and gain.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 16-bit resolution.</li> <li>- Adjustable offset range: +/- 5 volts.</li> <li>- Adjustable gain range: 1 to 1000.</li> <li>- +/-5 volt DC excitation.</li> <li>- 5 Volt RMS @ 3 kHz AC excitation.</li> <li>- Anti-alias filter with 0-100 Hz flat response with less than 0.009 dB ripple and more than 60 dB attenuation at frequencies larger than 1,500 Hz.</li> </ul> <p>Confining Pressure Control</p>	2	912.00	1,824.00
3.1	HPC-070C	<p>HPC-070C Air operated hydraulic pressure pump, 70 MPa (10,000 psi) pressure capacity for confining or back (pore) pressure application to triaxial cell. Requires 700 kPa (100 psi) air pressure supply. Enclosed in a table-top metal cabinet and include pressure panel, 19-liter (5 gallon) fluid reservoir with pressure/vacuum/vent port and venturi vacuum pump for easy filling and draining pressure cell, sight level gage, pressure gauge, input and output pressure regulators, high pressure valves, and a 3-meter flexible hose.</p>	1	11,376.00	11,376.00
3.2	SR-PR-OM-700	<p>SR-PR-OM-700 Pressure Transducer 700 kPa range. 0.25% Linearity.</p>	1	456.00	456.00
3.3	DSB-111	<p>DSB-111 UNIVERSAL SIGNAL CONDITIONING BOARD</p> <p>Universal signal conditioning module for load cells, LVDTs (AC and DC), pressure sensors, thermocouples, or other analog input signals. Each module includes digital (computer) controlled offset and gain.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 16-bit resolution.</li> <li>- Adjustable offset range: +/- 5 volts.</li> <li>- Adjustable gain range: 1 to 1000.</li> <li>- +/-5 volt DC excitation.</li> <li>- 5 Volt RMS @ 3 kHz AC excitation.</li> <li>- Anti-alias filter with 0-100 Hz flat response with less than 0.009 dB ripple and more than 60 dB attenuation at frequencies larger than 1,500 Hz.</li> </ul>	1	912.00	912.00
4	HTRX-HTEMP70L	<p>Temperature Control</p> <p>HTRX-HTEMP70L Temperature control for heating HTRX-70L triaxial cell. Internal and external thermocouples to minimize temperature gradients and control overshoot within the test chamber. Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Heating system for HRTX Triaxial Cell to +150 °C.</li> <li>* External thermocouple with a 0 °C to +200 °C range.</li> <li>* Internal thermocouple with pressure port and 0 °C to +200 °C range.</li> <li>* HRTX-70L high temperature upgrade including seals and high pressure thermocouple port.</li> <li>* Insulation base plate and insulation blanket.</li> <li>* High temperature heat shrink (7.5m).</li> </ul> <p>Axial Stress Control</p>	1	11,760.00	11,760.00

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.



# PRICE LIST

6103 S Maple Av. Ph.: 480-456-0110  
 Tempe, AZ 85283 Fax: 480-456-4727  
 USA

sales@gcts.com  
 www.gcts.com

Date	EST. Completion
6/12/2013	24 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
5	HPC-070C	HPC-070C Air operated hydraulic pressure pump, 70 MPa (10,000 psi) pressure capacity for confining or back (pore) pressure application to triaxial cell. Requires 700 kPa (100 psi) air pressure supply. Enclosed in a table-top metal cabinet and include pressure panel, 19-liter (5 gallon) fluid reservoir with pressure/vacuum/vent port and venturi vacuum pump for easy filling and draining pressure cell, sight level gage, pressure gauge, input and output pressure regulators, high pressure valves, and a 3-meter flexible hose.	1	11,376.00	11,376.00
5.1	SR-PR-OM-70M	SR-PR-OM-70M Pressure Transducer 70 MPa range. 0.25% Linearity.	1	456.00	456.00
5.2	DSB-111	DSB-111 UNIVERSAL SIGNAL CONDITIONING BOARD Universal signal conditioning module for load cells, LVDTs (AC and DC), pressure sensors, thermocouples, or other analog input signals. Each module includes digital (computer) controlled offset and gain. - 16-bit resolution. - Adjustable offset range: +/- 5 volts. - Adjustable gain range: 1 to 1000. - +/-5 volt DC excitation. - 5 Volt RMS @ 3 kHz AC excitation. - Anti-alias filter with 0-100 Hz flat response with less than 0.009 dB ripple and more than 60 dB attenuation at frequencies larger than 1,500 Hz.		912.00	912.00
6	HPPD-20	Pule Permeability HPPD-20 FAST PULSE-DECAY PERMEABILITY TEST APPARATUS Includes two stainless steel large reservoirs with 2,000 cc volume each, two stainless steel small reservoirs with 500 cc volume each, five zero-volume-change ball valves and one made off compatible with many fluids and gases, including water and oil. 20 MPa pressure capacity. Mounted in an insulated metal cabinet with precise temperature control and front panel mounted valves and controls. The apparatus also includes all necessary valves and fluid lines to perform the Fast Pulse-Decay permeability test when used with any of GCTS triaxial systems.	1	34,300.00	34,300.00
6.1	DSB-111	DSB-111 UNIVERSAL SIGNAL CONDITIONING BOARD Universal signal conditioning module for load cells, LVDTs (AC and DC), pressure sensors, thermocouples, or other analog input signals. Each module includes digital (computer) controlled offset and gain. - 16-bit resolution. - Adjustable offset range: +/- 5 volts. - Adjustable gain range: 1 to 1000. - +/-5 volt DC excitation. - 5 Volt RMS @ 3 kHz AC excitation. - Anti-alias filter with 0-100 Hz flat response with less than 0.009 dB ripple and more than 60 dB attenuation at frequencies larger than 1,500 Hz.	2	912.00	1,824.00
6.2	CBL-111-SG-OM	CBL-111-SG-OM STRAIN GAGE sensor cable. For pressure transducers. 10 VDC excitation. 7 m. long. Includes memory chip to store sensor calibration information. AMP 205841-2 connector.	2	150.00	300.00
SUBTOTAL					77,736.00

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.



# PRICE LIST

6103 S Maple Av.  
Tempe, AZ 85283  
USA

Ph.: 480-456-0110  
Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
www.gcts.com

Date	EST. Completion
6/12/2013	24 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
	Wood Crating	Crates. The system will be packed in new strong wooden case(s) suitable for long distance freight transportation.	3	700.00	2,100.00
	Shipping & Handling	Shipping & Handling not included. Quoted Ex-Works.		0.00	0.00
	INST-3	INST-3 Installation & Training (three days) Installation assistance and training at customer facility. Includes air fare, lodging, food, etc. Price may vary for some destinations.		7,800.00	7,800.00
	100% PS	PAYMENT TERMS: 100% prior to shipping.			0.00
		SUBTOTAL			9,900.00
		TOTAL			205,226.00
	Warranty	<p><b>WARRANTY:</b> One (1) year parts and labor. This warranty does not apply to damage due to accident, improper use, negligence, or modification of any part of the testing system.</p> <p><b>TECHNICAL SUPPORT</b> GCTS will provide support for all aspects of the hardware and software by e-mail or by phone during GCTS's normal business hours (9 a.m. to 5 p.m. Arizona time), Monday through Friday, except for Arizona recognized holidays and will furnish at no charge to the customer upgrades of the computer software, if available, for a minimum period of one year from the time of purchase. Visits to customer facilities to provide re-training to customer staff or for routine equipment servicing are not covered</p> <p><b>DISCLAIMER:</b> Geotechnical Consulting &amp; Testing Systems, L.L.C. shall not be liable for any direct, indirect, consequential or incidental damages resulting from the use of this product.</p> <p>Reproduction and/or distribution of this quotation to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect for validity of the quotation and are subject to change without notice. GCTS has made every effort to ensure that prices and specifications are accurate; however GCTS is not responsible for any printing errors. This quotation is not valid if the intended equipment final destination is covered by any of GCTS exclusive representatives or where prohibited by U.S. laws and regulations.</p>			

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.

## Triaxial Rock Testing System (RTX-1000)



- 1,000 kN (225 kip) axial load and 70 MPa (10,000 psi) confining pressure capacity
- Direct closed-loop digital servo control of axial stress, axial strain, radial strain, and several other calculated triaxial variables
- GCTS High Pressure Triaxial cell with internal instrumentation to measure local axial & radial strains
- Ideal for performing unconfined compression, triaxial, bending, indirect tension, fracture, creep, post failure behavior, & other compression tests
- Available options: High stiffness loading frame, platens with ultrasonic transducers, high temperature control subsystem, and upgrades for axial loads up 4,500 kN and confining pressures up to 210 MPa.
- Economical "turn-key" systems built to customer specifications.

### DESCRIPTION

GCTS Triaxial Rock Testing Systems are manufactured according to your design specifications (load capacity and system stiffness, sample size, confining and pore pressures, internal instrumentation, temperature testing, and ultrasonic velocity measurements). The top cross head height can be

adjusted to accommodate a wide variety of test specimens and triaxial cells. The RTX-1000 meets the specifications of the International Society for Rock Mechanics (ISRM) for triaxial testing of rock samples.

The system is capable of performing static and dynamic closed-loop strain or stress controlled as well as post failure behavior tests. Included with this system is our true 32-bit Windows XP Software. It allows sending directly your test data to any computer connected to your local network. Our new software includes a database system to keep track of all the data generated at your lab with any of our testing systems. Using a Windows network system in your lab facilitates the transferring of your test data directly into other Windows programs such as Word or Excel for report generation as well as to easily backup your important test results

The Graphical User Interface with context-sensitive on-line help and intuitive color windows helps minimize learning time and enables laboratory personnel to conduct more complex, but realistic, testing programs at substantially lower operating cost and also with minimal operator error. The system manages all the instrumentation and continuously monitors sensor outputs to accurately account for uplift pressures acting on the loading piston, area changes, deformation and volume change sensors setup and re-positioning, etc.

### SPECIFICATIONS

Contact GCTS

6103 S Maple Av.  
Tempe, AZ 85283  
USA

Ph.: 480-456-0110  
Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
www.gcts.com

Date	Delivery
1/28/2011	EST. 22 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
1	RTX-1000	<p><b>RTX-1000 SERVO-CONTROLLED TRIAXIAL ROCK TESTING SYSTEM</b>            Compression testing machine with automatic load or deformation control and "bumpless" or smooth control transfer. 1,000 kN Axial Load Capacity with digital control and spherical head platen. 70 MPa Confining Pressure Capacity.            General Specifications:            1. Static and dynamic closed-loop operation. Capable of performing strain or stress controlled as well as post failure behavior tests.            2. Meets all the specifications of the International Society for Rock Mechanics for triaxial testing of rock samples.            3. 16-bit Resolution with 200 hertz anti-alias filter.            4. Advanced digital servo control from any system sensor with "on-the-fly bumpless" transfer.            5. Menu driven software for automated test control and report generation for triaxial and unconfined tests as well as user definable test procedures.            6. Watchdog timer to detect control program status for automatic interlock shutdown in case of computer power failure and remote emergency stop interlock.            7. Optional automatic hydraulic lift for triaxial cell and roller assembly for fast and easy specimen setup.</p>	1	173,095.00	173,095.00
1.1	FRM4-1000-100	<p><b>FRM4-1000-100 1,000 kN LOADING FRAME.</b> Four-column vertical standing assemble with threaded columns for crosshead adjustment. Includes the following specifications:            * 100 mm (4 inch) stroke.            * 1,000 kN (225 kips) Static compression load capacity (820 kN tension load capacity).            * 800 kN Dynamic load capacity.            * Cast iron rings.            * 20 Hertz maximum frequency.            * 350 mm/minute maximum velocity.            * 100 mm swivel platen with HRC 45 hardness.            * 750 kN/mm (4,300,000 lb/inch) stiffness.            * SR-DF-750-2000AC Deformation sensor 100 mm range.            * Manifold including on/high pressure control solenoid and accumulator to minimize pressure ripples.            * High-Frequency Two-Stage Electro-hydraulic servo valve rated to 19 l/min.            * 600 mm maximum clearance between platens.            * 410 mm clearance between columns.            * Mounted on heavy duty steel table.</p>	1		
1.2	SR-LC-CPC-1000	<p><b>SR-LC-CPC-1000 1,000 kN (225 kip) Column type compression load cell.</b> 0.25% precision.</p>	1		
1.3	HPS-10-5	<p><b>HPS-10-5: 19 LPM, 10 HP, 21 MPa variable volume constant pressure pump.</b> 150 liter reservoir (oil not included), oil temperature indicator, pressure and return filters, pressure gage, valves, thermal and low fluid level shut off protection, heat exchanger, hydraulic hoses (10 m. long), accumulator, filler strainer, drain port and motor starter. Includes computer low/high/off remote pressure controls and oil temperature, oil level, and filter sensors for computer diagnostics and interlocks. Voltage: 208, 230, 380 or 460 V / 50 or 60 Hz / 3 phase (please specify electrical power and hydraulic hoses length at time of ordering).</p>	1		

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.



# PRICE LIST

6103 S Maple Av.  
Tempe, AZ 85283  
USA

Ph.: 480-456-0110  
Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
www.gcts.com

Date	Delivery
1/28/2011	EST. 22 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
1.4	HTRX-070	<p>HTRX-70 HIGH PRESSURE TRIAXIAL CELL</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 70 MPa (10,000 psi) confining pressure capacity.</li> <li>* 1,000 kN axial load capacity.</li> <li>* Stainless steel construction triaxial cell.</li> <li>* Low-friction spring loaded graphite seals.</li> <li>* Accepts samples with a diameter from 25 mm to 65 mm and with a length of 2 times the diameter.</li> <li>* Supplied with 12 electrical feed-through lines for in-vessel instrumentation.</li> <li>* 5 fluid pressure connectors: Cell, Pore Bottom, Pore Top, Drain, and Bleed ports.</li> <li>* 125 mm inside diameter.</li> <li>* 495 mm total height with a 100 mm sample length.</li> <li>* 280 mm base diameter</li> <li>* Accepts axial and circumferential measurement device (maximum specimen diameter with GCTS DEF instrumentation is 54 mm).</li> <li>* Includes loading piston with spherical seating and one set of spare seals.</li> </ul>	1		
1.5	HTRX-ACC-NX	<p>HTRX-ACC-NX PLATENS FOR NX DIAMETER</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 1 Top platen for NX diameter specimens with pore pressure port and spherical loading seat. Made of hardened stainless steel (RC 58+).</li> <li>* 1 Bottom platen for NX diameter specimens with pore pressure port. Made of hardened stainless steel (RC 58+).</li> <li>* 7.5 m of Heat Shrink Tubing for NX Diameter Specimens.</li> <li>* Set of O-rings for sealing jacket to platens for NX specimens.</li> </ul>	1		
1.6	HPC-070C	<p>HPC-070C Air operated hydraulic pressure pump, 70 MPa (10,000 psi) pressure capacity for confining or back (pore) pressure application to triaxial cell. Requires 700 kPa (100 psi) air pressure supply. Enclosed in a table-top metal cabinet and include pressure panel, 19-liter (5 gallon) fluid reservoir with pressure/vacuum/ vent port and venturi vacuum pump for easy filling and draining pressure cell, sight level gage, pressure gauge, input and output pressure regulators, high pressure valves, and a 3-meter flexible hose.</p>	1		
1.7	SR-PR-OM-70M	<p>SR-PR-OM-70M Pressure Transducer 70 MPa range. 0.25% Linearity.</p>	1		
1.8	DEF-R5100-A	<p>DEF-R5100-A AXIAL &amp; CIRCUMFERENTIAL MEASUREMENT DEVICE FOR HIGH PRESSURE TRIAXIAL CELL (35 TO 54 MM DIAMETER SPECIMENS). For the measurement of axial and radial strains inside the triaxial cell at pressures up to 170 MPa. To be used inside non-conductive media.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* (1) Set of upper and lower LVDT holder rings for two deformation sensors positioned at 180 degrees to measure average axial strain. Accommodates specimens with a diameter from 35 mm to 54 mm.</li> <li>* (1) Circumferential roller assembly and LVDT holder to measure arc changes. Accommodates specimens with initial diameter from 35 mm to 54 mm (35 mm specimens cannot accommodate axial deformation rings within the specimen)</li> <li>* (3) LVDT's with +/- 2.5 mm range.</li> <li>** Minimum axial gauge length 70 mm.</li> </ul>	1		

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.



# PRICE LIST

6103 S Maple Av. Ph.: 480-456-0110  
 Tempe, AZ 85283 Fax: 480-456-4727  
 USA

sales@gcts.com  
 www.gcts.com

Date	Delivery
1/28/2011	EST. 22 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
1.9	SCON-1500	<p>SCON-1500 DIGITAL SERVO CONTROLLER AND ACQUISITION SYSTEM            Microprocessor based digital servo controller, function generator, data acquisition, and digital I/O unit. Advanced servo control from any system sensor with "on-the-fly bump-less" transfer switching between any connected transducer or calculated input. Can be configured to read up to 8 transducers or inputs and control up to 4 outputs.            - 850 MHz micro-processor with 64 MB RAM and 128 MB solid state disk.            - 6 kHz maximum loop rate (100 kHz conversion rate between channels).            - 16-bit resolution.            - Readout for controller internal temperature, pump oil temperature, pump oil level, external temperature.            - 4 digital inputs and 4 digital outputs            - Watchdog timer to detect control program status for automatic interlock shutdown.            - TCP/IP and RS-232 Communications.            - SIGNAL CONDITIONING mother board with 8 Universal signal conditioning module slots. Accepts up to 8 DSB-111 boards or 8 DSB-113 boards, or any combination of DSB-111 and DSB-113 output boards.            - OUTPUT mother board with 4 output module slots. Accepts up to 4 DSB-12X series boards in any combination of DSB-121, DSB-122, DSB-123, and DSB-124 output boards.            Power: 90-260 VAC / 50-60 Hz, 3.5 Amps max.</p>	1		
1.10	DSB-111	<p>DSB-111 UNIVERSAL SIGNAL CONDITIONING BOARD            Universal signal conditioning module for load cells, LVDTs (AC and DC), pressure sensors, thermocouples, or other analog input signals. Each module includes digital (computer) controlled offset and gain.            - 16-bit resolution.            - Adjustable offset range: +/- 5 volts.            - Adjustable gain range: 1 to 1000.            - +/-5 volt DC excitation.            - 5 Volt RMS @ 3 kHz AC excitation.            - Anti-alias filter with 0-100 Hz flat response with less than 0.009 dB ripple and more than 60 dB attenuation at frequencies larger than 1,500 Hz.</p>	6		
1.11	DSB-122	<p>DSB-122 SERVO AMPLIFIER BOARD            16-bit resolution and 325 mA maximum output servo amplifier board to drive servo valves. Includes null, gain, dither amplitude, dither frequency, and current limit adjustments.</p>	1		
1.12	CBL-111-AC-LV	CBL-111-AC AC sensor cable. For LVDT and other AC sensors. 5 VAC excitation. 7 m. long. Includes memory chip to store sensor calibration information. AMP 205838-1 Plug connector	4		
1.13	CBL-111-SG-TV	CBL-111-SG-TV STRAIN GAGE sensor cable. For load cells. 10 VDC excitation. 7 m. long. Includes memory chip to store sensor calibration information. PT06A-10-6S connector.	1		
1.14	CBL-111-SG-OM	CBL-111-SG-OM STRAIN GAGE sensor cable. For pressure transducers. 10 VDC excitation. 7 m. long. Includes memory chip to store sensor calibration information. AMP 205841-2 connector.	1		
1.15	CBL-122-S	CBL-122-S Servo Valve cable. 7 m. long. 97-3106A-14S-2S connector.	1		
1.16	CBL-2501-SOL	CBL-2501-SOL Solenoid cable. 7 m. long. DIN 43650 connector	1		
1.17	CBL-2701-M	CBL-2701-M Hydraulic Pump Cable. 10 m. long. AMP 206037-1 Connector	1		

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.



# PRICE LIST

6103 S Maple Av.  
 Tempe, AZ 85283  
 USA

Ph.: 480-456-0110  
 Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
 www.gcts.com

Date	Delivery
1/28/2011	EST. 22 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
1.18	CBL-2702-ESTOP	CBL-2702-ESTOP Remote Emergency Stop Switch and Cable. 7 m. long.	1		
1.19	WIN-CATS-ADV	WIN-CATS-ADV 32-bit Windows XP/Vista software for advanced digital servo control from any system sensor or calculated channel with "on-the-fly" bump-less transfer. Includes calculated channels for stress, strain, etc. and user defined equations. Also includes Universal software to easily create cyclic and static customized test procedures. Capabilities: - Third degree polynomial conversions from sensor output in real time. - Ability to define user defined inputs as a function of other inputs and correct by another input via a third degree polynomial to view or control in real time. - Configurable unit library to automatically perform unit conversions. - Linear, log, and semi-log plotting capability with user specified plot parameters. - Unlimited user configurable view tools (meters, gages, bars, etc.) - Signal analysis option that will give FFT of any system signal. - Advanced PID control with adaptive control. - Peak/Valley compensation on system control. - Stabilization by any associated input in control, not only the feedback control sensor. - User defined procedures with up to 100 stages. - Timed, Level Crossing, and Peak/Valley data acquisition modes. - Independent and simultaneous synchronized control of up to 16 channels of digital servo control (Close or Open loop). - Automatic "smooth or bump-less" control transfer from/to any sensor or calculated channel. - Automated test procedures. - Waveform library including Ramp, Ramp + Dwell, Sine, Haversine, Triangular, Square, Random, and User Defined. - Frequency and amplitude sweeping. - Allows creation of an unlimited variety of waveforms including user-generated profiles such as a digitized earthquake record. **NOTE: Requires a Windows XP or Windows 7 computer (Professional version recommended)	1		
1.20	WIN-TRX-ROCK	WIN-TRX-ROCK Triaxial test module to automatically perform conventional triaxial static tests as well as other advanced tests such as Stress-Path, Ko-loading, etc. Includes procedures for servo controlling the radial strain rate for post failure behavior tests.	1		
1.21	Export Crating	Export Crating. The system will be packed in new strong wooden case(s) or in carton(s), suitable for long distance freight transportation as required by destination country.	7		
		SUBTOTAL			173,095.00
		OPTIONS			

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.



# PRICE LIST

6103 S Maple Av.  
Tempe, AZ 85283  
USA

Ph.: 480-456-0110  
Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
www.gcts.com

Date	Delivery
1/28/2011	EST. 22 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
2	Computer	IBM-PC compatible computer to control and execute the test automatically with the following specifications: Windows XP, Vista or 7 Operating System, Intel processor, 2 GB RAM, 500 GB Hard, Ethernet port, CD & DVD ROM drives, 20" SVGA flat panel monitor, and mouse.	1	1,500.00	1,500.00
3	HPVC-70C	HPVC-70C CELL PRESSURE/VOLUME SERVO CONTROLLED INTENSIFIER. Complete pressure & volume control for cell confining fluid. Computer servo-controlled intensifier includes hydraulic servo valve. Pressure transducer with 0.005 MPa resolution, and volume change transducer with 0.01 cc resolution for direct measurement of pressure and volume. * 70 MPa service pressure. * 500 cc volume capacity. * 10 LPM two-stage servo valve. * 70 MPa Pressure transducer with 0.25% minimum accuracy. * 500 cc volume transducer with 0.25% minimum accuracy. * Pressure panel with high pressure valves, gages and controls. * Pressure test gauge with ( $\pm 0.25\%$ accuracy). * Fluid reservoir with pressure/vacuum/vent port for filling and draining triaxial cell. 19 liter (5 gallon) capacity. * Venturi vacuum pump, vacuum gage and regulator for applying low vacuum to fill reservoir * All necessary plumbing and high pressure valves for filling, pressurizing, and draining triaxial cell. * Metal cabinet mounted on casters to house the confining pressure / volume servo controlled intensifier, fluid reservoir, and panel. ** Requires 700 kPa (100 psi) air pressure supply.	1	26,310.00	26,310.00
4	MHTRX-1.2HT	MHTRX-1.2HT. 1.2 inch heat shrink tubing. Fits 25 mm to 30 mm diameters. 7 meter roll. High Temperature to 200 C	1	1,158.00	1,158.00
5	RTRX-HTEMP	RTRX-HTEMP Temperature control for heating RTR systeml. Internal and external thermocouples to minimize temperature gradients and control overshoot within the test chamber. Includes: * Heating System for RTRX-140 Triaxial Cell to +150 °C. * (2) Thermocouple with a 0 °C to +150 °C range. * (2) DSB-111 Universal Signal Conditioning Modules for thermocouples. * RTRX High Temperature Upgrade including Thermocouple port mounted through triaxial cell wall and seal upgrade for 150 C service. * DEF-R5000 series upgrade for 150 C service. * Internal Load cell upgrade for 150 C service	1	13,440.00	13,440.00
6	INST-3	INST-3 Installation & Training (three days) Installation assistance and training at customer facility. Includes air fare, lodging, food, etc. Price may vary for some destinations.	1	7,800.00	7,800.00

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.



# PRICE LIST

6103 S Maple Av.  
 Tempe, AZ 85283  
 USA

Ph.: 480-456-0110  
 Fax: 480-456-4727

sales@gcts.com  
 www.gcts.com

Date	Delivery
1/28/2011	EST. 22 Weeks ARO

#	Item	Description	Qty	Price	Total
	Warranty	<p><b>WARRANTY:</b>            One (1) year parts and labor. This warranty does not apply to damage due to accident, improper use, negligence, or modification of any part of the testing system.</p> <p><b>TECHNICAL SUPPORT</b>            GCTS will provide support for all aspects of the hardware and software by phone during GCTS's normal business hours (9 a.m. to 5 p.m. Arizona time), Monday through Friday, except for Arizona recognized holidays. GCTS will furnish at no charge to the customer upgrades of the computer software, if available, for a minimum period of one year from the time of purchase. Visits to customer facilities to provide re-training to customer staff or for routine equipment servicing are not covered</p> <p><b>DISCLAIMER:</b>            Geotechnical Consulting &amp; Testing Systems, L.L.C. shall not be liable for any direct, indirect, consequential or incidental damages resulting from the use of this product.</p> <p>Reproduction and/or distribution of this quotation to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect for validity of the quotation and are subject to change without notice. GCTS has made every effort to ensure that prices and specifications are accurate; however GCTS is not responsible for any printing errors. This quotation is not valid if the intended equipment final destination is covered by any of GCTS exclusive representatives or where prohibited by U.S. laws and regulations.</p>			

Reproduction and/or distribution of this price list to third parties is forbidden without prior written permission from GCTS. The prices listed are those in effect at the time of publication and are subject to change without notice. Actual delivery time may vary depending upon current workload. We will be pleased to furnish you with quotations upon request. GCTS has made every effort to ensure that prices are accurate, however GCTS is not responsible for any printing errors. All prices shown are Ex-Works factory in Tempe Arizona. Prices does not include shipping, insurance, export documentation or customs. By placing an order with GCTS, customer accepts the GCTS Standard Terms and Conditions posted in our web site at <http://www.gcts.com/terms.pdf>.