

**ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE MICROFRACTURA DE LA ROCA A  
PARTIR DE ONDAS DE CORTE Y DE COMPRESIÓN**

**LUIS ARTURO GÓMEZ LUNA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

**ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE MICROFRACTURA DE LA ROCA A  
PARTIR DE ONDAS DE CORTE Y DE COMPRESIÓN**

**LUIS ARTURO GÓMEZ LUNA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**DIRECTORA**

**M.sc. HEBENLY CELIS LEGUIZAMO**

**CO-DIRECTORES**

**M.sc. JENNY MABEL CARVAJAL JIMENEZ**

**Ing. LUIS FERNANDO RAMIREZ SILVA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

Si en mi más remoto pensamiento dudaba de la existencia de Dios, esta investigación permitió acabar con esa remota duda. Gracias Dios, Padre celestial porque siempre has estado conmigo, lo estás y lo estarás.

A mi Padre Teodoro (QEPD), más que un padre fuiste mi amigo, me enseñaste a vivir la vida con los muchos consejos y enseñanzas que hoy recuerdo y guardo en mi corazón como un gran tesoro, sé que no los encontraré ni en las mejores universidades, ni en los doctorados que logré hacer en mi vida.

A mi Madre Dalcy, al igual que Dios y mi padre, te debo la vida. Gracias por ser mi primera gran profesora, por interceder por mí en oraciones y por terminar siendo padre y madre en el final de mi carrera.

A mis hermanos, Johanna y Santiago, sé que me hacían “barra” para que todo me saliera bien desde el primer momento que salí de mi casa a emprender mi sueño profesional. Los amo.

A mi profesora de primaria Luz Mira Barraza (QEPD) por ser de esas profesoras que sé que ya no vuelven, enseñaba con amor y dedicación permitiéndome tenerle amor al estudio.

A mis amigos Steve Narváez, más que un amigo, también mi hermano, Juan David Quiñones, “Tumaco”, su prometida Mileidy Acosta, al chico Hot Fernando Pava por ser mi compañero de investigación y de batalla, a Gonzalo Pabón y todos aquellos testigos del esfuerzo de este gran logro de mi vida.

A la familia Velásquez Jaimes, gracias por dejarme ser parte de su familia, apoyarme en los momentos más difíciles y compartir las alegrías de sus triunfos y este caso, les comparto el mío.

A Erika, por llegar en el momento más indicado de mi vida y testigo fiel de los “detrás de cámaras” de esta investigación, te convertiste en mi gran compañera de tesis. Tienes derecho a tener doble titulación!

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander por ser el alma mater que me permitió adquirir los conocimientos y formarme como un profesional integral para la sociedad.

A todos los profesores de mi carrera, en especial, aquellos en los que me enseñaron más allá de lo convencional y pude formar grandes amistades.

A mi directora M.Sc Hebenly Celis por depositar su confianza en el emprendimiento de este trabajo e instruirme en el proceso investigativo.

A mi codirectora M.Sc Jenny Mabel Carvajal por ser la promotora de esta investigación, señalarme desde el inicio la orientación de la técnica creada y permitir exigirme al máximo para conseguir los logros alcanzados.

A mi codirector Ing. Luis Fernando Ramírez por guiarme y acompañarme en todo el proceso de la investigación, por compartir sus conocimientos desinteresadamente y convertirse más que un compañero de tesis, un amigo que me ayudo en muchos momentos donde necesitaba corregir errores y volver a iniciar.

Al futuro Geólogo Yesid Goyes, por su gran ayuda en enseñarme la programación en Matlab® y acompañamiento en la visualización de las imágenes tomográficas.

Al Grupo de Investigación Estabilidad de Pozo por permitirme ser parte de unos de los mejores grupos de investigación de la UIS, por enseñarme conceptos importantísimos de la Geomecánica y fortalecer relaciones interpersonales con profesionales como la Dra. Zuly Calderón, Ing. Reynel Corzo, Ing. Yair Quintero, Ing. Alexander Martínez que siempre estuvieron atentos al proceso investigativo con sugerencias y críticas constructivas. También a los compañeros de investigación los cuales tuve apoyo en todo momento.

Al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), en especial a todo el grupo de profesionales del Laboratorio Mecánica de Rocas por dejarme ser parte de ellos, ayudarme a ser un profesional con visión interdisciplinaria y entender que ante todo el buen trato humano es muy importante.

Finalmente, a la Escuela de Geología y E3T por el préstamo de herramientas valiosas que me ayudaron a desarrollar la técnica creada.

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN	23
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
1.1 TEORÍA Y ESTADO DEL ARTE DE FRACTURAS Y MICROFRACTURAS	27
1.1.1 Definición de fractura	27
1.1.2 Clasificación genérica o de laboratorio de las fracturas	28
1.1.2.1 Fracturas de Extensión Modo I	29
1.1.2.2 Fracturas de Cizalla Modo II y Modo III	29
1.1.2.3 Fracturas de Tensión	30
1.1.3 Modelos de fracturas	30
1.1.4 Escalas de fracturas	32
1.1.5 Definición de microfracturas	33
1.1.6 Factores de formación de las microfracturas: mecanismos de deformación en las rocas	36
1.1.6.1 Cataclasis - Fracturamiento frágil	37
1.1.6.2 Otros Factores	40
1.1.7 Tipos de microfracturas y características: aplicación Campo Kuqa Furelan, China	41
1.1.7.1. Categoría I: Microfracturas Intragranulares	42
1.1.7.2. Categoría II: Microfracturas de borde de grano	43
1.1.7.3 Categoría III: Microfracturas Transgranulares	44
1.1.8. Origen De Las Microfracturas	46
1.1.8.1. Origen Tectónico	46
1.1.8.2. Origen de Sobrepressiones	47
1.1.8.3. Origen Diagenético	47

1.2. PROPAGACIÓN DE ONDAS P Y ONDAS S EN MEDIOS ELASTICOS	48
1.2.1. Características De Una Onda Acústica	49
1.2.1.1 Período.	50
1.2.1.2 Frecuencia	50
1.2.1.3 Amplitud	50
1.2.1.4 Longitud de Onda	50
1.2.1.5 Velocidad de Onda	51
1.2.2 Ondas De Compresión (Ondas P).	51
1.2.3 Ondas De Corte (Ondas S).	52
1.3 APLICACIÓN FÍSICA DE LA TOMOGRAFÍA	55
1.3.1 Definición De Tomografía	55
1.3.1.1 Historia de la Tomografía	55
1.3.2 Tomografía Acústica.	56
2. INSTRUMENTACIÓN GENERAL PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS	58
2.1 CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS (PZT)	59
2.1.1 Efecto Piezoeléctrico.	60
2.1.2 Materiales Piezoeléctricos.	60
2.1.3 Características De Los Cristales Piezoeléctricos.	61
2.1.3.1 Clase de cristal	61
2.1.3.2 Diámetro del cristal	61
2.1.3.3 Frecuencia	62
2.1.4 Especificaciones De Los Cristales Piezoeléctricos Para La Detección De Microfracturas.	62
2.1.4.1 Longitud de Onda	63
2.1.4.2 Velocidad de Onda.	64
2.1.4.3 Frecuencia	65
2.2 GENERADOR DE PULSOS	68
2.3 OSCILOSCOPIO ELECTRÓNICO	68

2.4 PROPUESTA DEL DISPOSITIVO DE BARRIDO DE SEÑALES EN LA ROCA (DBSR)	69
2.4.1 Bosquejo General Del DBSR.	69
2.4.1.1 Portatornillos de los PZT.	72
3. MUESTRAS	75
3.1 MUESTREO	76
3.2 SALIDA 1: ESTACIÓN 1, VÍA SAMACÁ - PUENTE DE BOYACÁ (BOYACÁ)	77
3.2.1 Extracción Arenisca, Estación 1	78
3.3 SALIDA 1: ESTACIÓN 2, VÍA VILLA DE LEYVA - SAMACÁ (BOYACÁ)	78
3.3.1 Extracción Caliza, Estación 2.	79
3.4 SALIDA 2: ESTACIÓN 1, VÍA LEBRIJA – LA RENTA (SANTANDER)	80
3.5 SALIDA 2: ESTACIÓN 2, QUEBRADA LA SORDA (SANTANDER)	83
3.5.1 Extracción Caliza, Estación 2.	83
3.6 PLUGS SINTÉTICOS: CEMENTOS	85
3.6.1 Preparación De La Lechada.	85
3.6.2 Generación De Inclusiones.	86
3.6.3 Modelos Controlados	88
3.7 PREPARACIÓN DE MUESTRAS	90
3.7.1 Extracción De Plugs.	91
3.7.2 Perfilaje Lateral De Plugs.	92
3.7.3 Pulido De Perfilaje Y Cilindricidad	93
3.8 MUESTRAS TERMINADAS	95
4. APLICACIÓN DEL SOFTWARE MATLAB® EN LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ACÚSTICA 3.5 D	97
4.1 DEFINICIÓN DE LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ACÚSTICA 3.5 D PARA LA VISUALIZACIÓN VIRTUAL DE LAS MUESTRAS	98
4.2 SOFTWARE MATLAB®	100

4.2.1 Estructura de Matrices en Matlab®.	100
4.3 METODOLOGÍA ROCA VIRTUAL 3.5 D	102
4.4 ESTADO DEL ARTE: METODOLOGÍA TOMOGRAFÍA ACÚSTICA LABORATORIO MECÁNICA DE ROCAS (LMR). INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO (ICP) – ECOPEPETROL S.A.	109
4.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA TÉCNICA TOMOGRAFÍA ACÚSTICA 3.5 D: ENSAYOS ACÚSTICOS DEL LMR	114
4.5.1 Tomografía Acústica 2.5 D En Geometría Cuadrada.	116
4.5.2 Tomografía Acústica 3.5 D En Geometría Cuboide	118
4.5.3 Tomografía Acústica 3.5 D En Geometría Cilindrica	121
4.6. GENERACIÓN DE MICROFRACTURAS SINTÉTICAS EN LOS MODELOS CILÍNDRICOS 3.5 D	124
4.7. ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE MICROFRACTURAS A PARTIR DE LOS MODELOS MICROFRACTURADOS CILINDRICOS 3.5 D	127
5. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ACÚSTICA EN MUESTRAS REALES	131
5.1 MUESTRAS SELECCIONADAS	132
5.2 ABRAZADERA DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS	133
5.2.1 Especificaciones De La Abrazadera De Señales De Adquisición Acústica	134
5.2.2 Calibración De Los PZT.	135
5.2.3 Adhesión De Los Pzt En La Abrazadera	137
5.3 MONTAJE DE LA INSTRUMENTACIÓN GENERAL PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS	140
5.4 MEJORAMIENTO DE LAS SEÑALES ACÚSTICAS	141
5.4.1 Ajustamiento Con Caimán Electrónico	141
5.4.2 Ajustamiento Con La Pinza De Muselina Y Grasa De Vacío	143
5.5 PLANTILLA DE EXCEL PARA EL CALCULO DE DISTANCIAS	145
5.6 PLANTILLA DE EXCEL PARA EL CALCULO DE VELOCIDADES	148

5.7 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: ARENISCA – A01	149
5.7.1 Resultados Tomografía Acústica 2.5 D.	151
5.7.2 Visualización Tomografía Acústica 3.5 D	152
5.7.3 Estimación De La Densidad De Microfractura Arenisca A01: Rutina Densmicro	153
5.8 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: CALIZA – C01	154
5.8.1 Resultados Tomografía Acústica 2.5 D.	156
5.8.2 Visualización Tomografía Acústica 3.5 D	157
5.8.3 Estimación De La Densidad De Microfractura Arenisca A01: Rutina Densmicro	158
6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	160
6.1 PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR LA DENSIDAD DE MICROFRACTURA EN LAS ROCAS	160
7. VALIDACIÓN	175
7.1 CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL CEMENTO	176
7.2 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: CEMENTO – CE04	177
7.2.1 Visualización Tomografía Acústica 2.5 D.	177
7.2.2 Medición De Distancias Y Porcentaje De Error.	178
7.2.3 Aplicación De La Rutina Densmicro.	180
7.3 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: CEMENTO – CE03	180
7.3.1 Visualización Tomografía Acústica 2.5 D	181
7.3.2 Medición De Distancias Y Porcentaje De Error.	182
7.3.3 Aplicación De La Rutina Densmicro	184
7.4 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: CEMENTO – CE00	185
7.5 PORCENTAJE DE ERROR: APLICACIÓN RUTINA <i>DENSMICRO</i> EN CEMENTOS	186
8. CONCLUSIONES	188

9. RECOMENDACIONES	191
BIBLIOGRAFÍA	194
ANEXOS	198

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Modelo de Hudson, 1980	31
Tabla 2. Modelo de Schoenberg y Douma, 1988	31
Tabla 3. Modelo de Tod, Hudson y Liu, 2003	31
Tabla 4. Categorías de microfractura y la interpretación de sus orígenes	42
Tabla 5. Velocidades Acústicas en Areniscas y Calizas	65
Tabla 6. Frecuencias Acústicas en Areniscas y Calizas	66
Tabla 7. Frecuencias PZT-5A	67
Tabla 8. Valores de Densidad de Microfractura de las Rocas Virtuales 3.5 D	107
Tabla 9. Especificaciones de la abrazadera	134
Tabla 10. Acústica del patrón de Acero	136
Tabla 11. Características señal prueba patrón	137
Tabla 12. Características señal montaje caimán electrónico	143
Tabla 13. Características señal montaje pinza de muselina con grasa de vacío	145
Tabla 14. Sección ingreso de datos - Calculo de distancias	145
Tabla 15. Calculo de las distancias de las trayectorias entre PZT	146
Tabla 16. Calculo de las primeras 6 velocidades de trayectorias entre PZT – Muestra C01	148
Tabla 17. Instructivo según tipo de muestra	161
Tabla 18. Marcación de Niveles en muestra	162
Tabla 19. Correcciones ante problemas de señales	169
Tabla 20. Nomenclatura señales sencillas	170
Tabla 21. Nomenclatura señales primas	171
Tabla 22. Calculo de porcentaje de error distancias CE04	179
Tabla 23. Calculo de porcentaje de error distancias CE03	183
Tabla 24. Calculo porcentaje de error rutina <i>DensMicro</i>	187

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Fotografías que muestran ejemplos de fracturas	27
Figura 2. Esquema de la aplicación de los esfuerzos principales	28
Figura 3. Clasificación Genérica o de Laboratorio	30
Figura 4. Escalas de las Fracturas en las Rocas	32
Figura 5. Frecuencias de ondas utilizadas para el análisis de las fracturas en las rocas	33
Figura 6. Muestra de Arenisca con líneas de estratificación y fracturas no mineralizada	34
Figura 7. A. Sección delgada mostrando microfracturas que traspasan a través de los granos de cuarzo B. Mineralización de arcilla dentro de microfracturas.	35
Figura 8: Microfracturas propagándose en a. <i>Extensión</i> , b. Corte. Cuando la fractura se abre los extremos se propagan en el modo de Extensión (e), deslizamiento (S) o rasgado (t).	38
Figura 9. Imagen de Catodoluminencia de una zona de dilatación de falla frágil en una roca cuarcita de la Formación Muth (India). Ancho de vista de 4 mm.	38
Figura 10: a. Una microfractura aislada en un material isotrópico propaga radialmente. b. Si las microfracturas son muy juntas pueden obtener una forma curva, porque los campos de tensión en los extremos de las grietas influyen mutuamente.	39
Figura 11. Formación de “cuernos” en el extremo de una microfractura no propagada	40
Figura 12. Microfracturas intragranulares (flecha) en una sección delgada	43
Figura 13. Microfractura de borde de grano (flecha) a lo largo de límites de grano de cuarzo de campo de gas KF.	44

Figura 14. Microfractura grano de desplazamiento (flecha) en una sección delgada del yacimiento de gas de KF.	45
Figura 15. Fractura diagenética lo largo del plano de estratificación (campo KF) y paralela a los minerales aplanados en una sección delgada.	48
Figura 16. Relación entre la Amplitud (A) y la Longitud de Onda ( $\lambda$ )	49
Figura 17. Comportamiento Onda P	52
Figura 18. Comportamiento Onda S	53
Figura 19. Caracterización de fracturas con Onda S	54
Figura 20. Montaje de sensores eléctricos, técnica de Tomografía de Impedancia Eléctrica.	57
Figura 21. Tomograma de velocidad de ondas P.	57
Figura 22 Tomograma de velocidad de ondas P.	60
Figura 23. Efectos de la Difracción en el tiempo de viaje y propagación. (a) $D \ll \lambda$ ; (b) $D \sim \lambda$ ó $D > \lambda$	63
Figura 24 Visualización de la longitud de onda en función del espectro electromagnético	64
Figura 25. Velocidad de Onda en función de la porosidad: Calizas, Areniscas y Granitos	65
Figura 26. Pulsador SOFRANEL 5055 PR	68
Figura 27. Osciloscopio TEKTRONIX TDS 2024	69
Figura 28. Efecto de la amplitud de señal de onda P y S respecto al material (Acero-Torlón) como soporte de los PZT	70
Figura 29. Diseño de dispositivo DBSR para la adquisición de señales	71
Figura 30. Diseño Portatornillos de los PZT	73
Figura 31. Tipos De Muestreo	76
Figura 32. Fm. Tambor	80
Figura 33. a. Taladro b. Brocas c. Soporte d. Planta eléctrica	81
Figura 34. a. Anclaje de soporte b. Taladro en Perforación	82
Figura 35. Microfracturas del muestreo de Areniscas.	82
Figura 36. Fm. La Luna	83

Figura 37. Microfracturas del Muestreo Calizas	84
Figura 38. Evolución de la velocidad ultrasónica en el cemento en función del tiempo	86
Figura 39. Esquema de los prototipos de cementos con sus rotulados	87
Figura 40. Inclusiones Cauchos con variedad de diámetro (espesor)	88
Figura 41. Extracción de cementos de los moldes de PVC	88
Figura 42. Modelos controlados con inclusiones de caucho	89
Figura 43. Modelos controlados con inclusiones huecas	90
Figura 44. Extracción de muestras, bloque de arenisca	92
Figura 45. Extracción de muestras, bloque de arenisca	93
Figura 46. a. Posiciones toma de medidas nivel longitudinal. b. Esquema toma de medidas nivel diametral	94
Figura 47.a. Esquema medición paralelismo y cilindridad. b. Medición de planitud en muestra	94
Figura 48. Montaje medición de cilindridad	95
Figura 49. Muestras de Areniscas terminadas	96
Figura 50. Muestras de Calizas terminadas	96
Figura 51. Estructura de Matriz Bidimensional	101
Figura 52. Estructura de Matriz Multidimensional	101
Figura 53. Ejemplo para ubicar un elemento de una matriz en MATLAB®	102
Figura 54. Crecimiento proporcional de las fracturas respecto a la porosidad efectiva en distintos afloramientos	103
Figura 55. Tendencia de la Vp en Areniscas, Calizas y Granitos en función de la porosidad	104
Figura 56. Tendencia de la Vp en Areniscas, Calizas y Granitos en función de la porosidad	105
Figura 57. Plantilla en EXCEL: Cuádrupla ordenada X-Y-Z-Vp	106
Figura 58. Enmallado de roca virtual: Baja densidad de puntos	107
Figura 59. Enmallado de roca virtual: Alta densidad de puntos	108

Figura 60. Rocas Virtuales 3.5 D: a. Porosidad 0% b. Porosidad 5% c. Porosidad 25%	109
Figura 61. Esquema del Sistema de Adquisición Acústica LBR-ICP	110
Figura 62. Esquema del Sistema de Adquisición Acústica LBR-ICP	111
Figura 63. Ondas P y Ondas S detectadas por sensores sismicos	112
Figura 64. Cortes Tomografía Acústica 2.5 D con aumento de carga uniaxial.	113
Figura 65. Cortes Tomografía Acústica 2.5 D con aumento de carga uniaxial	114
Figura 66. Lectura en la interfaz de MATLAB® del Ensayo Sg4VP	116
Figura 67. Lectura en la interfaz de MATLAB® del Ensayo Sg4VP	117
Figura 68. Grafica de la matriz Sg4Vp de la forma: $V_p=f(x,y)$	117
Figura 69. Lectura en la interfaz de MATLAB® del Ensayo Sg4VP	118
Figura 70. Enmallado Geometría Cuboide	120
Figura 71. Tomograma 2.5 D, matriz Sg4Vp	120
Figura 72. Tomograma 3.5 D, multimatriz Sg4Vp	121
Figura 73. Demostración grafica función “Circular_Domain”.	122
Figura 74. Demostración grafica función “Circular_Domain”.	122
Figura 75. Enmallado 3D Cilíndrico, baja densidad	123
Figura 76. Enmallado 3D Cilíndrico, baja densidad	123
Figura 77. Tomografía Acústica 3.5D: Geometría Cilíndrica	124
Figura 78. Modificación matriz Sg4Vp: Matriz Mfrac	125
Figura 79. Modificación matriz Sg4Vp: Matriz Mfrac	126
Figura 80. Tomografía Acústica 3.5 D: Microfracturas Sintéticas	126
Figura 81. Ejecución Función DensMicro en interfaz MATLAB®	128
Figura 82. a. Arenisca A00 b. Arenisca A01 c. Arenisca A05	132
Figura 83. a. Caliza C00 b. Caliza C01 c. Caliza C03	133
Figura 84. a. Abrazadera Acero Inoxidable b. Ajustamiento con caimán electrónico	134
Figura 85. Calibración PZT	136
Figura 86. Señal onda P – Patrón de Acero	137
Figura 87. Adhesión de cables a los PZT	138

Figura 88. Adhesión de los PZT a la abrazadera a. PZT Onda P b. PZT Onda S	139
Figura 89. a. Abrazadera PZT Onda P b. Abrazadera PZT Onda S	139
Figura 90. Instrumentación General de Adquisición de señales Acústica	140
Figura 91. Trayectorias de las señales acústicas	141
Figura 92. a. Montaje caimán electrónico b. Señal Onda P Montaje caimán electrónico	142
Figura 93. a. Montaje pinza de muselina b. Señal Onda P Montaje pinza de muselina	143
Figura 94. Señal P óptima generada por el mejoramiento con grasa de vacío	144
Figura 95. Grafica de posiciones de los PZT	146
Figura 96. Arenisca A01	150
Figura 97. Montaje Arenisca A01	150
Figura 98. Tomografía Acústica 2.5 D A01 a. Nivel 1 b. Nivel 2 c. Nivel 3 d. Nivel 4	152
Figura 99. Tomografía Acústica 3.5 D A01 a. Visualización Externa b. Visualización Interna	153
Figura 100. Aplicación rutina <i>DensMicro</i> – A01	154
Figura 101. Caliza C01	155
Figura 102. Montaje de Instrumentación general de adquisición acústica - Muestra C01	156
Figura 103. Tomografía Acústica 2.5 D C01 a. Nivel 1 b. Nivel 2 c. Nivel 3 d. Nivel 4	157
Figura 104. Tomografía Acústica 3.5 D C01 a. Visualización Externa b. Visualización Interna	158
Figura 105. Aplicación rutina <i>DensMicro</i> – C01	159
Figura 106. Extracción de muestras. Fm. La Luna	161
Figura 107. Marcación de Niveles en muestra	162
Figura 108. Adhesión de grasa de vacío parte interna de la abrazadera	163
Figura 109. Posicionamiento de PZT en la muestra. Señales Sencillas	163

Figura 110.. Ajustamiento de la Abrazadera	164
Figura 111. Instrucción encendido osciloscopio	164
Figura 112.Ruta de Carpetas SEÑALES	165
Figura 113.Ruta de Carpetas MATRICES	165
Figura 114. a. Cables (2x1). b. Conexión al Osciloscopio (Channel 3). c. Conexión a la muestra.	166
Figura 115. a. Conexión al pulsador. b. Conexión a la muestra.	166
Figura 116. Verificación de corto circuito	167
Figura 117. Apertura software Tektronix	167
Figura 118.Opción Captura de Señal	167
Figura 119. Encendido de Pulsador	168
Figura 120. Características optimas de Señal	168
Figura 121. Nomenclatura señales sencillas	169
Figura 122. Posicionamiento de PZT en la muestra. Señales Primas	171
Figura 123. Picado de la Señal. Señal S	172
Figura 124. Trayectorias de los Cristales.xlsx	172
Figura 125. Caracterización acústica del cemento. w/c=0.45	176
Figura 126. Cemento CE04	177
Figura 127. Tomografía Acústica - Cemento CE04	178
Figura 128. Medición de Distancias CE04. a. Dist.Horizontal b. Dist. Vertical c. Dist. Diag. 1 d. Dist. Diag. 2	179
Figura 129. Rutina DensMicro aplicada a la matriz CE04	180
Figura 130. Cemento CE03	181
Figura 131. Tomografía Acústica – Cemento CE03	182
Figura 132. Medición de Distancias CE04. a. Dist.Horizontal b. Dist. Vertical c. Dist. Diag. 1 d. Dist. Diag. 2	183
Figura 133. Rutina DensMicro aplicada a la matriz CE04	184
Figura 134. Cemento CE04	185

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A: PLANOS DEL DISPOSITIVO DE BARRIDO DE SEÑALES EN LA ROCA (DBSR)	198

## RESUMEN

**TITULO:** ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE MICROFRACTURAS DE LA ROCA A PARTIR DE ONDAS DE COMPRESIÓN Y DE CORTE\*

**AUTOR:** LUIS ARTURO GÓMEZ LUNA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Densidad de microfractura, ondas acústicas, tomografía acústica.

Considerar la presencia de microfracturas en la caracterización de yacimientos petrolíferos, se ha convertido últimamente en un requerimiento importante, tanto que es imposible ignorar este parámetro debido a la tendencia de generar bajos desempeños técnico-económicos en las operaciones, estos principalmente se deben por el aumento de los Tiempos No Productivos (NPT) ocasionados por pérdidas de fluido de circulación en la perforación y desaprovechamiento del medio efectivo de alta permeabilidad secundaria en el momento de la producción de hidrocarburos.

El presente trabajo de investigación está enfocado principalmente en el desarrollo de una nueva metodología, en la cual se logra hacer inversión de ondas acústicas por medio de una abrazadera de cristales piezoeléctricos (PZT). Se generan trayectorias de señales entre PZT al interior de las muestras microfracturadas para poder obtener el tiempo de propagación y una vez definidas las distancias de las trayectorias, calcular la velocidad de onda. Esta información se registra de manera matricial y se trata en rutinas programadas en MATLAB® para poder visualizar y cuantificar la densidad de microfractura como parámetro porcentual del volumen total analizado de muestra. La finalidad de este trabajo conllevó a la creación de una particular técnica de Tomografía Acústica en función de la velocidad de onda S, donde se difiere la parte matricial de la microfracturada por discrepancias significativas entre velocidades, visualizándose a través de la renderización programada de gradientes de colores. Para poder validar esta investigación fue necesario utilizar plugs sintéticos de cementos como modelos controlados, en los cuales se simulaban discontinuidades por medio de inclusiones huecas hechas con prototipos de cauchos, los resultados arrojados entregan un error de 7.06 % fundamentando la confiabilidad de la técnica creada.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Hebenly Celys Leguizamo, Ing. Civil. Codirector: Jenny Mabel Carvajal Jiménez, Ing. de Petróleos. Luis Fernando Ramírez, Ing. de Sistemas.

## ABSTRACT

**TITLE:** ESTIMATE OF THE ROCK MICROFRACTURES DENSITY USING SHEAR AND COMPRESSIONAL WAVES\*

**AUTHOR:** LUIS ARTURO GÓMEZ LUNA\*\*

**KEYWORDS:** Microfracture Density, acoustic waves, acoustic tomography.

Consider the presence of microfractures in characterizing oilfields, has recently become a major issue, so it is impossible to ignore this parameter due to the tendency to generate low technical-economic performance in operations, these are mainly due to the increase Non-Productive Times (NPT) caused by loss of drilling fluid circulation and waste of effective medium with secondary permeability high at the time of hydrocarbons production.

The present research is focused mainly on the development of a new methodology, which manages to make investment acoustic wave by a clamp piezoelectric crystals (PZT). Signal paths between PZT are generated inside the microfracturadas samples to obtain the propagation time and once the distances of the paths defined, calculate the wave speed. This information is recorded in square arrays and treated routines programmed in MATLAB ® to visualize and quantify the microfracture density parameter as a percentage of the total volume of sample analyzed. The purpose of this work led to the creation of a particular acoustic tomography technique based on the S-wave velocity, where the matrix and microfracture portion are discretized by differences between speeds, displayed through the rendering of color gradients programmed. To validate this research was necessary to use synthetic plugs cement as controlled models, in which discontinuities were simulated by means of hollow inclusions made prototypes of rubbers, the cast results delivered error 7.06% basing the reliability of the created technique.

---

\* Thesis Degree

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Hebenly Celys Leguizamo, Ing. Civil. Codirector: Jenny Mabel Carvajal Jiménez, Ing. de Petróleos. Luis Fernando Ramírez, Ing. de Sistemas..

## INTRODUCCIÓN

Contribuir hoy en día a caracterizar de manera más completa los yacimientos de hidrocarburos por medio del proceso de estudios integrados de yacimientos, en especial, cuando se presentan fracturas naturales en la estructura geológica, hace que se incremente la expectativa económica, permitiendo a su vez como factor fundamental optimizar la recuperación de las reservas.

Ignorar la presencia de las fracturas no es una práctica óptima en el manejo de los yacimientos; tarde o temprano, es imposible ignorar las fracturas porque el desempeño técnico y económico del yacimiento se degrada (Nelson 2001). Evitar los altos riesgos que implica la falta de caracterización temprana de las fracturas naturales en los yacimientos, debe ser una prioridad en el estudio de exploración; estos riesgos se reflejan en daños a la formación ya que no se identifica a plenitud zonas de pérdidas de fluidos hacia la formación en procesos de perforación, el mal diseño del peso de lodo para zonas fracturadas y en cuanto a la parte de producción, no se establecen con claridad trenes de permeabilidad y zonas de acumulación de hidrocarburos en los yacimientos naturalmente fracturados. Enfatizado en lo anterior se puede concluir que la omisión temprana de fracturas o microfracturas dependiendo la escala, puede limitar drásticamente las posibilidades de desarrollo de los campos petroleros, desperdiciando de esta manera recursos humanos, físicos, financieros y tecnológicos.

El aporte que se quiere generar con esta investigación es contribuir a caracterizar de manera más puntual la existencia de microfracturas en las formaciones de interés. La densidad de microfractura es un parámetro mediante el cual cuantitativamente, se busca determinar las influencias de microfracturas en las rocas; cuantificar este parámetro ha implicado el enfoque geofísico de métodos

sísmicos convencionales a escala, los cuales han generado buenos resultados en los modelos controlados (plugs sintéticos), pero en muestras de formaciones (corazones) ha presentado fluctuaciones y por ende incertidumbre en la cuantificación de dicho parámetro; sin embargo, con las nuevas aplicaciones geofísicas traídas de otros campos como la Medicina se ha creado una particular técnica de Tomografía Acústica para caracterizar la parte matricial y microfracturada en función de la velocidad de onda de corte y la generación de imágenes tridimensionales por medio de rutinas programadas en MATLAB® como herramienta para la visualización y cuantificación de la densidad de microfracturas en las rocas.

Se determinará una metodología en donde se utilice la inversión de ondas acústicas por medio de una abrazadera de acero con cristales piezoeléctricos adheridos con epoxico de plata, de esta forma se valorará la instrumentación general de adquisición acústica (pruebas ultrasónicas) y por ende la capacidad de resolución de Tomografía Acústica que se puede generar en el Laboratorio Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo, de este forma aportar a la generación de innovación y tecnología del ICP-ECOPETROL.

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

*“Debe ser simple para ser cierto, si no es simple, probablemente no podremos descifrarlo”  
Albert Einstein*

El mundo de la investigación hoy en día es la mayor esperanza que el ser humano puede tener para sobrevivir ante los desafiantes fenómenos de toda índole que cada día nos retan. La caracterización de rocas naturalmente fracturadas, como eje central de esta investigación, no gira solamente en conocer este fenómeno natural desde un punto de vista netamente académico o investigativo, si no también, aprender a conocer estas discontinuidades geológicas para poder tener grandes posibilidades en un futuro de extraer de forma óptima los recursos minerales y energéticos que ellas guardan como un gran baluarte. La gesta de esta investigación no inició con un camino establecido, se sabía el punto donde se quería llegar, pero la trayectoria para llegar al objetivo se tuvo que generar desde cero y en muchas veces, una vez avanzado cierta parte, retroceder para emendar errores, así es la investigación. Partiendo de la idea de que una buena edificación, debe contar con unas buenas bases, el inicio de esta investigación contempla el estudio de fundamentos teóricos y estados del arte relacionados al fracturamiento natural de las rocas, partiendo primero a gran escala, conocida como *Mega-Fractura* hasta la pequeña escala y enfoque del estudio, conocida como *Micro-Fractura*.

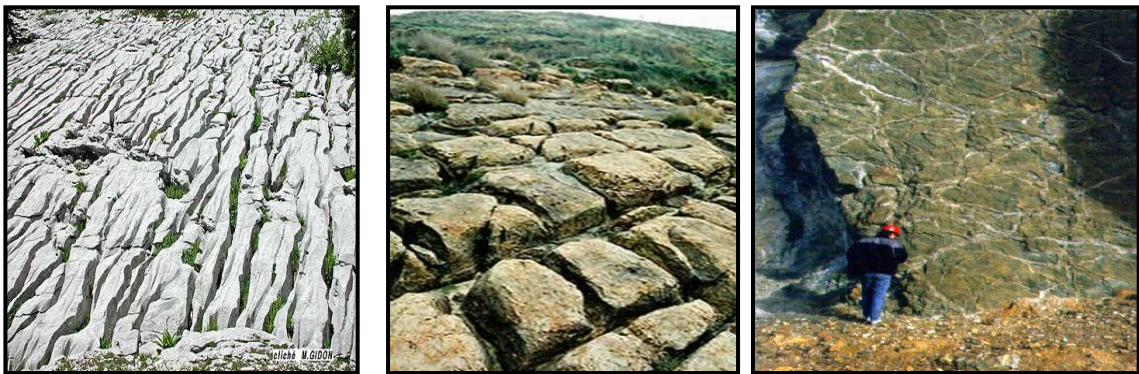
Satisfacer la necesidad de evaluar las fracturas de los Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF) se logra con la extracción de muestras que se puedan analizar en el laboratorio a partir de un núcleo que es un diferencial del yacimiento, sin necesidad de extraer todo el yacimiento, ya que eso sería ilógico; debido al

tamaño de la muestra, lo que se puede evaluar son *microfracturas*. Los alcances de esta investigación se proyectaron a muestras secas, no confinadas y a temperatura ambiente, las muestras a estudiar son de superficie o de afloramientos geológicos de formaciones litológicas de areniscas y calizas, con el fin de detectar y cuantificar la *densidad de microfractura* a partir de la particular técnica de Tomografía Acústica propuesta por el autor, una vez logrado este alcance, en futuras investigaciones, proyectar al análisis de muestras de YNF bajo presiones y temperaturas específicas que simulen las condiciones in situ de este tipo de yacimientos, sería la continuidad de este primer escalón. Además del estudio de las microfracturas, se necesita conocer bajo qué herramientas se investigará internamente la estructura física de las rocas a estudiar y que mejor que las ondas sísmicas, que desde los principios del siglo XX nos ha enseñado la estructura interna de la tierra a través de las Ondas de Compresión (Ondas P) y las Ondas de Corte (Ondas S), seguidamente, se investigó acerca de la aplicación de estos principios físicos y se encontró que desde hace más de 30 años lo han utilizado en el área de la Geología como Tomografía Acústica con el fin de conocer qué sitios potenciales presentan recursos naturales o analizar el estado del subsuelo para la construcción de edificaciones. Finalmente, la utilización del software MATLAB® y programar rutinas que tome los datos acústicos y los transforme en imágenes tridimensionales fue uno de los puntos más críticos de esta investigación, pero de gran impacto una vez obtenidos los resultados, para esto, los fundamentos de análisis matricial del álgebra lineal fueron necesarios para crear las *rocas de números* y de esta manera, visualizar virtualmente la estructura físicas de las rocas muestreadas.

## 1.1 TEORÍA Y ESTADO DEL ARTE DE FRACTURAS Y MICROFRACTURAS

**1.1.1 Definición de fractura**<sup>1</sup> Stearns en 1990, define a una fractura natural, como una discontinuidad planar macroscópica resultado de los esfuerzos que exceden el punto de ruptura de la roca, ya que bajo el campo de la deformación frágil las rocas se rompen conforme a superficies más o menos planas. Las superficies de ruptura se denominan fracturas cuando no se aprecia desplazamiento entre los dos ámbitos definidos por la superficie de discontinuidad en sentido paralelo a la propia superficie. Las fracturas son discontinuidades aproximadamente planas que separan bloques de roca con desplazamiento perpendicular al plano de ruptura, a lo largo de los cuales la cohesión del material se ha perdido y se registra como planos o superficies de discontinuidad (ver figura 1). Las fracturas son el producto de la deformación frágil en cualquier tipo de roca. Se forman por esfuerzos cortantes, en zonas de compresión, extensión y tensión; también son generadas por pérdida de carga, pérdida de volumen, enfriamiento, por efecto de la diagénesis y de la actividad biológica, etc.

**Figura 1. Fotografías que muestran ejemplos de fracturas**



Fuente: GIDON, Cliche M. Ciencias Sociales Colegio El Valle Sanchinarro [online]. Presentaciones de Sergi Sanchi & Alfredo Garcia. [España]. 2011. Disponible en internet: <URL: <http://cienciasocialesanchinarro.wordpress.com/2011/03/18/guion-selectividad/>>. Disponible en internet: <URL: <http://cienciasocialesanchinarro.files.wordpress.com/2011/03/27-lapiaz.jpg>>

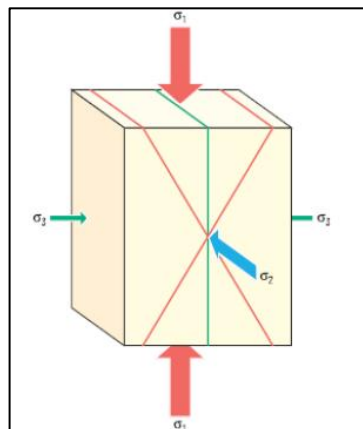
---

<sup>1</sup> LUCINO BUENAVENTURA, A. Apuntes de la asignatura de Geología de Yacimientos Naturalmente Fracturados. Cap v, Propiedades de los Sistemas de Fracturas, UNAM. 2010

**1.1.2 Clasificación genérica o de laboratorio de las fracturas**<sup>2</sup> Durante pruebas realizadas en el laboratorio en muestras de roca (de compresión, extensión y tensión), se han observado tres tipos de fracturas: De extensión o modo I, de cizalla o modo II o modo III y de tensión (ver figura 2), estas forman ángulos consistentes y predecibles con relación a las tres direcciones principales de los esfuerzos ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ). Todas las fracturas en la roca deben ajustarse a uno de estos tipos básicos de las fracturas:

1. Fracturas de extensión (modo I).
2. Fracturas de cizalla (modo II y modo III).
3. Fracturas de tensión.

**Figura 2. Esquema de la aplicación de los esfuerzos principales**



Fuentes: NELSON, R.A. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. 2001.

Numerosos autores han generado distintas clasificaciones de las fracturas, además de esta clasificación genérica o de laboratorio, que es la más aplicable a esta investigación, existen otras como Clasificación Geológica ó Clasificación por

---

<sup>2</sup> NELSON, R.A. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Chap. 1, Evaluating Fractured Reservoirs. 2001

Ocurrencias de las Fracturas Naturales, que a su vez se subdividen en fracturas tectónicas, regionales, contraccionales y relacionadas a la superficie

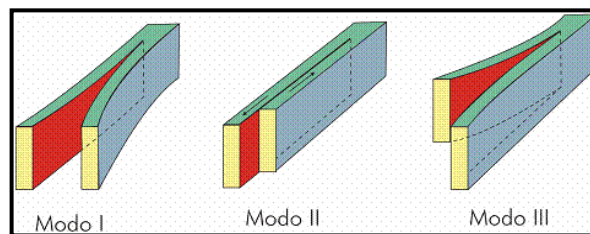
**1.1.2.1 Fracturas de Extensión Modo I** Las fracturas de extensión tienen un sentido de desplazamiento perpendicular al plano de fractura, se forman paralelamente a  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  y perpendicularmente a  $\sigma_3$  (ver figura 3). Dichas fracturas también se forman cuando los tres esfuerzos son positivos y compresivos. En experimentos de fracturas de laboratorio, las fracturas de extensión frecuentemente se forman al mismo tiempo con las fracturas de cizalla.

**1.1.2.2 Fracturas de Cizalla Modo II y Modo III** Las fracturas de cizalla tienen un sentido de desplazamiento paralelo al plano de fractura, forman un ángulo agudo (mayor de  $0^\circ$  y menor de  $90^\circ$ ) en la dirección del esfuerzo principal máximo de compresión ( $\sigma_1$ ) y un ángulo obtuso (mayor a  $90^\circ$  y menor a  $180^\circ$ ) en la dirección del esfuerzo de mínima compresión ( $\sigma_3$ ) a través de la muestra de roca. Potencialmente, pueden desarrollarse dos orientaciones de las fracturas de cizalla en todos los experimentos realizados en el laboratorio, una a cada lado del esfuerzo principal, y orientadas al mismo ángulo para  $\sigma_1$ . En experimentos de laboratorio esas fracturas se forman paralelamente a  $\sigma_2$  y un ángulo obtuso a  $\sigma_3$  (figura 3). Las fracturas de cizalla se forman cuando los tres esfuerzos principales son compresivos (positivos). El ángulo agudo entre las fracturas de cizalla es llamado ángulo conjugado y primeramente depende de:

1. Las propiedades mecánicas de la roca.
2. La magnitud absoluta del esfuerzo principal mínimo ( $\sigma_3$ ).
3. La magnitud del esfuerzo principal intermedio ( $\sigma_2$ ) relacionado a ambos esfuerzos principales al máximo ( $\sigma_1$ ) y al mínimo esfuerzo principal ( $\sigma_3$ ), (cuando  $\sigma_2$  se aproxima) a  $\sigma_1$ , el ángulo entre  $\sigma_1$  y el plano de fractura disminuye).

**1.1.2.3 Fracturas de Tensión** Las fracturas de tensión, también tienen un sentido de desplazamiento perpendicular al plano de fractura y hacia fuera del plano de fractura; las fracturas de tensión se forman paralelamente a  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ . En términos de la orientación de  $\sigma_1$  y el sentido de desplazamiento, estas fracturas se asemejan a las fracturas de extensión. Sin embargo para formar una fractura de tensión, al menos un esfuerzo principal ( $\sigma_3$ ) debe ser negativo (tensión).

**Figura 3. Clasificación Genérica o de Laboratorio**



Fuente: NIETO-SAMANIEGO, Angel F. Geología Estructural. [online]. Inicio y propagación de fallas en un medio rocoso. [Mexico] 2007. Disponible en internet: <URL: <http://www.geociencias.unam.mx/~afns/Apuntes.htm>>.

**1.1.3 Modelos de fracturas<sup>3</sup>** Desde hace más de 30 años, algunos investigadores como J.A Hudson del Imperial College London iniciaron el modelamiento matemático de medios que tuvieran inclusiones o *medios efectivos* con base a las propiedades elásticas del medio, estas propiedades elásticas matemáticamente se traducen en *módulos elásticos* que están en función de la velocidad de la onda P y onda S. El modelamiento matemático del comportamiento de estos medios se asume que están conformados por una parte homogénea, llamada matriz, el cual está contenidas grietas o fracturas.

<sup>3</sup> PACHANO, Karen. Metodología para caracterizar un sistema de fracturas, utilizando la inversión de datos de ondas P y S. Cap. 2, Relación entre los modelos efectivos y las velocidades acústicas, UIS. 2008

**Tabla 1. Modelo de Hudson, 1980**

<b>MODELO DE GRIETAS ELIPSOIDALES</b>	
<i>HUDSON J. A., 1980</i>	
<b>ORIGEN DEL MODELO</b>	Este modelo fue desarrollado Hudson J.A. en 1980.
<b>ANTECEDENTES</b>	El modelo se generó a partir de las ideas y estudios que se tenían acerca del comportamiento de la tierra (movimientos telúricos). El tema de la investigación fue sugerido por Stuart Crampin del Instituto de Ciencias Geológicas – Edimburgo; quién se había interesado en estudiar el comportamiento de las ondas P y S cuando se propagan en medios fracturados.
<b>SENTIDO</b>	Explicar el comportamiento elástico de un sólido con inclusiones o grietas elipsoidales.

**Tabla 2. Modelo de Schoenberg y Douma, 1988**

<b>MODELO DE CAPAS PARALELAS – MODELO DE DEFORMACIÓN CONSTANTE</b>	
<i>MICHAEL SCHOENBERG Y J. DOUMA, 1988</i>	
<b>ORIGEN DEL MODELO</b>	Este modelo fue desarrollado por Michael Schoenberg y J. Douma en 1988.
<b>ANTECEDENTES</b>	Los autores buscaban explicar el comportamiento de muchas regiones del subsuelo en las cuales se presentan microfracturas verticales alineadas, generadas por esfuerzos tectónicos (se hace referencia a los estudios de Crampin, 1985; Crampin y Atkinson 1985; Willis, Rethford y Bielanski, 1986; Crampin y Bush, 1986). La presencia de estas microfracturas genera lo que en geofísica se conoce como velocidades anisótropas azimutalmente.
<b>SENTIDO</b>	Explicar el comportamiento elástico de un sólido conformado por placas delgadas paralelas.

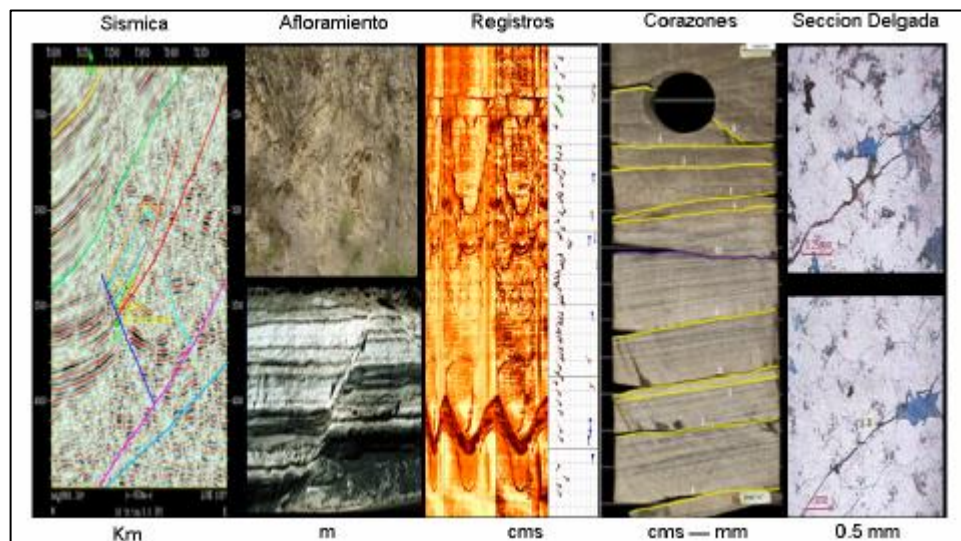
**Tabla 3. Modelo de Tod, Hudson y Liu, 2003**

<b>MODELO DE GRIETAS CON FLUIDOS – POROELÁSTICO</b>	
<i>TOD S.R., HUDSON J.A. AND LIU E., 2003</i>	
<b>ORIGEN DEL MODELO</b>	Este modelo fue desarrollado Tod S.R., Hudson J.A. And Liu E., 2003..
<b>ANTECEDENTES</b>	En los modelos anteriores se trabajó con sólidos (llamados también medios efectivos) conformados por la superposición de dos medios continuos: matriz y fracturas. Muchas veces, la respuesta elástica de estos materiales depende de la parte “no sólida”. Para desarrollar el modelo inicialmente se revisan los conceptos de rocas porosas y permeables y luego se representa su comportamiento estático y dinámico utilizando la teoría propuesta por Maurice A. Biot.
<b>SENTIDO</b>	Explicar el comportamiento de los sólidos fracturados saturados de fluido, lo cual se acerca a la descripción de los yacimientos petrolíferos.

Fuente: Ficha Conceptual Modelos de Fracturas. PACHANO PELÁEZ, Karen Linnete. Metodología para caracterizar un sistema de fracturas utilizando inversión de datos de ondas P y S. 2008.

**1.1.4 Escalas de fracturas<sup>4</sup>** Hoy en día, las fracturas pueden ser leídas con diferentes herramientas y a diferentes escalas. Por ejemplo, la sísmica obtiene información de fracturas que pueden abarcar varios kilómetros de longitud, mientras que en un afloramiento se pueden medir fracturas de unos pocos metros o centímetros de longitud (macrofracturas) que se pueden observar a simple vista. Adicionalmente, en los registros sónicos de pozos como el UBI, el cual es un registro ultrasónico de imagen, se leen fracturas que tienen unos pocos centímetros de longitud y en núcleos o corazones de pozos se pueden observar fracturas de centímetros a milímetros de longitud y de las secciones delgadas las cuales se analizan al microscopio se encuentran fracturas de mm de longitud (microfracturas). En la figura 4, se puede observar las diferentes escalas de fracturas que se pueden encontrar en el análisis de yacimientos.

**Figura 4. Escalas de las Fracturas en las Rocas**

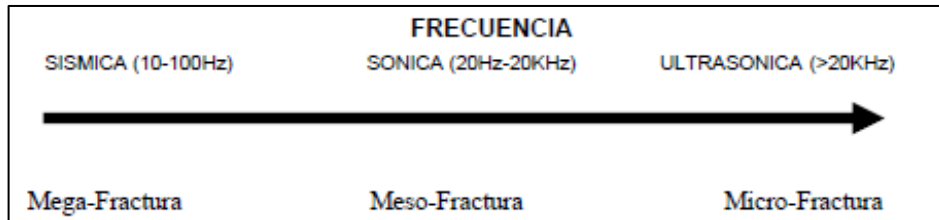


Fuente: RUEDA MARTINEZ, Jenny Paola; MADERO PINZON, Hernán Darío. Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótropos. UIS 2006.

<sup>4</sup> RUEDA MARTINEZ, Jenny Paola; MADERO PINZON, Hernán Darío. Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótropos. Cap. 4, Escala de las fracturas. UIS 2006.

En resumen, las fracturas pueden tener tamaños que van desde unas pocas micras hasta varios kilómetros, y pueden ser detectadas por diversas técnicas según su tamaño (Figura 5).

**Figura 5. Frecuencias de ondas utilizadas para el análisis de las fracturas en las rocas**



Fuente: RUEDA MARTINEZ, Jenny Paola; MADERO PINZON, Hernán Darío. Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótropos. UIS. 2006.

De acuerdo con la proyección de la investigación en referencia a las “microfracturas” y debido que las longitudes de onda con que se trabajan en el laboratorio son menores a 2 centímetros de longitud, las fracturas que se caractericen por tener menos de 2 centímetros de longitud y aperturas menores a 1 milímetro se le denominan microfracturas (RUEDA ET AL 2006).

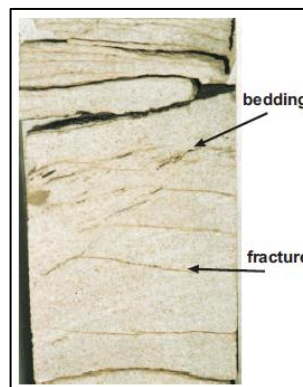
**1.1.5 Definición de microfracturas**<sup>5</sup> Geológicamente, las microfracturas tienden a ser submilimétricas en la apertura (ancho) y varían en su extensión como discontinuidades planas o sub-planas (tanto en longitud y profundidad). Este tipo de discontinuidades son producidas por una variedad de procesos de deformación masiva en las rocas. Históricamente, en la literatura, se han denominado, como sinónimos, microfisuras, grietas o microfracturas (Kranz, 1983). El término microfractura se ha adoptado para referirse a las discontinuidades con las características milimétricas y submilimétricas en la presente investigación, a pesar de que algunos autores en la literatura justifiquen algunas diferencias físicas, de

<sup>5</sup> FLOTTMANN, T. Horizontal microfractures and core discing in sandstone reservoirs, Cooper Basin, Australia. Chap. 1, Introduction. PESA. 2004.

origen y de propagación, estas como tal, en el análisis de la detección y cuantificación con la aplicación de la técnica propuesta de Tomografía Acústica. Muchos microfracturas constituyen una red, este tipo de redes se encuentran dentro del sistema de fracturas más abierto o más grandes.

Las microfracturas (ver figura 6) se presentan cuando los esfuerzos exceden los esfuerzos que genera deformación a nivel local. Los esfuerzos locales son inducidos mecánicamente o térmicamente. Las microfracturas tienden a localizarse en los límites de grano, cavidades intracristalinas, planos de división intracristalinas, y las superficies internas corroídas por fluidos químicamente activos (Kranz, 1983). Las microfracturas también pueden ser trans-granular y se propagan a lo largo de planos de exfoliación. Típicamente, las microfracturas propagan en la dirección del máximo esfuerzo.

**Figura 6. Muestra de Arenisca con líneas de estratificación y fracturas no mineralizada**



Fuente: FLOTTMANN, T. Horizontal microfractures and core discing in sandstone reservoirs, Cooper Basin, Australia. PESA. 2004.

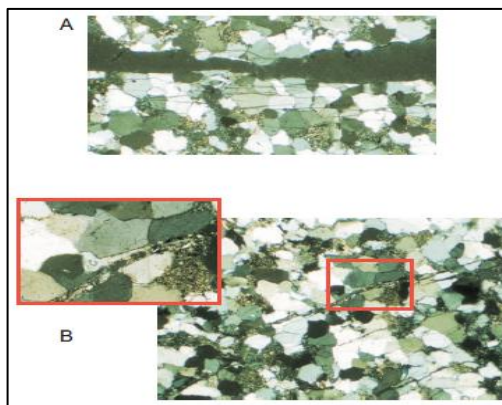
Las microfracturas tienen una o dos dimensiones que son más pequeñas que la tercera dimensión. A modo de referencia, la dimensión  $x$  denota la longitud,  $y$  denota la profundidad, y  $z$  la apertura del ancho. Para microfracturas planas, la relación entre ancho y longitud (la relación de aspecto de microfractura,  $z / x$ ),

debe ser entre  $10^{-2}$  aunque, con frecuencia entre  $10^{-3}$  y  $10^{-5}$  (Simmons y Richter, 1976).

Con frecuencia, la superficie de la microfractura se recubre en la superficie con precipitado de mineral secundario (Kranz, 1983). Esto se genera si la microfractura está abierta en relación con la comunicación de poros con microfracturas adyacentes conectadas (y fracturas transmisoras más grandes) en una red de microfractura o sistema de fractura. El recubrimiento puede ser completo, en donde la microfractura es completamente llenada (curada o sellada), o parcial, donde la microfractura sólo se llena parcialmente (ver figura 7).

Estos minerales secundarios se depositan con frecuencia a temperaturas más altas durante intrusión metamórfica (Kranz, 1983). Sin embargo, los procesos geológicos más recientes asociados con una menor temperatura del mineral hidrológico y la precipitación de los iones disueltos de soluciones del agua intersticial también pueden ser importantes, sobre todo en la superficie interfacial de contacto entre el agua intersticial y minerales de la superficie microfractura.

**Figura 7. A. Sección delgada mostrando microfracturas que traspasan a través de los granos de cuarzo B. Mineralización de arcilla dentro de microfracturas.**



Fuente: FLOTTMANN, T. Horizontal microfractures and core discing in sandstone reservoirs, Cooper Basin, Australia. PESA. 2004.

### **1.1.6 Factores de formación de las microfracturas: mecanismos de deformación en las rocas<sup>6</sup>**

La deformación en rocas se logra mediante un gran número de procesos a escala de grano. Los procesos reales en cuestión dependen de factores tales como la mineralogía, composición de fluido intergranular, tamaño de grano, porosidad y permeabilidad; sobre los controles externos, la temperatura, la presión litostática, la presión de poro y la velocidad de deformación impuesta externamente. Es importante analizar las microestructuras a escala de grano, ya que son utilizadas para identificar los procesos de deformación que han estado operando a lo largo del tiempo.

Los granos son volúmenes de material cristalino separado de otros granos de los mismos o de diferentes minerales por un límite de grano. Algunos autores restringen el uso del término “*límite de grano*” (grain boundary) para superficies separadas de granos de igual mineralogía, y el uso del término de “*límites interface*” (interface boundary) para el caso contrario (Fliervoet et al. 1997). En la práctica, es difícil mantener esta distinción cuando se describe compuestos agregados de muchos granos, y por lo tanto se ha normalizado utilizar el término “*límite de grano*” para ambos tipos de superficies. Las estructuras visibles dentro de los granos se conocen como estructuras de deformación intracristalinas.

A pesar de que en la literatura los procesos de deformación y microestructuras se tratan uno por uno, esto no quiere decir que se producen de forma aislada los mecanismos de deformación de las rocas. La mayoría de las deformaciones de las rocas tienen una larga historia de enterramiento, deformación, metamorfismo y levantamiento, donde varias etapas de este proceso pueden haber contribuido a la estructura final de la deformación.

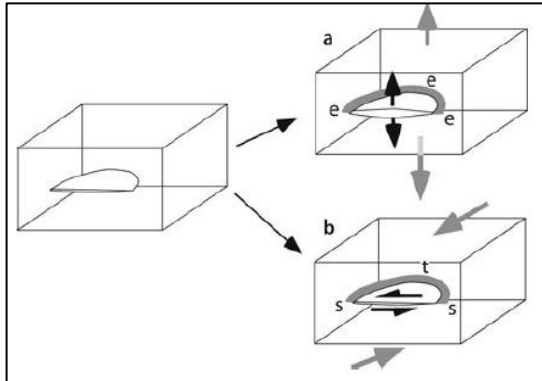
---

<sup>6</sup> PASSCHIER, CEES W. TROUW, Rudolph A. J. Microtectonics. Chap. 3, Deformation Mechanisms. Springer 2005.

Los mecanismos de deformación de las rocas, como producto, inicialmente generan microestructuras que en su mayoría de veces se reflejan en microfracturas, existen una variedad de factores por los cuales ocurre, uno de ellos principalmente es la *cataclasis*, el cual es un proceso de fractura o ruptura mecánica de la roca generado en su mayoría por procesos metamórficos y por el cual se ha de exponer porque es el que más afecta en la formación de microfracturas, también existen otros factores como la disolución-precipitación de minerales, la deformación intercrystalina y la recristalización, estos dos últimos factores, analizados con la tecnología de barridos de microscopia electrónica o microscopia optica.

**1.1.6.1 Cataclasis - Fracturamiento frágil** A bajas temperaturas o altas velocidades de deformación, las rocas cambian de forma por la *deformación frágil*, es decir, por la formación de fracturas y propagaciones asociadas con los movimiento a lo largo de fallas. En términos de deformación frágil una fractura es una discontinuidad plana por lo general con un poco de dilatación, incluyendo grietas, juntas (grandes grietas) y fallas. Una grieta o junta se abre en ángulo recto respecto al plano de la fractura y no tiene desplazamiento (ver Figura 8); por el contrario, una falla tiene desplazamiento lateral (ver Figura 8b). La propagación de una falla centra su crecimiento en sus extremos donde se forma aisladamente *microgrietas* y se propagan, aumentando gradualmente la *densidad de microgrietas* donde finalmente ellas se enlazan para formar una falla pasante. Luego los movimientos en la falla separan gradualmente segmentos de los grano de las rocas, haciéndolas fallar frágilmente y produciéndose una falla activa (Hallbauer et al, 1973). Un ejemplo es la Figura 9 donde se puede observar trozos de cuarzo que se desprenden de los granos más grandes del mismo mineral debido a la formación de una falla, las partículas actúan como núcleos quebradizos de precipitación y se observan microgrietas transgranulares en los granos de cuarzo que están fuera de la zona de falla.

**Figura 8: Microfracturas propagándose en a. *Extensión*, b. *Corte*. Cuando la fractura se abre los extremos se propagan en el modo de Extensión (e), deslizamiento (S) o rasgado (t).**



Fuente: PASSCHIER, CEES W. TROUW, Rudolph A. J. *Microtectonics*. Springer 2005.

**Figura 9. Imagen de Catuduminencia de una zona de dilatación de falla frágil en una roca cuarcita de la Formación Muth (India). Ancho de vista de 4 mm.**



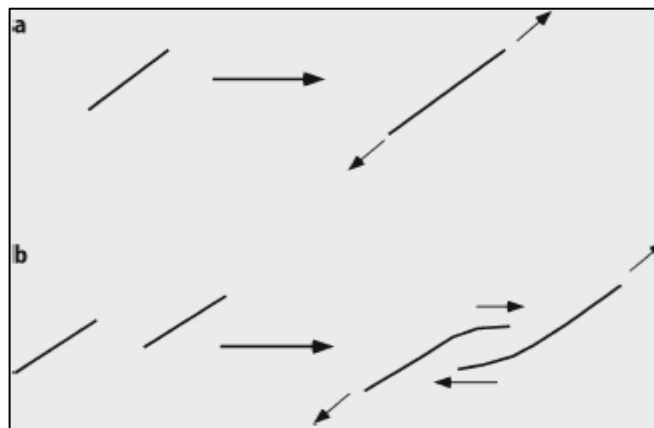
Fuente: PASSCHIER, CEES W. TROUW, Rudolph A. J. *Microtectonics*. Springer 2005.

Las microgrietas son discontinuidades planas en las rocas a escala de granos o más pequeña, normalmente con alguna dilatación pero con desplazamiento insignificante. Estas se propagan lateralmente por el movimiento de sus extremos dejando el material circundante intacto. Cuando la grieta se abre, sus lados pueden ser desplazados en un régimen tensional (esfuerzos de extensión), en un régimen corte o en una combinación de ambos. *Si un elemento cortante está*

presente, la estructura es mejor conocido como una microfractura y el movimiento puede ser hacia los extremos o paralela a ella (Fig. 8b).

En todos los casos, el desplazamiento elástico crea un aumento de esfuerzo diferencial en el extremo de la fractura que depende de la longitud de la fractura, carga de esfuerzo, propiedades elásticas del material y la resistencia a la ruptura de enlaces atómicos en el extremo de la grieta, conocido como tenacidad a la fractura. El desplazamiento en una *microfractura* puede provocar la propagación de fractura si se alcanza un cierto esfuerzo crítico, en el modo del régimen de esfuerzos de extensión, corte o desgarre (ver figura 8). Este desplazamiento ocurre por lo general en el plano de la microfractura si se encuentra aislada en un material isótropo homogéneo, tal como vidrio (ver figura 10a). Sin embargo, también las microfracturas pueden obtener una forma curvada, si el campo de esfuerzos en el extremo interfiere con la de una fractura vecina u otra heterogeneidad tal como una inclusión (ver figura 10b).

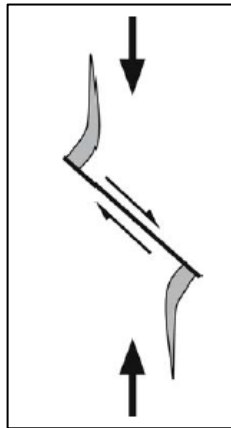
**Figura 10: a. Una microfractura aislada en un material isotrópico propaga radialmente. b. Si las microfracturas son muy juntas pueden obtener una forma curva, porque los campos de tensión en los extremos de las grietas influyen mutuamente.**



Fuente: PASSCHIER, CEES W. TROUW, Rudolph A. J. *Microtectonics*. Springer 2005.

**1.1.6.2 Otros Factores** En las rocas, la mayoría de los minerales son mecánicamente anisótropos y las microfrazuras se forman comúnmente a lo largo de ciertas direcciones cristalográficas tales como en las micas, feldespatos, anfíboles, piroxenos y calcita, incluso, el cuarzo es ligeramente anisótropo por presentar fracturación (Vollbrecht et al 1991). Si hay un componente de corte a lo largo de la microfrazura, pero que no puede propagarse lateralmente por alguna razón, por ejemplo, cuando la frazura se encuentra a lo largo de un límite de grano corto, las grietas laterales se propagan en forma de cuerno (Horii y Nemat-Nasser 1985;. (Ver Fig. 11). Las Microfrazuras se llaman intragranular si sólo afectan a un solo grano. Las frazuras que intersectan varios granos se conocen como frazuras intergranulares o transgranular (Sección 1.1.7) ver Figura 9.

**Figura 11. Formación de “cuernos” en el extremo de una microfrazura no propagada**



Fuente: PASSCHIER, CEES W. TROUW, Rudolph A. J. Microtectonics. Springer 2005.

Además, la nucleación, propagación y velocidad de crecimiento de las microfrazuras no sólo depende de los esfuerzos, sino también de la temperatura, reacciones químicas del medio en especial del fluido en la grieta, la alta carga diferencial de esfuerzos o, en el caso de rocas porosas, debido a la presión litostática y el colapso de poros en la ausencia de carga diferencial de esfuerzo de compresión. Otras causas posibles de nucleación y propagación de microfrazuras

son la discordancia elástica o plástica de dos fases mineralógicas que tienen diferentes propiedades reológicas, permitiendo la concentración y acumulación local de esfuerzos; también influyen factores como la expansión térmica o contracción de los minerales adyacentes (Vollbrecht et al 1991.).

#### **1.1.7 Tipos de microfracturas y características: aplicación Campo Kuqa**

**Furelan, China**<sup>7</sup> Las microfracturas tienen una amplia gama de tamaños, formas y patrones, pero la mayoría de ellos son las fracturas de modo de apertura (es decir, formado por el movimiento de apertura perpendicular a las paredes de la fractura). Para la aplicación de esta investigación en función de los tipos de litologías (Areniscas-Calizas), una clasificación concordante es en la que se pueden dividir en tres categorías basadas en la relación de las fracturas de granos. Esta clasificación se basó en una investigación hecha al desarrollo de explotación de un campo gasífero en China, Kuqa Foreland, cuya formación de interés, *Bashijiqike*, es una arenisca de baja porosidad y permeabilidad, almacenadora de gas, apretada de grano fino a grueso, los granos son subangulares a subredondeados y moderadamente sorteados, con bajas presencias de arcilla en la matriz (arenisca limpia).

En este yacimiento microfracturado se han identificado microfracturas intragranulares, microfracturas de borde de grano, y microfracturas transgranulares (Tab. 4).

---

<sup>7</sup> LIU, Chun. GUO, Qingxin. Characteristics and origin of microfracture in lower Cretaceous tight sandstone from Kuqa Foreland basin, NW China. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology. IPTC 16738. 2013

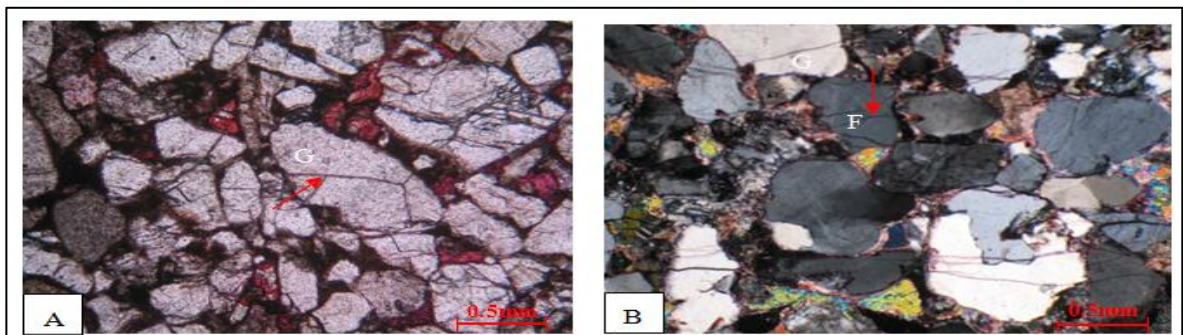
**Tabla 4. Categorías de microfractura y la interpretación de sus orígenes**

Categoría	Distribución	Longitud y Rango	Apertura	Origen	Aplicación
Intragranular	Dentro de grano grueso (cuarzo, feldespato)	Varias decenas de micras	<10 $\mu\text{m}$	Diagenético y/o tectónico	Local
Borde de Grano	A lo largo del límite de grano grueso	Varias decenas de micras	<10 $\mu\text{m}$	Diagenético	Local
Transgranular	Atraviesa algunos granos y residuos	Desde cientos de micras hasta varios centímetros	<40 $\mu\text{m}$ , 10 ~ 20 $\mu\text{m}$	Tectonismo y/o sobrepresión	Regional

**1.1.7.1. Categoría I: Microfracturas Intragranulares:** Las Microfracturas Intragranulares, situada enteramente dentro de los granos, son matrices irregulares principalmente de cuarzo y clivaje (estructuras planas) de fracturas en feldespato. Las microfracturas se curvean en patrones de intersecciones complejas (ver figura 11). Ellas se desarrollan en granos de cuarzo o feldespato y normalmente se encuentran en los granos que tienen contacto entre sí, no cortan los bordes de los granos minerales (ver figura 12). Las Microfracturas intragranulares tienen aberturas de menos de 10 micras y longitudes iguales o menores que el tamaño de grano, pero localmente tienen densidades altas (Fig. 12B). En la figura 12A se puede observar microfracturas intragranular formada dentro de un grano de cuarzo triturado del campo de gas Kuqa Foreland (KF), profundidad de 6.780 m (22.245 pies). La técnica de visualización es el Plano de Luz Polarizada (PPL). En la figura 12B se muestra una microfractura intragranular formado dentro de un grano de cuarzo y feldespato triturado de campo de gas KS, profundidad de 5.685 m (18,652.5 pie), detectada con la técnica de Luz Cruzada Polarizada (XPL). En ambas figuras se puede concluir que en algunos casos, los

granos triturados se asocian con *microbreccia* (Una arenisca mal sorteada que contiene partículas de arena grandes y angulares en una fina matriz arcillosa) a lo largo de los contactos de grano y localmente dentro de cemento. Tales características en otras areniscas fueron descritos por Milliken (1994). Relaciones texturales indican que estas fracturas fueron formadas principalmente antes o durante las primeras etapas de la cementación de cuarzo, en consonancia con grandes desplazamientos locales y las rotaciones de los fragmentos de granos dentro (ahora lleno de cemento) espacio poroso en ese entonces.

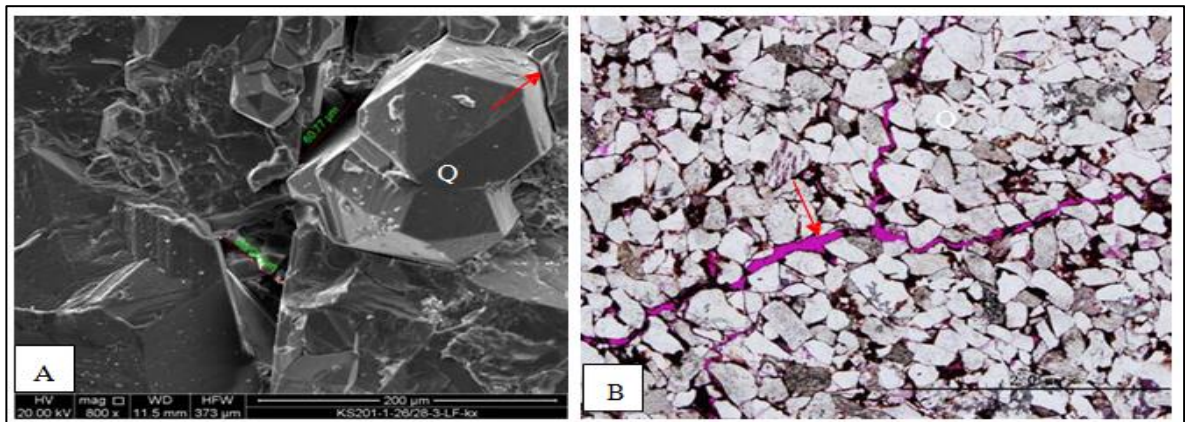
**Figura 12. Microfracturas intragranulares (flecha) en una sección delgada**



Fuente: LIU, Chun. GUO, Qingxin. Characteristics and origin of microfracture in lower Cretaceous tight sandstone from Kuqa Foreland basin, NW China. 2013

**1.1.7.2. Categoría II: Microfracturas de borde de grano:** Las microfracturas de borde de grano están asociadas (agrupadas) y coinciden con el límite de grano. Ellos se distribuyen principalmente en los límites entre granos minerales a lo largo de contactos lineales (Fig. 13), de modo que también pueden ser llamados microfracturas intergranular. Las microfracturas de borde de grano son estrechas y cortas, con las aberturas de menos de  $10\mu\text{m}$  (ver figura 13), aunque han experimentado disolución, algunos son tan grandes como  $20\mu\text{m}$ . En la figura 13A se puede observar una muestra de profundidad de 6706 m (22.002 pies) con la técnica de microscopio de barrido electrónico (SEM). La figura 13B es una muestra de profundidad de 6669 m (21881 pies), con la técnica de Plano de Luz Polarizada (PPL). El rojo es la resina epoxi que sirve para detectarlas.

**Figura 13. Microfractura de borde de grano (flecha) a lo largo de límites de grano de cuarzo de campo de gas KF.**



Fuente: LIU, Chun. GUO, Qingxin. Characteristics and origin of microfracture in lower Cretaceous tight sandstone from Kuqa Foreland basin, NW China. 2013.

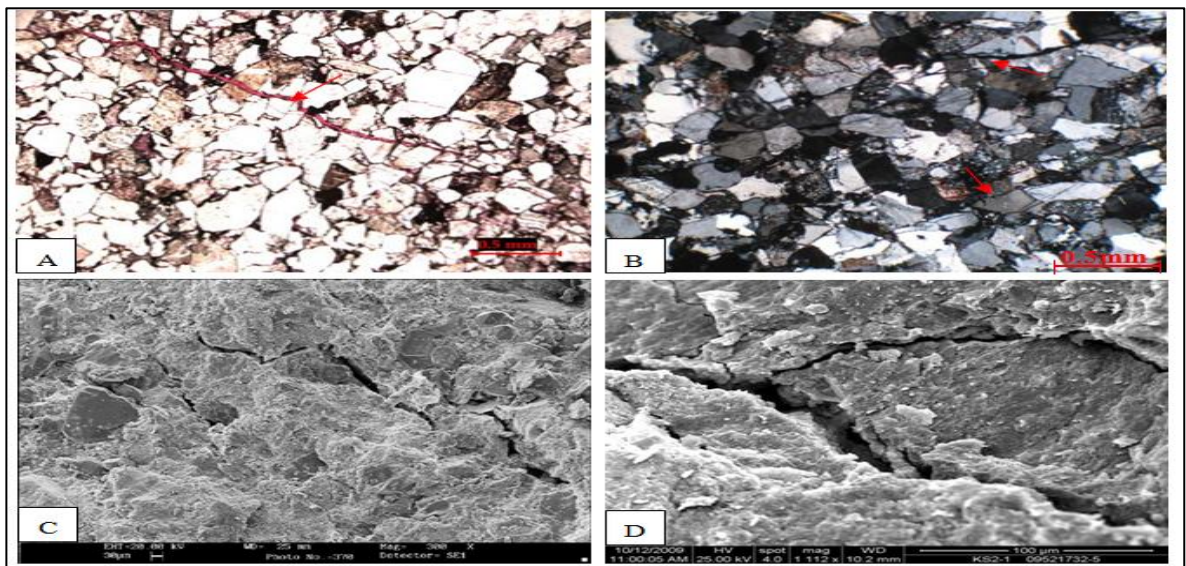
Las microfracturas intragranulares y borde de grano no son solamente importantes para el almacenamiento de gas natural, sino que también son canales que conectan diminutos poros y aumentan la conectividad, caso contrario a las rocas del yacimiento de permeabilidad ultra baja.

**1.1.7.3 Categoría III: Microfracturas Transgranulares:** A diferencia de las microfracturas a escala de grano, las microfracturas transgranulares (desplazamiento del grano) son más anchos y más largos. La longitud no está restringida por el tamaño de los granos minerales. Entre ellas se incluyen las fracturas que tienen trazas que son generalmente rectas vista en planta y de la sección transversal, lo que indica que son planas. Estas fracturas cortan los límites de grano y cementos sin tener ninguna relación consistente a los centros de grano o contactos de granos (Fig. 14, A, B).

Los límites de grano desplazados muestran que la apertura de la fractura fue normal (perpendicular), por la dilatación de las paredes de la fractura. Las más grandes son las fracturas transgranulares que cruzan varias decenas de granos y el cemento. Esta categoría también incluye las fracturas que tienen

microestructura grieta-sello y crecimiento de cristales de morfología idéntica a la de macrofracturas cercanas. En cuanto a la textura, estas fracturas son las versiones más pequeñas de las grandes fracturas. Las fracturas más cortas que se extienden a través de granos individuales y de cemento adyacente, así como fracturas diminutas que se localizan dentro de cemento o granos, tienen un aspecto similar y pueden corresponder a esta categoría. En la figura 14A se observa el recorrido de una microfractura de grano obtenida de una profundidad de 6930m (22737 pies). Técnica PPL. El material teñido rojo es epoxi en el espacio poroso fractura. En la figura 14B, la microfractura recorre los granos de cuarzo, feldespato y el cemento, la profundidad es de 6761m (22183 pies), técnica de XPL. En la figura 14C se observa una microfractura tectónica del yacimiento de gas de KF, la profundidad de 5.800 m (19.030 pies), su apertura es 10 a 30 micras, técnica SEM. La Figura 14D deja ver una amplia red de microfracturas tectónicas obtenidas de una profundidad de 6604m (21,667.7 pie), su apertura es 10 a 40 micras, técnica SEM.

**Figura 14. Microfractura grano de desplazamiento (flecha) en una sección delgada del yacimiento de gas de KF.**



Fuente: LIU, Chun. GUO, Qingxin. Characteristics and origin of microfracture in lower Cretaceous tight sandstone from Kuqa Foreland basin, NW China. 2013.

Una vez terminado el análisis de las secciones delgadas y demás muestras analizadas el yacimiento gasífero de Kuqa Foreland, los investigadores concluyeron que las microfracturas intragranulares y microfracturas de borde de grano tienen densidades altas, pero a pequeñas escalas. Sus efectos sobre la permeabilidad se pueden esperar que

sea pequeño, pero debido a su abundancia, son el principal almacenamiento de gas en estos yacimientos. La porosidad asociada con estas fracturas es comparable en magnitud a la del sistema de poros de la matriz. Por el contrario, las secciones delgadas con microfracturas transgranulares fueron menos comunes, ya que comprende sólo el 16% de todas las secciones delgadas. La densidad de microfracturas transgranulares es mayor alrededor de fallas y en las partes altas de las estructuras geológicas.

#### **1.1.8. Origen De Las Microfracturas<sup>8</sup>**

**1.1.8.1. Origen Tectónico:** Con la intensa compactación tectónica, la arenisca se densifica y se producen fracturas, lo que resulta en yacimientos fracturados con alta producción (Li Jun et al., 2011). Entre los tres tipos de microfracturas, la mayoría de las microfracturas transgranulares son de origen tectónico. Estas microfracturas tectónicas están presentes en la mayoría de rocas tipo areniscas. Están parcialmente llenos de calcita o anhidrita. Las microfracturas tectónicas son largas, tienen una distribución regular y son parte de las mismas poblaciones de macrofractura que se asocian con pliegues y empujes. Además, algunas microfracturas intragranulares también están relacionadas con la compresión tectónica.

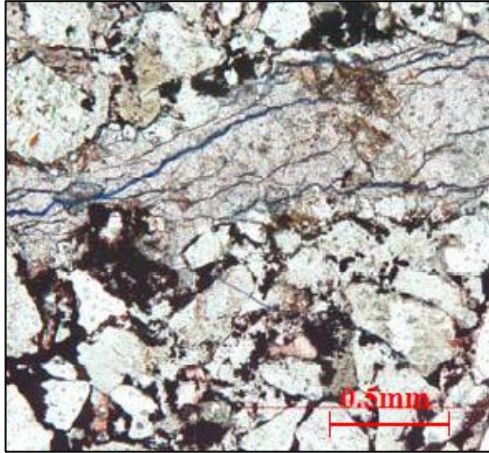
---

<sup>8</sup> LIU, Chun. GUO, Qingxin. Characteristics and origin of microfracture in lower Cretaceous tight sandstone from Kuqa Foreland basin, NW China. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology. IPTC 16738. 2013

**1.1.8.2. Origen de Sobrepresiones:** La microfracturas originada por sobrepresiones están asociadas con venas llenas de betún, y es posible que contengan betún en sí mismas. Una microfractura llena de bitumen generalmente es ancha y corta. En base a la geometría de estas microfracturas llenas de bitumen, son venas tensionales, que son productos de esfuerzos de extensión, las venas son perpendiculares a la dirección principal del esfuerzo mínimo. Se ha analizado que la compresión tectónica es uno de los principales factores de resultado en el incremento de la presión de poro. En el caso del yacimiento gasífero estudiando, el efecto del esfuerzo de extensión formado por movimientos tectónicos y los domos salinos desarrollados en los estratos son dos factores importantes para la formación de sobrepresiones en la cuenca Kuqa.

**1.1.8.3. Origen Diagenético.** Las microfracturas se definen como productos diagenéticos que se formaron durante la diagénesis física de la roca. Las fracturas diagenéticas pueden ser microfracturas transgranulares, microfracturas intragranulares y microfracturas de borde de grano. Las microfracturas transgranulares de este tipo son formadas durante la diagénesis y están presentes principalmente en los límites entre las areniscas y esquistos arcillosos paralelos a la estratificación. Están especialmente bien desarrolladas en rocas arcillosas (ver figura 15). Este tipo de fractura se desarrolla comúnmente a lo largo de microcapas, donde capas curvas están comúnmente llenas de minerales de arcilla. Las microfracturas intragranulares y microfracturas de borde de grano son fracturas diagenéticos ya que se formaron durante la compactación. Las microfracturas de borde de grano ocurren comúnmente junto con microfracturas intragranulares. La arenisca de fracturas intragranulares se debe principalmente a la intensiva compactación mecánica, las areniscas que tienen microfracturas borde de grano se asocia con una compactación intensiva y de sobrepresión.

**Figura 15. Fractura diagenética lo largo del plano de estratificación (campo KF) y paralela a los minerales aplanados en una sección delgada.**



Fuente: LIU, Chun. GUO, Qingxin. Characteristics and origin of microfracture in lower Cretaceous tight sandstone from Kuqa Foreland basin, NW China. 2013.

## **1.2. PROPAGACIÓN DE ONDAS P Y ONDAS S EN MEDIOS ELASTICOS**

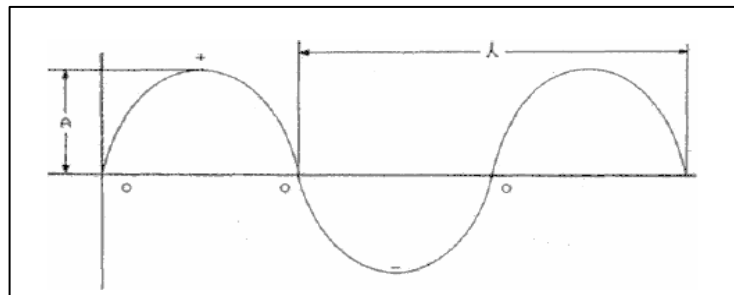
Actualmente la aplicación de las ondas en general es muy amplia, dependiendo de la aplicación se pueden encontrar varias definiciones que en lo abstracto resultan converger en un mismo fenómeno. En cierto caso especial se puede decir que “una onda es una señal reconocible que puede ser transferida de un lugar a otro de un medio con una velocidad de propagación reconocible” (G. B. Whithman, 1974); también se puede decir que una onda es una perturbación que se propaga en el espacio y en el tiempo manteniendo ciertas características discernibles. En estas dos definiciones hay una diferencia sustancial, haciendo hincapié en que la primera definición hace referencia a ondas que no necesitan un medio necesariamente para propagarse (vacío), ondas electromagnéticas y la segunda definición implica lo contrario, ondas mecánicas.

Dentro de las ondas mecánicas se encuentran las ondas sísmicas (acústicas), cuyo comportamiento de propagación de velocidades en medios porosos es un

tema de interés de suma importancia en la industria del petróleo, ya que son “los ojos que nos permiten ver e inferir físicamente el interior de los yacimientos”. Una onda sísmica se puede definir como la propagación de una perturbación en un medio elástico. Cuando una roca es sometida a cualquier tipo de esfuerzo esta sufre una deformación temporal. Dado que las rocas se comportan elásticamente, los estudios de propagación de ondas en medios rocosos han demostrado que el esfuerzo aplicado sobre ellas causa una perturbación (deformación), la cual se propaga a lo largo de toda la roca comportándose como una onda acústica con cierta velocidad. Esencialmente las ondas que se propagan en medios elásticos, son principalmente de dos tipos: Ondas de compresión y de corte.

**1.2.1. Características De Una Onda Acústica<sup>9</sup>.** Cuando se hace referencia a la acústica, se hace referencia a una vibración, un movimiento atrás y adelante, alternativo; es decir, se produce infinidad de veces pero de una forma ordenada. Cuando una partícula parte de un punto "O" y se desplaza hasta una posición máxima "+"; luego, se devuelve al punto "O", pero continúa su movimiento hacia atrás y logra otra posición de desplazamiento máximo "-"; y regresa al punto "O", ha realizado un ciclo (ver Figura 16). El concepto de ciclo está relacionado directamente con el período ( $A$ ), la frecuencia ( $f$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ).

**Figura 16. Relación entre la Amplitud ( $A$ ) y la Longitud de Onda ( $\lambda$ )**



Fuente: Curso de Ultrasonido Básico. Universidad Central de Venezuela. 2010.

<sup>9</sup> Curso de Ultrasonido Básico. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. 2010

Una onda acústica está definida por cuatro características principales:

- Período
- Frecuencia
- Amplitud
- Longitud de Onda

**1.2.1.1 Período.** El período  $T$ , es el tiempo que toma una partícula en realizar un ciclo completo.

**1.2.1.2 Frecuencia:** La frecuencia,  $f$ , es el número de oscilaciones de una partícula por segundo. Dentro de una misma onda, la frecuencia es la misma para todas las partículas, y es idéntica a la frecuencia del generador. La unidad Internacional de frecuencia es el Hertzio, donde:

1 Hertzio = 1 Hz = 1 Ciclo por Segundo.

1.000 Hertzios = 1 KHz = 1.000 Ciclos por segundo.

1.000.000 HERTZIOS = 1 MHz = 1.000.000 Ciclos por segundo.

Como podemos ver, el período y la frecuencia están relacionados, pues:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde,  $f$ =Frecuencia;  $T$ = Periodo.

**1.2.1.3 Amplitud:** La amplitud,  $A$ , es el máximo desplazamiento que realiza la partícula sometida a vibración, partiendo desde su posición "O".

**1.2.1.4 Longitud de Onda:** La longitud de onda,  $\lambda$  es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia. El período y la longitud de onda están relacionados, pues el período es el tiempo que toma una

partícula en recorrer una longitud de onda. Para todos los tipos de onda se cumple la siguiente relación.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad \text{Ec. 2}$$

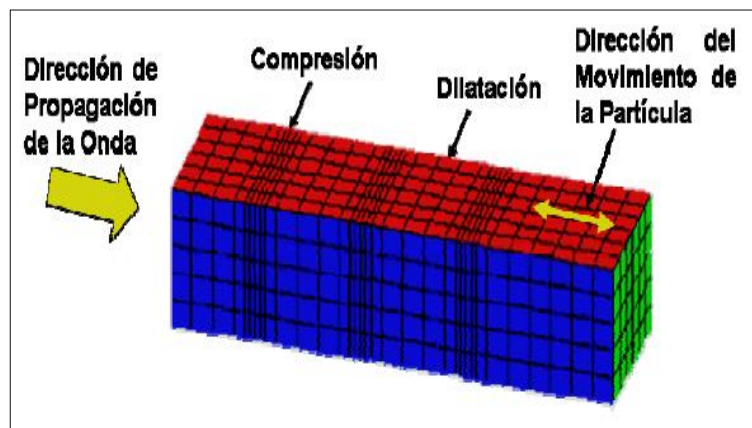
Donde,  $\lambda$ =Longitud de Onda,  $V$ =Velocidad de Onda,  $f$ =Frecuencia de Onda.

**1.2.1.5 Velocidad de Onda:** La velocidad, acústica es la distancia recorrida por las ondas en un medio en una unidad de tiempo; en otras palabras, es la velocidad de propagación del sonido en el medio. La velocidad acústica es una característica del material y en general, es constante para cada material dado, para cualquier frecuencia y cualquier longitud de onda. Sin embargo, esto no es rigurosamente exacto, pues dicha velocidad depende, especialmente en los gases y líquidos, de la presión, de la temperatura y de otros parámetros. Ahora bien, en muchos materiales sólidos, tales como los metales, ésta influencia se puede despreciar. Por ello, se puede tomar ésta velocidad, aproximadamente, como una constante del material, condición muy útil en los ensayos por ultrasonido.

**1.2.2 Ondas De Compresión (Ondas P).** También llamadas primarias, son ondas que se propagan por compresión y tensión. El movimiento de las partículas de roca por las ondas P consiste en una alternancia de contracciones y distensiones, es decir, se acercan y alejan entre sí moviéndose en la dirección de propagación de la onda (ver figura 17). Son, por tanto, ondas sonoras y pueden viajar a través de sólidos y líquidos. La condición para que una onda pueda propagarse en un medio es que el medio se comporte elásticamente. Tanto los sólidos como los líquidos son incompresibles ante un esfuerzo instantáneo, aunque admiten una cierta compresión de tipo elástico, es decir, recuperable. La velocidad de propagación ( $V_p$ ) depende de la densidad de la roca.

La velocidad es mayor, en general cuanto mayor es la densidad de las rocas, con este principio, en esta investigación se discretizará la parte sólida de la matriz de la parte embebida de aire que son las microfracturas, se prevé que la onda P tendrá velocidades mayores en la matriz, alrededor de los 2000 m/s a 5000 m/s dependiendo del tipo de roca y su porosidad; y velocidades menores alrededor de los 300 m/s a 1800 m/s en las microfracturas.

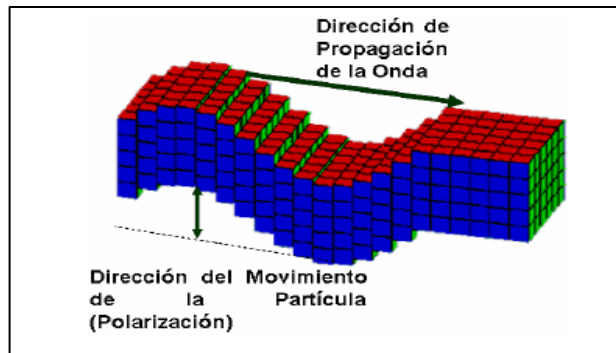
**Figura 17. Comportamiento Onda P**



Fuente: RUEDA MARTINEZ, Jenny Paola; MADERO PINZON, Hernán Darío. Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótrpos. UIS 2006.

**1.2.3 Ondas De Corte (Ondas S).** También llamadas secundarias o transversales, se propagan por movimientos perpendiculares a su dirección de propagación, siendo en eso semejantes a las de la luz. Aquí las partículas son desplazadas lateralmente, sufriendo un cizallamiento con respecto a las partículas adyacentes (ver figura 18). Las ondas S sólo se transmiten en los sólidos.

**Figura 18. Comportamiento Onda S**



Fuente: RUEDA MARTINEZ, Jenny Paola; MADERO PINZON, Hernán Darío. Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótricos. UIS 2006.

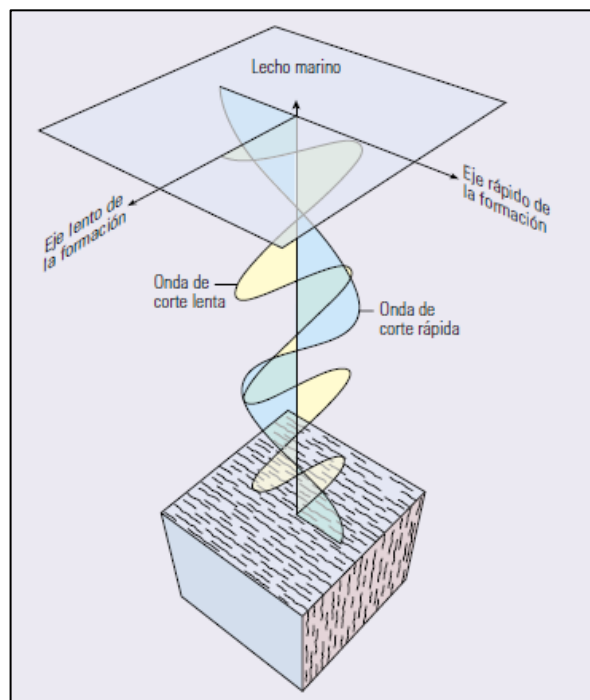
Este tipo de onda sirve para comprender y caracterizar los sistemas de fracturas presentes en los yacimientos, es importante para los programas de perforación de pozos sea verticales u horizontales y proyectos de recobro mejorado. Los esfuerzos presentes en el subsuelo hacen que la mayoría de las fracturas sean verticales y estén alineadas entre sí. Las ondas sísmicas sea P o S quizás no detecten las fracturas individuales que son más pequeñas que la longitud de onda sísmica, sin embargo, las ondas de corte pueden percibir las propiedades promedio de las fracturas dentro de un gran volumen para ayudar a determinar su orientación y densidad promedio.

Las ondas de corte que se propagan a través de este tipo de medio fracturado o se reflejan en él experimentan el fenómeno conocido como birrefringencia, o separación, de la onda de corte. La birrefringencia hace que una onda de corte se separe en dos ondas con diferentes velocidades, una rápida y otra lenta. El movimiento de las partículas de la onda S rápida se polariza en la dirección promedio del rumbo de la fractura, mientras que el movimiento de las partículas de la onda S lenta se polariza en dirección perpendicular al rumbo de la fractura (arriba). El análisis de datos sísmicos de componentes múltiples terrestres con este método ha sido utilizado en yacimientos carbonatados para identificar zonas

de alta densidad de fracturas que fueron validados subsiguientemente por las operaciones de perforación y producción.

En la figura 19 se observa la separación de una onda de corte en una onda rápida y una onda lenta después de la reflexión en un medio fracturado o anisótropo o luego de la transmisión a través del mismo. El movimiento de las partículas de la onda S rápida (azul) se polariza en la dirección promedio del rumbo de la fractura y, en el caso de la onda S lenta (amarillo), el movimiento de las partículas se polariza en dirección perpendicular al rumbo de la fractura. La diferencia en el tiempo de tránsito entre la onda rápida y la onda lenta está relacionada con la densidad de las fracturas<sup>10</sup>.

**Figura 19. Caracterización de fracturas con Onda S**



Fuente: BARKVED, Olav. Las diversas facetas de los datos sísmicos de componente múltiples. Oilfield Review. 2004.

<sup>10</sup> BARKVED, Olav. Las diversas facetas de los datos sísmicos de componente múltiples. SLB. Oilfield Review. 2004.

## 1.3 APLICACIÓN FÍSICA DE LA TOMOGRAFÍA

**1.3.1 Definición De Tomografía**<sup>11</sup> El término Tomografía está compuesto de dos partes, ambas con raíz griega: la primera “*tomos*” significa corte, y la segunda “*graphé*” que implica gráfico o dibujo. Por tanto “*Tomografía*” quiere decir “*técnica para la obtención de la imagen de una sección plana (2D) de un objeto tridimensional*”. Aunque primeramente se utilizó esta denominación en el campo de la Medicina para designar a la metodología que permite la visualización de órganos internos en 3 dimensiones (resolución de 1 mm.) utilizando un conjunto de emisores-receptores de rayos X y un computador (de ahí el nombre de Tomografía Axial Computarizada con el que habitualmente se designa, TAC), el procedimiento se desarrolló simultáneamente en Sismología para estudiar el interior de la Tierra, sin utilizar el vocablo tomografía hasta que se incorporaron los métodos iterativos con matrices.

**1.3.1.1 Historia de la Tomografía:** Esta técnica de inversión fue aplicada por primera vez en Sismología en 1976 por Aki, Christofferson y Husebye (Aki et al, 1977), utilizando como datos los telesismos registrados por el array NORSAR en Noruega. Posteriormente, Aki y Lee (1976) incrementaron considerablemente la resolución del método incluyendo los datos de sismos locales, usando como datos iniciales los sismos registrados por el array del U.S.G.S. instalado en California. Los primeros resultados utilizando métodos iterativos fueron presentados por Clayton y Comer (1984).

En 1984, Clayton definió “Tomografía Sísmica” de la siguiente forma: “La tomografía puede ser definida como la reconstrucción de un campo de distribución de una magnitud física cualquiera mediante el conocimiento de integrales de línea a su través. En Sismología, el análisis de variaciones laterales de la velocidad se

---

<sup>11</sup> BLANCO, María José. Tomografía lineal con residuos temporales del manto bajo la Península Ibérica. Cap. 2, Fundamento Físico. Universidad Complutense de Madrid. 2001.

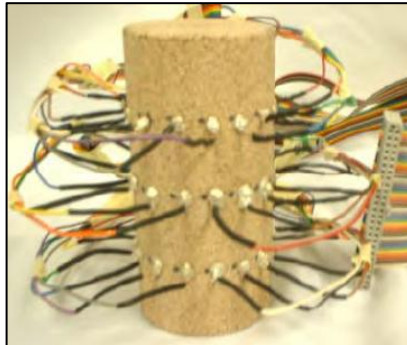
ajusta a esta definición si perturbamos la ecuación de tiempo de recorrido alrededor de un modelo de velocidad de referencia. El campo, en este caso, es la perturbación de la lentitud, y las observaciones son las desviaciones del tiempo observado respecto al calculado en el modelo.”

En Sismología se utilizan diferentes tipos de tomografía (Aki, 1993), dependiendo de la clase de datos y de la escala del estudio, en unas investigaciones obtienen la tomografía a partir de datos los residuos temporales, en otras se basan en la velocidad de fase o grupo de ondas superficiales, o formas de onda, también se ha aplicado la tomografía a estudios de estructura entre pozos, sísmica de reflexión y refracción; es el caso de esta investigación, la tomografía que se va a desarrollar en este trabajo de investigación es la que utiliza las velocidades de ondas de compresión y ondas de corte para poder diferenciar la parte continua matricial de la discontinua microfracturada con el fin de generar su representación física virtualmente.

A pesar de que la técnica parte de la Tomografía Sísmica, la Tomografía Acústica propuesta en esta investigación parte de los mismos principios físicos, ya que en ambas, se utilizan las Ondas Mecánicas de compresión y de corte, por lo tanto la inferencia entre *sísmico* y *acústico* hace referencia a la escala de trabajo.

**1.3.2 Tomografía Acústica.** Técnica que se utiliza para generar imágenes tridimensionales del interior de la tierra por medio de ondas acústicas (ondas mecánicas), en la escala de esta investigación se pretende generarlas a partir la excitación de cristales piezoeléctricos (PZT) aplicados en muestras de afloramiento y plugs sintéticos de cementos. La figura 20 representa la forma como debe ser el montaje de los PZT en una muestra para obtener tomogramas acústicos.

**Figura 20. Montaje de sensores eléctricos, técnica de Tomografía de Impedancia Eléctrica.**

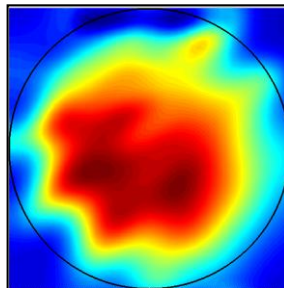


Fuente: STACEY, Robert. Electrical Impedance Tomography. 2006.

El parámetro de velocidad sea onda P o de onda S es la base de esta técnica para determinar las características del medio que está perturbando; la onda P se caracteriza por propagarse en medios sólidos y fluidos, siendo mayor la velocidad en sólidos, menor en líquidos y a su vez en gases; las ondas S por su parte no se propagan en fluidos.

En la figura 21 se muestra un Tomograma de velocidad de onda P obtenido a partir de una prueba uniaxial, las velocidades están en escala de menor a mayor en colores de azul a rojo, se difiere que la zona roja es la parte donde está la mayor concentración de carga (esfuerzo) y la azul es la zona donde la carga no está siendo aplicada directamente.

**Figura 21. Tomograma de velocidad de ondas P.**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Rocas. ICP. Status Quo. 2011

## 2. INSTRUMENTACIÓN GENERAL PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS

*“El coraje es una disposición a sentir grados pertinentes de temor y confianza en situaciones desafiantes”*

*Aristóteles*

El motor de un investigador es la motivación y esta es mayor cuando surge de la necesidad de mejorar un método, un proceso o una rutina de nuestra cotidianidad, la necesidad es la fuente de que cada día el hombre no se conforme con lo mismo y comience a buscar nuevas alternativas para mejorar sus condiciones de vida o de trabajo. Desde que el hombre ha tenido razón pensante, siempre se ha querido saber cómo es la estructura interna de la tierra, dudándose si era sólida, líquida, vapor o una combinación de los mismos, de igual manera, los terremotos despertaban gran inquietud desde los castigos divinos hasta explosiones internas de la tierra, todos estos interrogantes se fueron aclarando hasta finales del siglo XIX cuando se analizó que la fuente de los terremotos eran por desplazamiento de las capas internas de la tierra y como consecuencia de esos desplazamientos se liberaba energía acumulada por medio de temblores, dicha energía liberada se transportaba en forma de ondas mecánicas, estas ondas mecánicas comenzaron a ser registradas en unos dispositivos llamados sismógrafos, creado por John Milne en 1880, finalmente el comportamiento de este tipo de ondas determinaron que existían ondas de compresión y ondas de corte, la primera puede transportarse en sólidos y fluidos, mientras que la segunda solamente en sólidos, de esta manera estudios recientes han determinado que el núcleo interno y el manto de la tierra es sólido ya que se registran valores de velocidad de ondas de compresión y de corte, caso contrario, es el núcleo exterior de la tierra debido a que la velocidad de onda corte es nula y solo se registran de ondas de

compresión, por lo tanto se concluye que es una mezcla líquida compuesta de hierro y níquel.

Todas las grandes dimensiones surgen del producto generado por las pequeñas dimensiones, en este caso las fracturas son el resultado de la propagación de microfisuras, ambas, se pueden presentar en formaciones geológicas tanto en el subsuelo como en superficie (afloramiento). Para la industria del petróleo, los Yacimientos Naturalmente Fracturados son una fuente potencial de reservas de hidrocarburos y como tal la caracterización de este tipo de yacimientos es algo que amerita gran importancia, en el caso de esta investigación se estudiarán muestras de superficies que presenten rocas naturalmente fracturadas, de litología sedimentaria y carbonatada. Una vez tomadas estas muestras se caracterizará la presencia de microfisuras al interior de estos especímenes mediante un equipo que tenga la capacidad de soportar la roca (geometría cilíndrica, cuyos diámetros están entre 1,25" y 2", y el diámetro sea el doble del diámetro respectivo) y poder hacer un barrido de señales acústicas (ondas P y ondas S) con el fin de caracterizar la roca en función del comportamiento de las ondas al interior de la misma, para generar las señales acústicas, se utilizará una serie de cristales piezoeléctricos (PZT) que generen ondas P y Ondas S. El equipo también estará formado por un Generador de Pulsos de Tensión, el cual excitará los cristales a vibrar y se emitirán las ondas, finalmente, estas ondas son recibidas por un Sensor de Señales u Osciloscopio, permitiendo cuantificar el tiempo de propagación de la señal a través de la roca.

## **2.1 CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS (PZT)<sup>12</sup>**

Con el fin de entender la metodología aplicada, la cual se basa en mediciones acústicas a escala de laboratorio, se debe mencionar algunas generalidades de

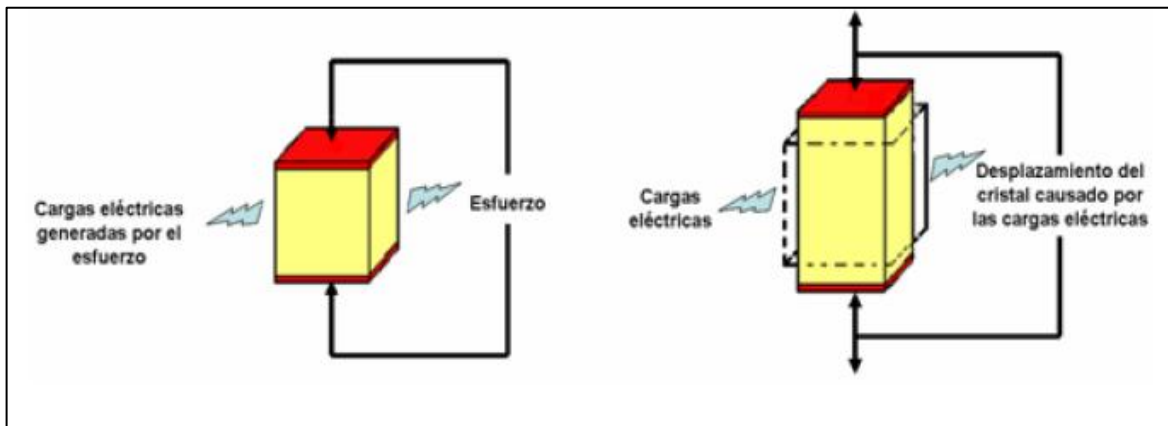
---

<sup>12</sup> BPO, Boston Piezo-Optics Inc. An Introduction to Piezoelectric Transducer Crystals. 2013

los dispositivos empleados como emisores y receptores de ondas de compresión y de corte.

**2.1.1 Efecto Piezoeléctrico.** Es uno de los principios físicos más importantes de esta investigación. La palabra “piezo” se deriva de la palabra Griega:  $\pi\epsilon\zeta\omega$  que significa estrechar o apretar. En 1880 Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se generaban cargas eléctricas en éste. Ellos llamaron a este fenómeno “el efecto piezoeléctrico”. Más tarde, los Curie verificaron que un campo eléctrico aplicado al cristal proporcionaba una deformación al material. Este efecto era referido como “efecto piezo inverso”. Los materiales piezoeléctricos, por lo tanto, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa, este principio físico se puede observar en la figura 22.

**Figura 22 Tomograma de velocidad de ondas P.**



Fuente: RUEDA MARTINEZ, Jenny Paola; MADERO PINZON, Hernán Darío. Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótrpos. UIS 2006.

**2.1.2 Materiales Piezoeléctricos.** Existen dos tipos de materiales piezoeléctricos, los naturales y sintéticos. Dentro de los naturales encontramos los cristales de cuarzo y turmalina y dentro de los sintéticos se encuentran la sal de Rochelle, el titanato de Bario y algunos componentes cerámicos como PZT ( $Pb[ZrTiO_3]$ ) - Lead

Zirconate Titanate, lo cual traduce Titanato Circonato de plomo), metaniobato de plomo, el fluoruro de polivinilideno (PVF2 o PVDF), trifluoroetileno TrFE P (VDF/TRFE), el nylon y la polyurea).

La diferencia de potencial aplicada a estos materiales depende del espesor del cristal y es de hasta 10 kV. Al desaparecer el campo eléctrico, los cristales de la cerámica no se pueden desordenar debido a las tensiones mecánicas acumuladas. Las cerámicas piezoeléctricas cuentan con una gran estabilidad térmica, magnética y física. Su principal desventaja es la sensibilidad térmica de sus parámetros en ambientes donde la temperatura se acerca a la temperatura de Curie.

**2.1.3 Características De Los Cristales Piezoeléctricos.** Dentro de las principales características de los cristales piezoeléctricos se encuentran:

**2.1.3.1 Clase de cristal:** Con la elección de cada clase de cristal se puede variar el poder resolutivo y la sensibilidad de los transductores, los cuales transforman ondas eléctricas en ondas acústicas. Los cristales piezoeléctricos a utilizados en esta investigación son de Zirconato Titanato de Plomo PZT-5A, estos tienen un comportamiento aceptable al tener buena estabilidad a cambios de las condiciones ambientales y producen señales de alto nivel de tensión, por tal razón estos son esenciales para la generación de señales mecánicas a partir de eléctricas y viceversa.

**2.1.3.2 Diámetro del cristal:** Entre mayor sea el diámetro del cristal se obtiene una mayor profundidad de penetración. Así mismo, se obtiene una mayor longitud en un campo cercano (es la distancia en la que la propagación de la onda no es interrumpida) y una menor divergencia. En el caso de esta investigación se utiliza frecuencias ultrasónicas mayores a 1 MHz, por lo tanto se espera que los cristales piezoeléctricos sean dimensionalmente pequeños, el efecto de la profundidad de

penetración no tiene tanto impacto ya que se utilizaran rocas entre 1 y 2 pulgadas de diámetro, con relación longitud-diámetro de 2.

**2.1.3.3 Frecuencia:** Con la elección de una mayor frecuencia se obtiene mayor posibilidad para la identificación de discontinuidades pequeñas, mayor longitud de campo cercano, mayor poder resolutivo, menor profundidad de penetración y mínima divergencia.

**2.1.4 Especificaciones De Los Cristales Piezoelectricos Para La Detección De Microfracturas.** Una vez comprendido el principio físico de los cristales piezoeléctricos, basado en el efecto piezoeléctrico, se cuestionó las características que debían tener los mismos según se mencionó en el ítem 2.1.3 del presente capítulo, con el fin de pedirle a los fabricantes la entrega de los cristales con determinadas especificaciones, en especial, *la frecuencia de onda* generada. El capítulo 1, en el ítem 1.1.4 se describe físicamente las microfracturas con espesores menores a 1 mm y longitudes menores a 20 mm, en el ítem 1.1.5 como discontinuidades físicas de una matriz rocosa de dimensiones milimétricas y submilimétricas, en el ítem 1.1.7 tabla 4, se clasifican como intragranulares, de borde de grano y transgranulares, siendo las últimas el tipo de microfracturas que se detectará en la presente investigación por medio de la técnica propuesta de *tomografía acústica*, ya que son las más grandes en su género abarcando desde cientos de micras hasta varios centímetros de largo; por lo tanto, se necesitarán cristales piezoeléctricos que puedan detectar al menos las dimensiones máximas de las microfracturas intragranulares, para el caso de la intragranulares y borde de grano, existen otras técnicas más resolutivas como lo es el *barrido por microscopía electrónica*.

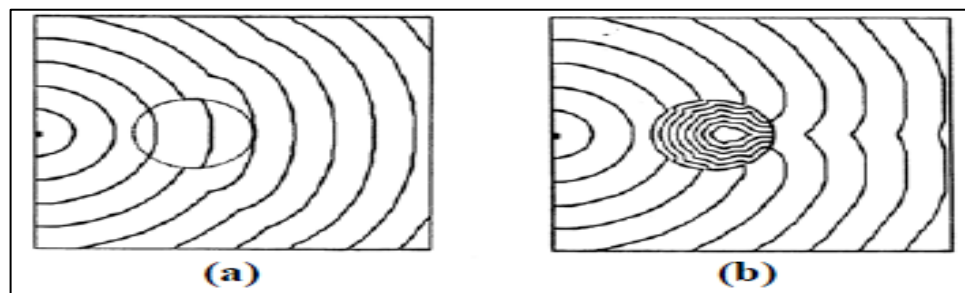
A continuación se mencionarán las especificaciones de los cristales en el orden prioritario de caracterización:

**2.1.4.1 Longitud de Onda**<sup>13</sup>: Longitud de onda es la velocidad de la onda en la muestra de roca dividida por la frecuencia de resonancia del transductor ó cristal piezoeléctrico. Frecuencias utilizadas comúnmente van desde 75 kHz a 3 MHz.<sup>14</sup>

La interacción entre las ondas acústicas y las anomalías depende principalmente del tamaño de las mismas ( $D$ ) versus la longitud de onda de la propagación ( $\lambda$ ).

Considérese una anomalía de tamaño  $D$  insertada en un medio homogéneo. Cuando  $D \ll \lambda$ , la onda 've' al medio como continuo, es decir no detecta la anomalía; sin embargo cuando  $D \sim \lambda$  ó  $D > \lambda$ , aparece el fenómeno de difracción, en donde los frentes de onda contornean la inclusión en lugar de atravesarla, ver figura 23.

**Figura 23. Efectos de la Difracción en el tiempo de viaje y propagación. (a)  $D \ll \lambda$ ; (b)  $D \sim \lambda$  ó  $D > \lambda$**



Fuente: IMHOF, Armando Luis. Caracterización De Arenas Y Gravas Con Ondas Elásticas: Tomografía Sísmica En Cross Hole. 2008.

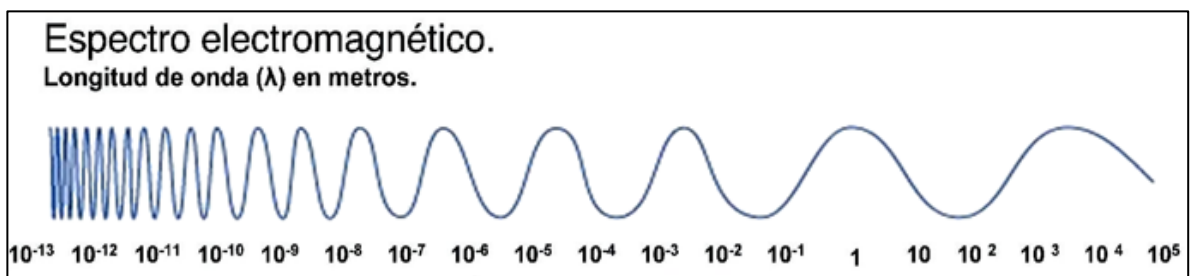
En el análisis de este criterio, se ha tomado como referencia microfisuras transgranulares con dimensiones máximas de 1 mm de apertura y 20 mm de largo. La onda acústica sea compresiva o cortante tiene generar una longitud de onda que según el espectro electromagnético detecte dicha dimensiones (ver

<sup>13</sup> IMHOF, Armando Luis. Caracterización De Arenas Y Gravas Con Ondas Elásticas: Tomografía Sísmica En Cross Hole. Universidad Nacional del Cuyo. 2008

<sup>14</sup> Norma: ASTM D 2845-08. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock1. 2008

figura 24), luego una longitud de onda viable para esta investigación es que sea de 1 mm ó  $10E-3$  m ya que podría detectar la microfractura tanto por largo como ancho, sin embargo, para no tener una longitud de onda igual a la dimensión máxima crítica de la microfractura (1 mm) y evitar una probable no detección, se definió esta como de 0.8 mm ó  $8E-4$  m.

**Figura 24 Visualización de la longitud de onda en función del espectro electromagnético**

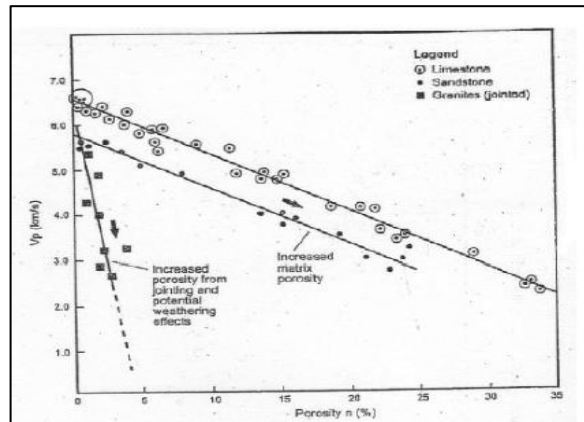


Fuente: ACEVEDO, M. Apuntes de Astronomía. [online]. Calidad del Cielo. 2013. Disponible en internet: <URL: <http://mauricio1949.blogspot.com/2013/03/calidad-del-cielo.html>>.

**2.1.4.2 Velocidad de Onda.** Teniendo definida la longitud de onda, se debe encontrar la velocidad del medio de las ondas compresivas u ondas P y las ondas de corte u ondas S, para esto se investigó en la literatura las velocidades de onda P y onda S experimentales en litologías sedimentarias (rocas areniscas) y en litologías carbonatadas (rocas calizas).

Para el caso de las areniscas y calizas, se debe tener en cuenta que la velocidad de *Onda P* está en función de la porosidad y es inversamente proporcional, ver figura 25 (Fourmaintraux, 1995).

**Figura 25. Velocidad de Onda en función de la porosidad: Calizas, Areniscas y Granitos**



Fuente: FOURMAINTRAUX, D. Quantification des discontinuities des roches et des massifs rocheux. Rock Mech. 1995

En cuanto a la velocidad de onda S, es fundamental para calcular la anisotropía del medio, en este caso se tomaron los datos de Sheriff & Geldart, 1991 (ver tabla 5). Finalmente tanto para la onda P y onda S, las velocidades en estos medios son:

**Tabla 5. Velocidades Acústicas en Areniscas y Calizas**

VELOCIDAD DE ONDA P ARENISCAS	
Porosidad	Velocidad (m/s)
5	4900
40	1900
VELOCIDAD DE ONDA S ARENISCAS	
Velocidad (m/s)	2150
VELOCIDAD DE ONDA P CALIZA	
Porosidad	Velocidad (m/s)
Baja	3500
Alta	1900
VELOCIDAD DE ONDA S CALIZA	
Velocidad (m/s)	1350

**2.4.1.3 Frecuencia:** La frecuencia es directamente proporcional a la velocidad de la onda en el medio e inversamente proporcional a la longitud de onda (Ec.2).

A partir de la Ecuación 2:

$$f = \frac{V}{\lambda}$$

Se generó la siguiente tabla con el fin de determinar cuál era la frecuencia óptima para este tipo de medios y poder entregarles a los fabricantes este dato.

**Tabla 6. Frecuencias Acústicas en Areniscas y Calizas**

<u>CRISTAL ONDA P</u>		
<i>Velocidad (m/s)</i>	$\lambda$ (m)	<i>F (MHz)</i>
ARENISCAS		
4900	$8 * 10^{-4}$	6,125
1900	$8 * 10^{-4}$	2,375
CALIZA		
3500	$8 * 10^{-4}$	4,375
1900	$8 * 10^{-4}$	2,375
<u>CRISTAL ONDA S</u>		
<i>Velocidad (m/s)</i>	$\lambda$ (m)	<i>F (MHz)</i>
ARENISCAS		
2150	$8 * 10^{-4}$	2,688
CALIZA		
1350	$8 * 10^{-4}$	1,688

A nivel mundial existen pocos fabricantes de cristales piezoeléctricos que generen este tipo de dispositivos con especificaciones tan especiales para investigaciones particulares como este caso, Boston Piezo Optics, es una compañía estadounidense que ofreció la fabricación de los cristales bajo las siguientes especificaciones, las cuales son óptimas para el desarrollo de la investigación y por lo tanto con ellos se formalizó la adquisición de los mismos, ver tabla 7:

**Tabla 7. Frecuencias PZT-5A**

COTIZACIÓN BOSTON PIEZO OPTICS INC	
CRISTAL ONDA P	
Material	PZT -5A
Cantidad	15
Diámetro (mm)	5
Espesor (mm)	0,41
Frecuencia (MHz)	5
CRISTAL ONDA S	
Material	PZT -5A
Cantidad	15
Diámetro (mm)	5
Espesor (mm)	0,30
Frecuencia (MHz)	3

Se puede observar que Boston Piezo Optics ofrece cristales de material PZT, expuesto anteriormente, donde los cristales PZT-5A de Compresión o que generan la Onda P tienen una frecuencia fundamental de 5 MHz y los cristales PZT-5A de Corte o que generan la onda S tienen una frecuencia fundamental de 3 MHz, si se comparan con las frecuencias calculadas se puede concluir que satisfacen las exigencias de la investigación, a pesar que la frecuencia máxima de la Onda P en teoría sea mayor que la generada por los fabricantes, por lo general las areniscas microfracturadas no presentan alta porosidad.

Otra característica importante es el espesor de los cristales, oscilan entre 0,41 mm para los de onda P y 0,30 mm para los de onda S, es concordante debido a generación de frecuencias ultrasónicas de los mismos.

## 2.2 GENERADOR DE PULSOS<sup>15</sup>

El pulsador empleado es de marca SOFRANEL modelo 5055 PR (ver figura 26), el cual es un generador de pulsos. Este es un generador de señales que tiene capacidad de entregar 50 V a una carga de 50Ω. Su ancho de pulso es variable (1 – 10 μs), y ofrece repeticiones de 20 a 100 rep/s. Además presenta un pulso de disparo para sincronizar con el osciloscopio.

**Figura 26. Pulsador SOFRANEL 5055 PR**



## 2.3 OSCILOSCOPIO ELECTRÓNICO<sup>16</sup>

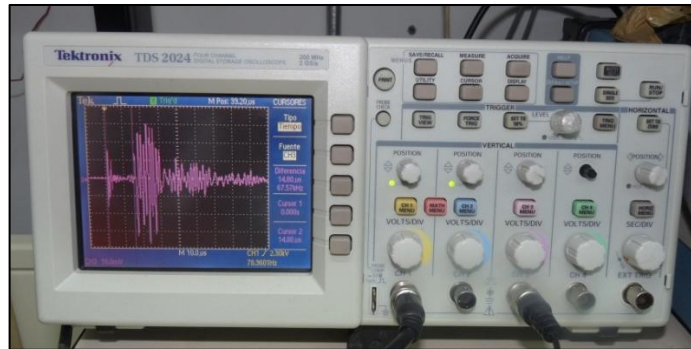
El osciloscopio utilizado es de marca TEKTRONIX TDS 2024 de cuatro canales (ver figura 27). Este tipo de aparato permite mostrar las señales del transmisor y del receptor simultáneamente, con controles individuales. Este equipo tiene respuesta en frecuencia plana y es activado por el generador de pulsos. (Galviz y Valera 2004).

---

<sup>15</sup> RUEDA MARTINEZ, Jenny Paola; MADERO PINZON, Hernán Darío. Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótropos. UIS 2006.

<sup>16</sup> RUEDA MARTINEZ, Jenny Paola; MADERO PINZON, Hernán Darío. Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótropos. UIS 2006.

**Figura 27. Osciloscopio TEKTRONIX TDS 2024**



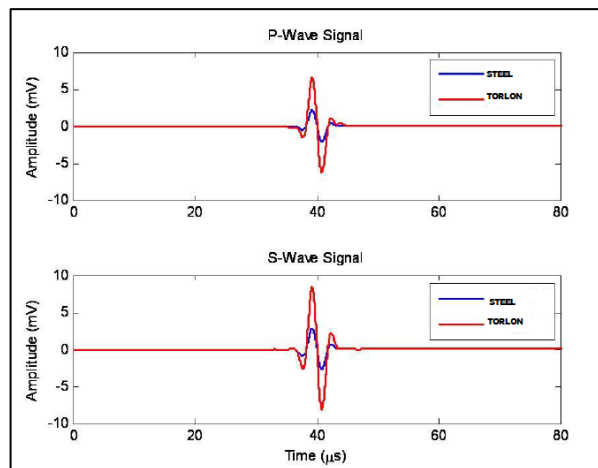
## **2.4 PROPUESTA DEL DISPOSITIVO DE BARRIDO DE SEÑALES EN LA ROCA (DBSR)**

Es fundamental que la parte electrónica del equipo se complemente con la parte mecánica donde se soportarán los Cristales Piezoeléctricos PZT-5A o simplemente los PZT de ahora en adelante, la muestra o roca fracturada a analizar y que se pueda escanear (barrer) verticalmente toda la roca con un anillo de PZT mediante la inversión de ondas acústicas. Este ítem explicará la propuesta de realizar un dispositivo llamado DISPOSITIVO DE BARRIDO DE SEÑALES EN LA ROCA (DBSR) para que en futuras investigaciones que referente a tema de la detección y cuantificación de microfracturas lo puedan tener en cuenta y como objetivo principal optimizar el proceso de adquisición de las señales acústicas.

**2.4.1 Bosquejo General Del DBSR.** El DBSR físicamente en su mayoría de partes debe ser fabricado de un material que sea aislante eléctricamente (no metálico), un plástico polimérico puede ser una muy buena opción, entre ellos el Torlón y el Duralón, ya que se ha comprobado en otras investigaciones, en especial que el material que soporta los PZT interfiere en la calidad de las señales

negativamente<sup>1718</sup>. En la figura 28 se puede observar el efecto negativo en utilizar el acero como material de soporte de los PZT disminuyendo la calidad de la señal (amplitud) respecto al Torlón, esta disminución de energía puede estar asociada a la impedancia y al índice de refracción de los materiales en mención.

**Figura 28. Efecto de la amplitud de señal de onda P y S respecto al material (Acero-Torlón) como soporte de los PZT**



Fuente: WOLF,K. Laboratory Measurements And Reservoir Monitoring Of Bitumen Sand Reservoirs. Stanford University. 2010

La estructura en general es portátil y el diseño se muestra a continuación en la figura 29:

1. Estructuras Bases.
2. Columnas.
3. Tornillo Principal.
4. Discos de Movimiento.
5. Guías de Disco de Movimiento.
6. Portatornillos de los PZT.

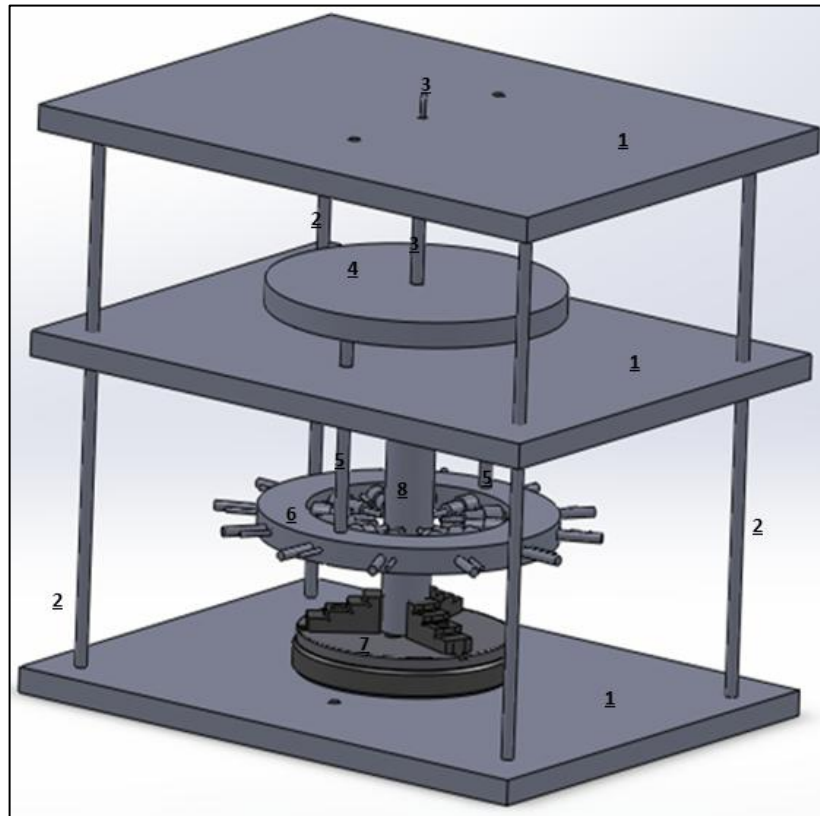
---

<sup>17</sup> WOLF,K. Tesis Doctoral: Laboratory Measurements And Reservoir Monitoring Of Bitumen Sand Reservoirs. Chapter 2: Ultrasonic Laboratory Equipment Design. Stanford University. 2010

<sup>18</sup> IMHOF, Armando Luis. Caracterización De Arenas Y Gravas Con Ondas Elásticas: Tomografía Sísmica En Cross Hole. Universidad Nacional del Cuyo. 2008

- 7. Copa de Sujeción.
- 8. Muestra.

**Figura 29. Diseño de dispositivo DBSR para la adquisición de señales**



El DBSR está conformado por 3 Estructuras Bases (1) que le dan equilibrio a las demás partes del dispositivo, a su vez 4 Columnas (2) soportan a las Bases Estructurales. La dinámica del DBSR consiste en escanear verticalmente por medio de un Portatornillo de los PZT (6) la muestra o roca fracturada (8), el movimiento es transmitido al Portatornillo a partir de un Tornillo Principal (3) el cual tiene una manivela en la parte superior y su movimiento es únicamente radial, más no vertical, encontrándose entre las dos primeras Estructuras Bases. El Tornillo Principal está acoplado al Disco de Movimiento (4) transmitiéndole el movimiento vertical ya que este tiene restringido el movimiento radial, a su vez el movimiento vertical es transmitido a Portatornillos de los PZT (6) por medio de dos Guías del

Disco de Movimiento (5) y de esta forma se realizará el escaneado (barrido) verticalmente a la roca. Finalmente la Muestra estará soportada sobre una Copa de Sujeción, la cual tendrá un mecanismo de “mordazas” para poderse ajustar al diámetro de la muestra que oscila entre 1 y 2 pulgadas, el largo, en lo posible, debe cumplir con la especificación de relación longitud-diámetro igual a 2 o 2,5 ( $L/D= 2 - 2.5$ )<sup>19</sup>.

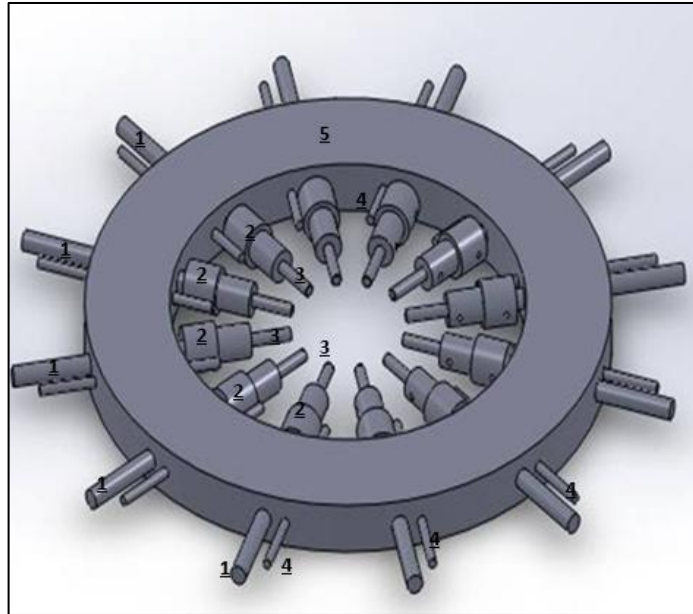
**2.4.1.1 Portatornillos de los PZT.** El Portatornillos de los PZT (6) es un elemento fundamental del DBSR, sus funciones principal es ser soporte de los 12 PZT tanto Compresionales (Onda P) como de Corte (Onda S), acercar y alejar a los PZT a la muestra con los tornillos de ajuste garantizando que no se rayen en el contacto con la roca, ya que esto puede generar alteraciones en la señal y daño irreparable en el PZT, ejercer un buen ajuste para vibrar y finalmente desplazarse verticalmente para realizar el escaneo por toda la roca, ver figura 30.

Se ha escogido la cantidad de 12 PZT ya que con este número de cristales se garantiza la generación de un enmallado de señales (vista superior de la roca) proyectando un corte a la altura que se encuentre el Portatornillos de los PZT y una óptima resolución (matriz 51x51) en donde se podrá observar con más detalle la parte interna de la muestra.

---

<sup>19</sup> Norma ASTM D4543-08: Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances. 2008

**Figura 30. Diseño Portatornillos de los PZT**



La estructura física del Portacristal de los PZT está formada los siguientes elementos:

1. Tornillos de Ajuste.
2. Bases de Alojamiento de los Portacristales.
3. Portacristales.
4. Guías de Tornillo de Ajuste.
5. Aro Portatornillos.

La dinámica del Portatornillos de los PZT consiste en que los 12 Tornillos de Ajuste (1) correspondientes para los 12 Cristales puedan transmitir el movimiento mediante un avance de enroscamiento a las 12 Bases de Alojamientos de los Portacristales (2) y estas a los 12 Portacristales (3) respectivamente, para poder acercar y alejar los cristales a la muestra. Estas tres partes mencionadas no conforman un solo elemento, sino que son una serie de acoplamientos que tienen un movimiento mecánico. La función de los Tornillos de Ajuste es netamente

transmitir el movimiento (horizontal-radial, tipo enroscamiento) a las Bases de Alojamiento de los Portacristales, estos por su parte tiene dos funciones que consisten en también transmitir el movimiento a los Portacristales, pero fundamentalmente actúan como una especie de “rotula” permitiendo que no se transmita el giro radial al Portacristal que ejerce el Tornillo de Ajuste cuando se está enroscando para avanzar o desenroscar para alejarse de la muestra, estas Bases a pesar que son rotulas no girarán ya que están fijadas con unas Guías de Tornillo de Ajuste (4). Finalmente, los Portacristales en total son 24, 12 para los cristales de Onda P y 12 para los de Onda S, su utilidad consiste en alojar los cristales bajo un ajuste que permita la vibración de estos cuando estén en contacto con la muestra, estos como parte de acoplamiento se pueden instalar y desinstalar de las Bases permitiendo que se pueda hacer un escaneo de ondas P y ondas S de forma independiente. La importancia radica en que el movimiento en estos elementos solamente es horizontal (acercamiento-alejamiento a la muestra) y no horizontal-radial como lo transmite los Tornillos de Ajuste, esto genera que los cristales cuando estén acercándose a la muestra para hacer contacto, este sea puntual y controlable permitiendo no rayar el cristal en lugar si el movimiento fuera horizontal-radial.

El sistema de cableado estará sujeto a los PZT y se incorporará a través de un orificio axial que tendrá los Tornillos de Ajustes, las Bases y los Portacristales. Para verificaciones detalladas como dimensiones y acoplamiento de cada uno de los elementos del DBSR ver ANEXOS al final del libro.

### 3. MUESTRAS

*"En el campo de la investigación el azar no favorece  
más que a los espíritus preparados"*

*Louis Pasteur*

En los anteriores capítulos se ha indagado las características fundamentales de las rocas que se deben analizar, estas son principalmente la generación de microfracturamiento y la propagación de ondas acústicas en este tipo de medios, de igual manera, se ha planteado una instrumentación general para adquirir señales acústicas en las muestras propuestas, hasta este punto la investigación es solamente teoría; sin embargo, esta se debe complementar con la práctica que conlleva la manipulación de instrumentos, equipos y software. La práctica abarca desde la búsqueda en afloramientos muestras representativas de analizar, la creación de modelos controlados (cementos) para validar la técnica propuesta hasta la adquisición de señales y posterior generación de tomogramas acústicos.

En este capítulo se mostrará los distintos puntos estratégicos en el departamento de Boyacá y Santander en la que el autor fue a muestrear rocas que tuvieran alta intensidad de microfracturamiento, la ubicación de los puntos fue obtenida por la consulta hecha a profesores de geología que a lo largo de sus experiencias en salidas de campo han tenido la oportunidad de observar y caracterizar los afloramientos intervenidos.

### 3.1 MUESTREO<sup>20</sup>

Estadísticamente muestrear es una herramienta de investigación científica, cuya función básica es determinar que parte de una población debe examinarse, con la finalidad de hacer inferencias sobre dicha población. Por medio de esta herramienta se obtendrán las mejores muestras que representen la intensidad de microfracturamiento de afloramientos específicos.

**Figura 31. Tipos De Muestreo**

<b>MUESTREO PROBABILÍSTICO</b>	<b>MUESTREO NO PROBABILÍSTICO</b>
Es el proceso donde se conoce la probabilidad que tiene cada elemento en integrar la muestra.	Es el procedimiento de selección en el que se desconoce la probabilidad que se tienen de los elementos de la población para integrar la muestra.
<b>Aleatorio Simple:</b> Consiste en la selección de n fragmentos o unidades del lote, de modo que todas las muestras posibles de tamaño no tengan la misma probabilidad de ser elegidas, las muestras se toman en espacios de tiempo o espacio variables y distribuidos al azar.	<b>Casual:</b> Es un procedimiento que permite elegir arbitrariamente los elementos sin un juicio o criterio establecido.
<b>Sistemático:</b> En este caso las extracciones de las muestras son determinadas según una regla fija, las muestras se toman en una malla regular, en intervalos regulares de tiempo y espacio.	<b>Intencional:</b> En este caso los elementos son escogidos con base en criterios o juicios preestablecido por el investigador.
<b>Estratificado:</b> Las muestras se toman aleatoriamente dentro de un estrato. Un estrato corresponde a una sección del tiempo o del espacio en tamaño constante, las muestras se agrupan en poblaciones homogéneas (capas, estratos).	<b>Por cuotas:</b> Consiste en dividir a la población bajo estudio en subgrupos o cuotas según ciertas características: Edad, sexo, color, etc.

<sup>20</sup> CASAL, Jordi. Tipos de Muestreo. Universidad Autónoma de Barcelona. 2003

Una vez definidos la teoría de muestreo, es importante resaltar que la población son todas las rocas extraídas en los afloramientos, las muestras son aquellas que presenten microfrazuras, por ende, el evento probabilístico es la presencia de microfrazuras en las muestras.

### **3.2 SALIDA 1: ESTACIÓN 1, VÍA SAMACÁ - PUENTE DE BOYACÁ (BOYACÁ)**

Las primeras salidas se hicieron en el sector central de la cordillera oriental, alrededor de los municipios de Samacá y Puente de Boyacá en el departamento de Boyacá. En la Estación 1 (figura 31) se muestreó la formación Los Pinos caracterizada por la litología de arenisca de cuarzo de grano fino<sup>21</sup>. El punto de muestreo fue a un costado de la carretera y las coordenadas exactas son: Latitud: 5° 28' 55.76" N; Longitud: 73° 28' 11.78" O. La estructura presenta un rumbo N20E.

**Figura 31. Fm. Los Pinos**

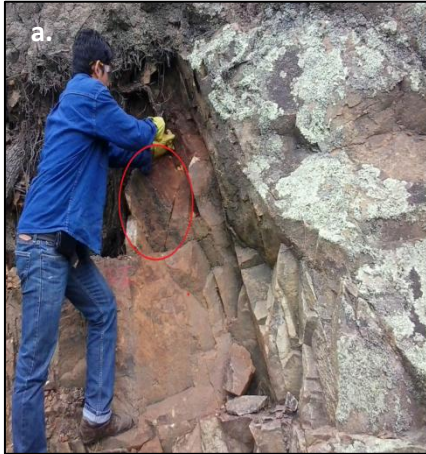


---

<sup>21</sup> GUARÍN, M. Análisis estratigráfico, petrográfico y geoquímico de los episodios fosfáticos de la parte inferior y media del grupo Guadalupe en el sector central de la cordillera oriental, Colombia. UNAL. 2011

**3.2.1 Extracción Arenisca, Estación 1.** El método de extracción de muestras aplicado en estas dos primeras salidas en el departamento de Boyacá consistió en ir a sectores descubiertos, es este caso de la formación Los Pinos donde se observará plenamente la estratigrafía del afloramiento, los sectores se podían ubicar bajo los parámetros de alto índice de fracturamiento y de llegar a encontrar un anticlinal ubicar sus flancos debido a que existe un mayor concentración local de esfuerzos en esos puntos. Para esta estación, como se muestra en la figura 32a, se ubicó una zona bajo el primer parámetro descrito anteriormente y se procedió a extraer de forma manual con cincel y un martillo de geólogo un bloque representativo del afloramiento de tal forma de no inducir microfisuras lo más posible, este bloque fue conservado una vez extraído, rotulado y trasladado al área de corte del ICP (figura 32b).

**Figura 32. a. Extracción manual Arenisca – Fm. Los Pinos b. Muestra Rotulada y cubierta**



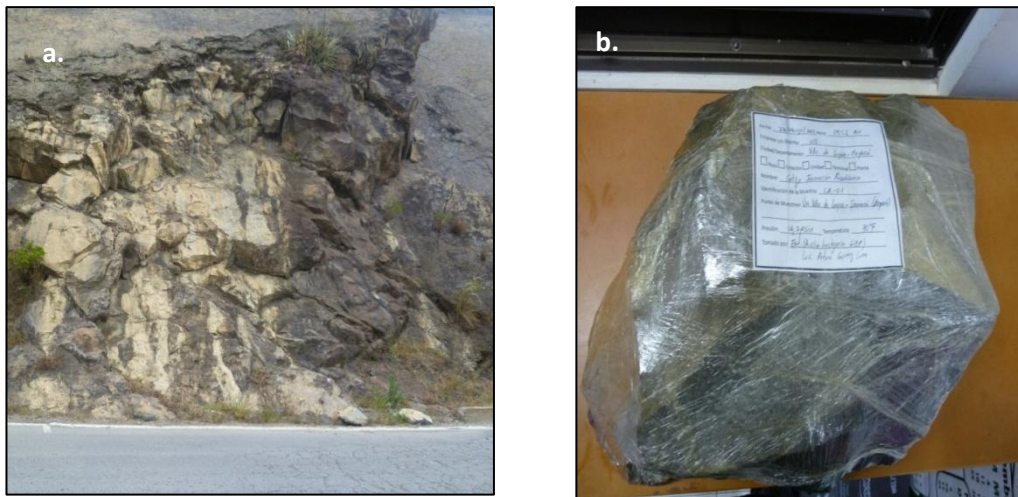
### **3.3 SALIDA 1: ESTACIÓN 2, VÍA VILLA DE LEYVA - SAMACÁ (BOYACÁ)**

El objetivo en esta Estación 2 (figura 33a) fue muestrear rocas de la formación Rosablanca, en inmediaciones de los municipios de Villa de Leyva y Samacá, esta

formación se caracteriza por tener litología de calizas limpias con registros fosilíferos, de color gris claro y con algunas intercalaciones esporádicas de shales negros<sup>22</sup>. En esta Estación 2, se muestreó al igual que la anterior al lado de la carretera, sus coordenadas son Latitud: 5° 30' 8.17'' N; Longitud: 73° 29' 41.46'' O. No se registró rumbo de la estructura. La técnica de extracción de la muestra es igual a la de la arenisca.

**3.3.1 Extracción Caliza, Estación 2.** La técnica de extracción de muestras para esta salida generaba gran incertidumbre debido a que no se confiaba en plenitud la presencia de microfracturas en rocas obtenidas debido a las grandes dimensiones de los bloques, aproximadamente 30x15x10 cm (ver figura 33b), ya que la estructura externa de las formaciones podían presentar cierto grado de fracturamiento, posiblemente este puede ser estar asociado a desgarramientos generados por la meteorización y por ende erosión; sin embargo, se procuró extraer en puntos donde estos procesos no se notarían considerablemente.

**Figura 33: a. Fm. Rosablanca b. Muestra Rotulada y Cubierta**



<sup>22</sup> MORENO, M. Geología y Geomorfología. Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Investigaciones Ambientales.

En cuanto al análisis estadístico de las muestras obtenidas en esta salida, basándose en el ítem 3.1.1 Tipos de Muestreo, se puede concluir que debido a que las rocas no presentaban microfracturas y se debía esperar extraer las muestras en el área de corte del ICP, estas muestras son de tipo no probabilístico de carácter intencional ya que en el punto de muestreo no se podía cuantificar la probabilidad del evento que se indagaba.

### **3.4 SALIDA 2: ESTACIÓN 1, VÍA LEBRIJA – LA RENTA (SANTANDER)**

Debido a la gran incertidumbre generada en la anterior salida por la extracción de bloques para posteriormente cortarlos y obtener las muestras, se planteó una segunda salida con información exacta (coordenadas) de afloramientos con alta probabilidad de intensidad de microfracturamiento, en el caso de esta primera estación correspondiente de la segunda salida, se ubicó entre el municipio de Lebrija y el corregimiento La Renta en el departamento de Santander la formación Tambor (ver figura 34), el punto de muestreo fue al costado de la carretera cuyas coordenadas exactas son: Latitud: 7° 8' 42.33'' N; Longitud: 73° 16' 36.01'' O. Este punto se muestreó rocas areniscas debido a que la descripción litológica de la formación tambor es de arenisca cuarzosa parda rojiza, clara, con capas<sup>23</sup>.

**Figura 32. Fm. Tambor**



---

<sup>23</sup> INGEOMINAS. Mapa geológico del cuadrángulo H-12, Bucaramanga. 1977

**3.4.1 Extracción Areniscas, Estación 1.** La extracción en esta estación se basó en utilizar un Equipo Portátil Saca Núcleos (ver figura 35), este equipo está integrado por:

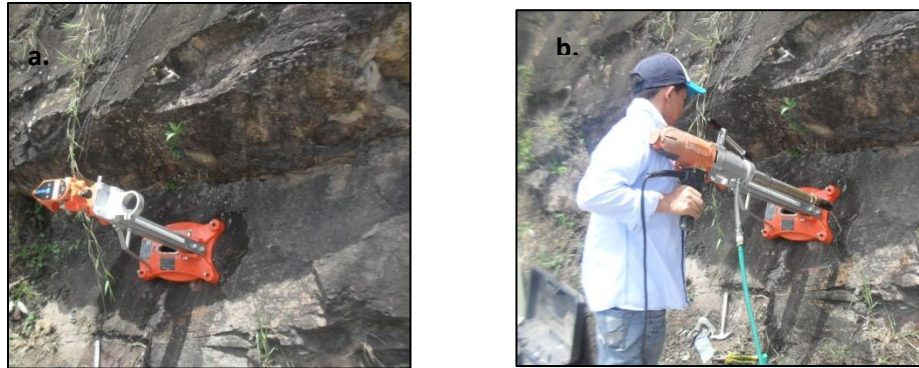
- Taladro Rotatorio.
- Soporte del taladro.
- Brocas saca núcleos de 1.25 in de diámetro interno.
- Planta eléctrica de 5.5 HP.

**Figura 33. a. Taladro b. Brocas c. Soporte d. Planta eléctrica**



Una vez localizado el punto con las coordenadas por medio de sistema GPS, se inició armar el Equipo Portátil Saca Núcleos, en primera instancia se ubicó una zona plana donde se pudiera anclar el soporte del taladro como se puede ver en la figura 36a.

**Figura 34. a. Anclaje de soporte b. Taladro en Perforación**



Posteriormente se completa el armado acoplado la broca en el taladro y este a su vez al soporte (ver figura 36b), se conecta la circulación de agua para lubricar la perforación y se activa la planta eléctrica para darle potencia al taladro, de esta forma se extrajeron numerosas muestras las cuales salían con intensidad de microfracturamiento, comprobándose estas características en los huecos dejados por la perforación (ver figura 37) donde se puede ver claramente las discontinuidades a lo largo de las cavidades.

**Figura 35. Microfracturas del muestreo de Areniscas.**



Una de las grandes ventajas de extracción con esta técnica radica en que las muestras de una vez indican la existencia de microfracturamiento en la zona muestreada, sus dimensiones en diámetro es de 1.25 pulgadas y de largo varían de 3 a 4 pulgadas. Una vez obtenidas, su transporte no representaba ninguna

dificultad de espacio y peso a comparación de las anteriores, de igual manera que las rocas de la primera salida eran llevadas al área de corte del ICP solamente para corregir los bordes laterales y aplicar pulimiento en todas sus áreas.

### **3.5 SALIDA 2: ESTACIÓN 2, QUEBRADA LA SORDA (SANTANDER)**

La actividad de muestreo de la Salida 2 en el departamento de Santander fue completada en la vereda La Sorda, exactamente en la quebrada que lleva el mismo nombre y en la cual aflora una de las formaciones más conocidas en Colombia, formación La Luna (ver figura 38). Las coordenadas exactas para llegar a este punto son: Latitud: 7° 10' 11.36'' N; Longitud: 73° 18' 5.54'' O. Esta estación se tomó para muestrear rocas calizas debido a que la litología de la formación La Luna es caliza arcillosa delgadamente estratificada, de color gris oscuro a negro<sup>24</sup>.

**Figura 36. Fm. La Luna**



**3.5.1 Extracción Caliza, Estación 2.** La técnica de extracción aplicada en esta estación fue la misma que la anterior; tanto areniscas y calizas son rocas sedimentarias, la primera están formadas por sedimentos generados de trozos de

---

<sup>24</sup> INGEOMINAS. Mapa geológico del cuadrángulo H-12, Bucaramanga. 1977

otras rocas y las segundas por precipitaciones de determinados compuestos como el  $\text{CaCO}_3$ , en las areniscas el grado de cementación entre los granos es en menor grado a comparación de las calizas, debido al espacio entre los poros dejados por los granos, esto hace aún más complejo extraer las calizas. Para fortuna, este punto de muestreo contaba con una quebrada de bajo nivel el cual favoreció la perforación debido a que la lubricación de la broca era por parte directa de la fuente y las zonas escogidas fue el piso de la quebrada. En la figura 39 se aprecia la intensidad de microfracturamiento que presenta esta zona de la formación La Luna, debido al posicionamiento geográfico es posible que este fracturamiento haya sido generado por los esfuerzos orogénicos que contribuyeron al levantamiento de la cordillera oriental.

**Figura 37. Microfracturas del Muestreo Calizas**



Las muestras extraídas por lo general presentaban microfracturamiento con precipitaciones mineralógicas; sin embargo, la formación La Luna es considerada como la cuna del petróleo en el norte de Sudamérica, esto se pudo comprobar al obtener muestras con contenido de petróleo bituminoso (ver figura 37), quizás este punto de muestreo coincidió con una importante veta de compuesto hidrocarburado.

En cuanto al análisis estadístico de las muestras obtenidas en esta segunda salida, basándose en el ítem 3.1.1 Tipos de Muestreo, se puede concluir que debido a que las muestras notablemente en su mayoría se les podía observar las microfracturas y cuantificar cuantas muestras presentaban estas características, este muestreo es de tipo probabilístico de carácter estratificado, en el que se puede hacer un análisis de frecuencia, promedio, varianza, desviación estándar.

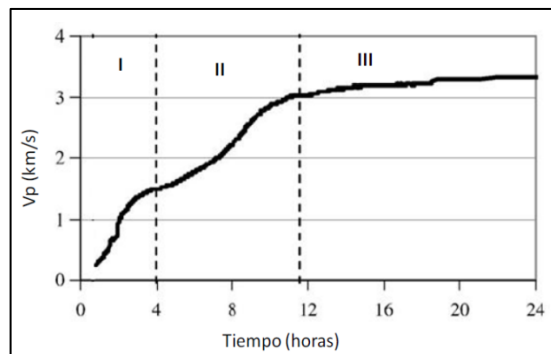
### **3.6 PLUGS SINTÉTICOS: CEMENTOS**

Con el fin de comprender controladamente el comportamiento de la propagación de ondas acústicas a través de las anomalías/discontinuidades que están presentes en un medio, en esta investigación se planteó la construcción de plugs sintéticos utilizando de matriz cemento blanco en la cual se generó intencionalmente inclusiones huecas. El objetivo principal de este ejercicio se basa en validar la congruencia de ubicación de las discontinuidades y el cálculo del parámetro de densidad de microfractura (capítulo 7), en este caso, densidad de inclusión generada a partir de los tomogramas acústicos respecto al modelo físico real de los plugs sintéticos.

**3.6.1 Preparación De La Lechada.** La geometría y dimensiones de los plugs sintéticos de cemento debían corresponder a la de las muestras reales obtenidas en afloramiento, al menos el diámetro de 1.25 pulgadas debía coincidir, ya que el largo pueda ser distinto dependiendo del criterio del autor. Se seleccionó tubería sanitaria de PVC rotulada con 1.25 pulgadas de diámetro interno; sin embargo, estas medidas están en función de la presión que pueden soportar el material de esta tubería, es decir, es una medida nominal, por lo tanto realmente el diámetro correspondiente es de 1.15 pulgadas. Se terminaron de hacer 5 moldes con diámetro nominal interno de 1.25 pulgadas y el largo fue estandarizado en 1.6 pulgadas (ver figura 40).

La preparación se basó en crear una lechada (agua y cemento únicamente) con relación agua cemento (a/c) de 0.45, esta es una óptima relación a/c ya que permite una total hidratación de las partículas de cemento y en la literatura existen referencias de pruebas acústicas aplicadas. Numerosos estudios coinciden que la velocidad ultrasónica en el fraguado y endurecimiento del cemento muestra tres periodos como se puede observar en la figura 39. La primera zona es un periodo inactivo caracterizado por una velocidad baja y constante, la segunda zona la velocidad se incrementa rápidamente, seguida por un tercer periodo o zona donde crece hasta alcanzar una tendencia asintótica<sup>25</sup>. Con el fin de garantizar la estabilidad ultrasónica el tiempo de endurecimiento fue de 96 horas (4 días), llegando al mínimo grado de endurecimiento de la lechada, en este tiempo se puede manipular los cementos ya que no van estar sometidos a condiciones HPHT (Siglas en ingles de Altas Presiones Altas Temperaturas).

**Figura 38. Evolución de la velocidad ultrasónica en el cemento en función del tiempo**



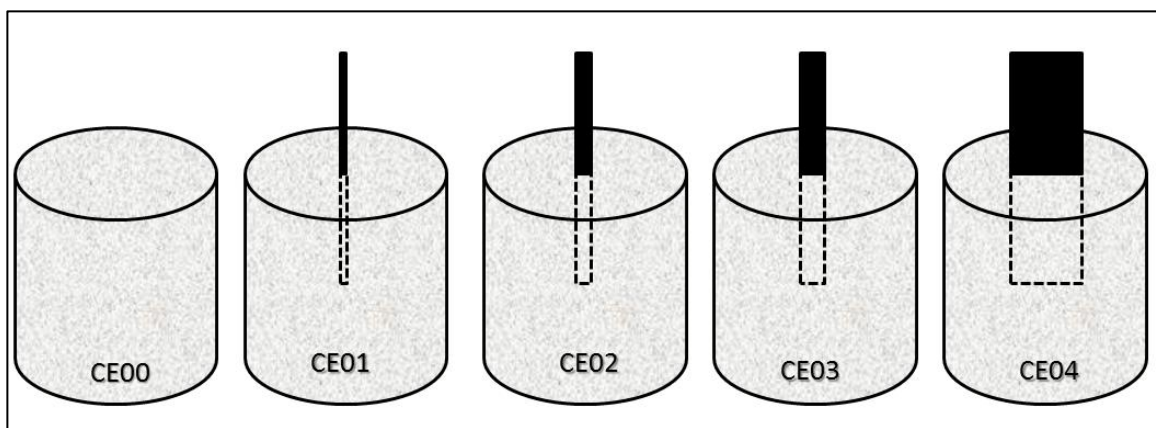
Fuente: REBOLLEDO, N. Aplicación de técnicas no destructivas al estudio de hormigón fresco. Universidad Politécnica de Madrid. 2010

**3.6.2 Generación De Inclusiones.** Esta es la parte más importante en la creación de los plugs sintéticos de cementos ya que se formarán distintos prototipos con inclusiones huecas. Para poder generar este tipo de inclusiones se utilizaron 4

<sup>25</sup> REBOLLEDO, N. Aplicación de técnicas no destructivas al estudio de hormigón fresco. Universidad Politécnica de Madrid. 2010

muestras de caucho de geometría cilíndrica con diámetro variable, una vez endurecido el cemento, estas se extraían con el fin de dejar la inclusión hueca y poder simular una discontinuidad seca (airosa), en su efecto, las microfracturas. Los diámetros de los cauchos utilizados son de 1, 3, 5 y 10 milímetros, estos debían ser ubicados en el centro de las muestras dejando una de ellas como muestra patrón sin inclusión alguna como lo señala la figura 41.

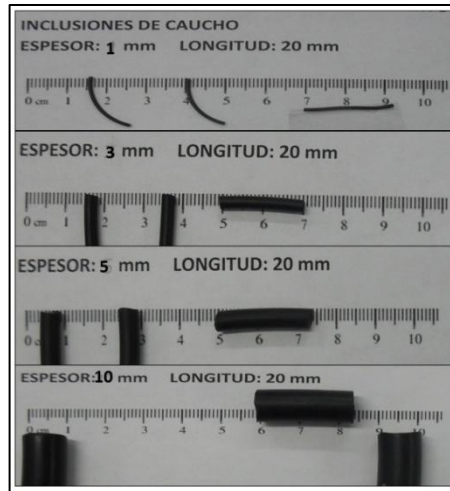
**Figura 39. Esquema de los prototipos de cementos con sus rotulados**



En cuanto al proceso para hacer los plugs sintéticos una vez obtenidos los moldes de PVC es el siguiente:

1. Colocar los moldes sobre una superficie plana preferiblemente separada con algún material de plástico.
2. Agregar por secciones el cemento para evitar aglomeraciones de aire y por ende huecos (vugs) dentro de la matriz del cemento, para esto fue necesario ir golpeando los moldes con una vara de metal a medida que se agregaba.
3. A medida que se agrega el cemento, ir ubicando las inclusiones de caucho, en este caso se incluyó 20 mm de largo en todos los prototipos (ver figura 42).

**Figura 40. Inclusiones Cauchos con variedad de diámetro (espesor)**



4. Repetir los pasos anteriores en todos los prototipos permitiendo un tiempo de fraguado y endurecimiento de 96 horas.
5. Abrir los moldes de PVC con un objeto cortante previamente sometido a calor para que el proceso de apertura no afecte la integridad de los plugs sintéticos como se muestra en figura 43.

**Figura 41. Extracción de cementos de los moldes de PVC**



**3.6.3 Modelos Controlados.** La generación de los modelos controlados tiene como finalidad practicar pruebas teóricas controlando variables que en pruebas reales no se pueden controlar ya que son variables independientes, en este caso, se han controlado el número de inclusiones que es su efecto simulan la presencia de microfisuras en las rocas. Por cuestiones de practicidad se dejó un modelo

sin inclusión y el resto con una sola inclusión variando solamente el diámetro como se puede observar el figura 44.

**Figura 42. Modelos controlados con inclusiones de caucho**



Una vez extraídos los cauchos y quedaron las inclusiones huecas se procedió a verificar el diámetro respecto con el de los cauchos y rotular los modelos desde el CE00 hasta el CE04 (ver figura 45), siendo el CE00 el modelo patrón ya que no presente inclusión alguna, estos modelos son los que el capítulo 6 demostrarán la validación instrumental y tomográfica de la técnica propuesta una vez se haga la inversión acústica.

**Figura 43. Modelos controlados con inclusiones huecas**



### **3.7 PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

Las rocas traídas de los afloramientos debían pasar por un proceso de preparación de muestras ya que los dispositivos que permiten la inversión acústica actúan óptimamente siempre y cuando las superficies de las mismas estén lo más regular posible, es decir, que el área de los bordes laterales tengan planitud y sus planos sean paralelos entre sí, de igual manera el área circunferencial debe tener una alta proximidad a la cilindricidad. Partiendo del anterior orden de ideas, se debe ejecutar las siguientes tareas programadas en los instructivos del Laboratorio de Mecánica de Rocas del ICP:

1. Extracción de Plugs (corte cilíndrico).
2. Perfilaje Lateral de Plugs (corte lateral)
3. Pulido de Perfilaje y Cilindricidad.

No todas las rocas se les practico los instructivos anteriormente mencionados, ya que las extraídas en la segunda salida no tenían necesidad de practicarle el primer instructivo, debido que el mismo Equipo Saca Núcleos lo hace esa función, sin embargo, a continuación se describirá las principales actividades de los instructivos.

**3.7.1 Extracción De Plugs.** Esta actividad se desarrolla bajo el instructivo interno *Extracción de Plugs* del Laboratorio Mecánica de Rocas del ICP-ECOPETROL S.A. Las operaciones indicadas están asociadas al uso de un taladro fijo marca JET (ver figura 46) útil para el corte cilíndrico de bloques de roca procedentes de afloramiento o corazones de pozo, la actividad consiste en:

1. Seleccionar el diámetro de la broca y ajustarla al taladro.
2. Conectar el circuito de fluido de perforación (agua o aceite).
3. Ajustar el bloque sobre la mesa del taladro.
4. Acomodar el nivel de la mesa de taladro según el alto de la roca y largo de la broca.
5. Electrificar el equipo de taladro JET.
6. Configurar las velocidades de rotación (rpm) de acuerdo con la litología de la roca.
7. Adaptar el peso de la broca, manual o automático. Por recomendaciones de los operarios, las condiciones de seguridad se optimizan en el modo manual.

**Figura 44. Extracción de muestras, bloque de arenisca**



**3.7.2 Perfilaje Lateral De Plugs.** Esta actividad se desarrolla bajo instructivos internos del Laboratorio Mecánica de Rocas del ICP-ECOPETROL S.A.. Debido a que las muestras una vez cortadas en el taladro presentan irregularidades en sus bordes laterales, estas deben ser pasadas por una cortadora marca RUBI (ver figura 47) para poder perfeccionar estas secciones de las rocas y darle la geometría básica de cilindro, el procedimiento consiste en:

1. Medir y marcar la longitud de la muestra.
2. Ajustar la muestra al portanúcleos de la cortadora.
3. Acomodar el disco cortador en la señal a cortar de la muestra.
4. Electrificar el equipo cortador RUBI.
5. Avanzar el corte de acuerdo la litología de la roca garantizando la lubricación con fluido (agua o aceite).
6. Repetir paso 3 y 5 para el otro borde lateral de la muestra.

**Figura 45. Extracción de muestras, bloque de arenisca**



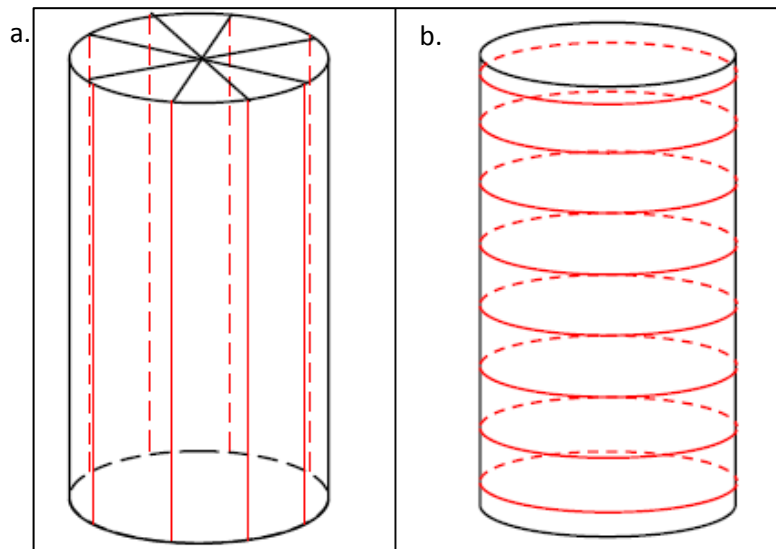
**3.7.3 Pulido De Perfilaje Y Cilindricidad<sup>26</sup>.** Esta actividad se desarrolla bajo el instructivo interno *Preparación de Muestras Consolidadas, UST-LMR-I-007, 2011*. Esta actividad es realizada para corregir imperfecciones en las caras planas de la muestra luego de ser extraída y perfilada, para esto se deben seguir los siguientes pasos:

1. Colorear las superficies de tope y base de la muestra como guía para observar el estado del pulimento como se muestra en la figura 48.
2. Pulir con la lija la muestra en las superficies de tope y base.

---

<sup>26</sup>Laboratorio Mecánica de Rocas-ICP. Instructivo para preparación de muestras consolidadas. Versión 6. 2001

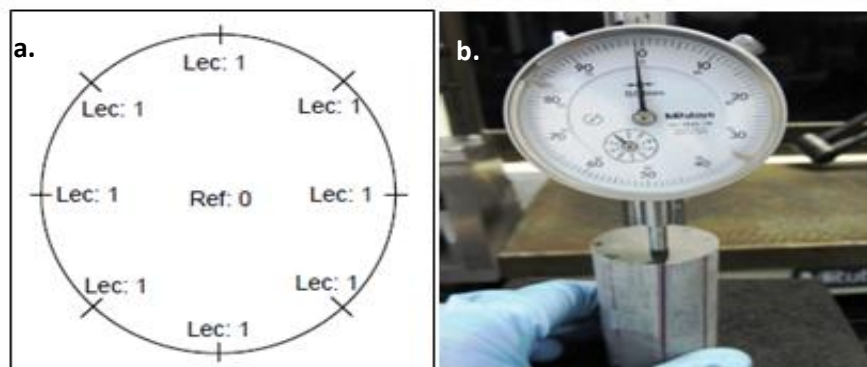
**Figura 46. a. Posiciones toma de medidas nivel longitudinal. b. Esquema toma de medidas nivel diametral**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Rocas-ICP. Instructivo para preparación de muestras consolidadas. 2011

3. Medir la planitud de la muestra utilizando el comparador de caras de acuerdo a los ocho puntos donde debe ser medido el diferencial de altura. Si el diferencial máximo registrado es mayor que 0.001 in, se debe volver al punto 2 y repetir el procedimiento hasta no superar valor máximo permitido (ver figura 49).

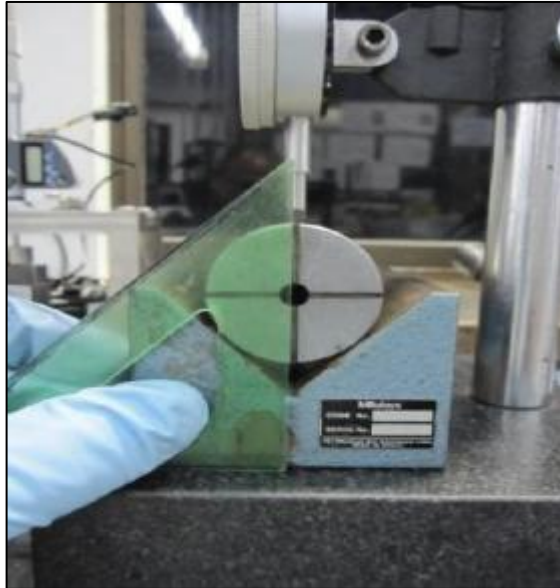
**Figura 47.a. Esquema medición paralelismo y cilindridad. b. Medición de planitud en muestra**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Rocas-ICP. Instructivo para preparación de muestras consolidadas. 2011

4. Medir el grado de cilindridad de la muestra de igual manera con el comparador de caras pero reposando horizontalmente la muestra en ayuda con un bloque en V, tal como se muestra en la figura 50, esto evita deformaciones ligeramente cónicas.

**Figura 48. Montaje medición de cilindridad**

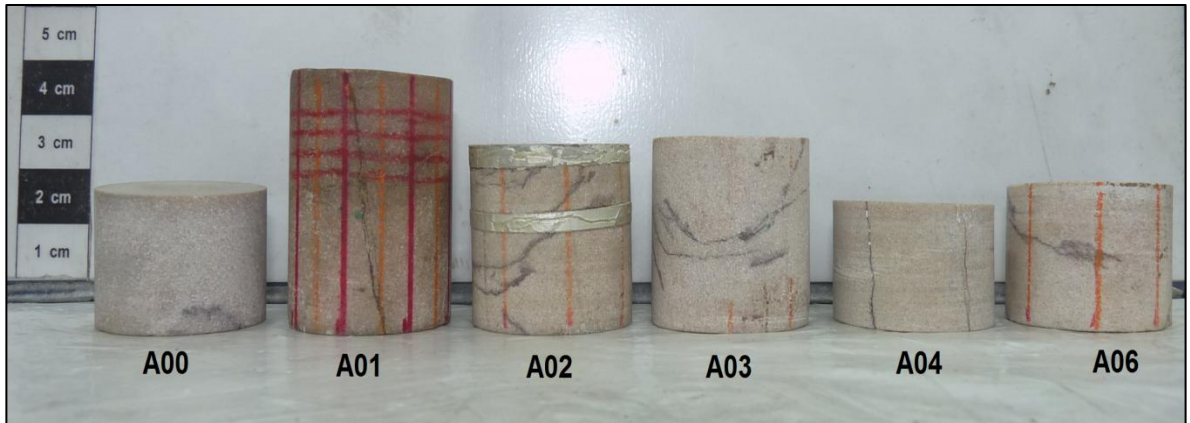


Fuente: Laboratorio Mecánica de Rocas-ICP. Instructivo para preparación de muestras consolidadas. 2011

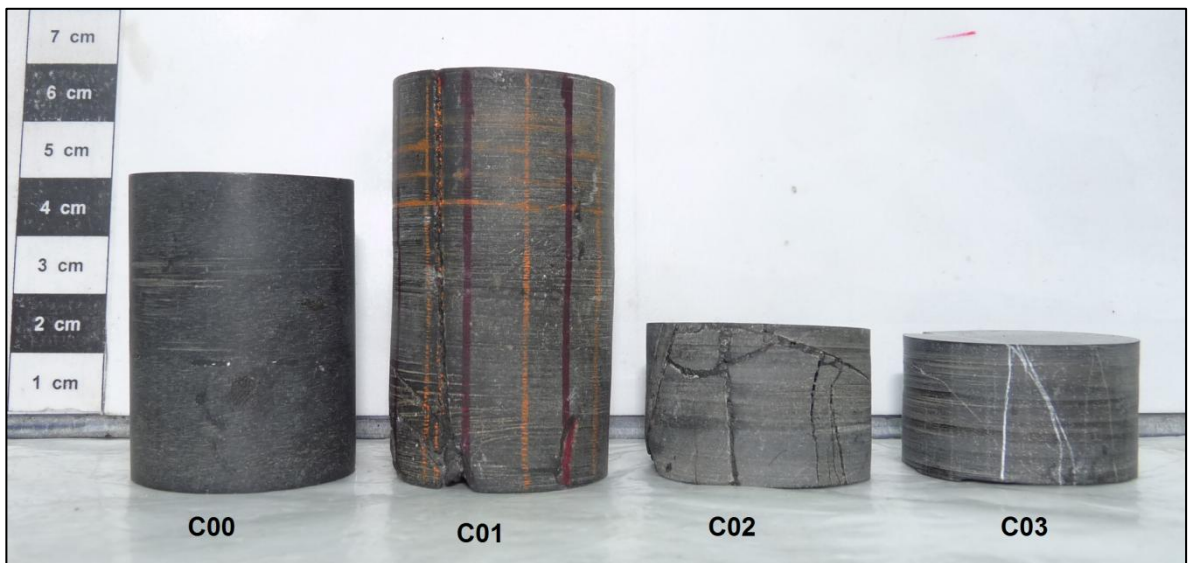
### **3.8 MUESTRAS TERMINADAS**

Aplicado todos los instructivos a las rocas extraídas, finalmente se generaron 6 muestras de areniscas rotuladas desde la A00 hasta la A05, siendo la A00 la muestra patrón ya que en esta a simple vista no se observan microfracturas, ver figura 51; 4 de muestras calizas rotuladas desde la C00 hasta la C01, de la misma manera la C00 es la muestra patrón, ver figura 52.

**Figura 49. Muestras de Areniscas terminadas**



**Figura 50. Muestras de Calizas terminadas**



#### 4. APLICACIÓN DEL SOFTWARE MATLAB® EN LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ACÚSTICA 3.5 D

*“Lo importante en ciencia no es tanto obtener nuevos hechos como descubrir nuevas formas de pensar sobre ellos”*

*Sir William Lawrence Bragg*

Antes de iniciar la indagación a cualquier planteamiento que pueda ser la solución crucial de un problema, automáticamente entra al pensamiento la pregunta que nos indaga si estamos en la capacidad de hacerlo, la respuesta en su mayoría de veces de nuestra conciencia es negativa; sin embargo, esto no quiere decir que no se pueda lograr una solución a dicho problema. El hombre, independientemente de sus intenciones, siempre ha estado bajo la supremacía de la autosuperación desde tiempos inmemorables, logrando el conocimiento a través del tiempo, conociéndose esto como *curva de aprendizaje*.

La esencia de este capítulo resalta la importancia de la curva de aprendizaje, en donde el autor en un tiempo inicial tenía en claro la idea de representar virtualmente un prototipo de roca, pero no sabía cómo hacerlo, en las investigaciones hechas se han encontrado la existencia softwares comerciales como PETREL PETROPHYSICAL MODELING® y AVIZO FIRE®, el primero se contaba con la licencia estudiantil pero tenía la limitante que no se podía modelar un núcleo fracturado a escala de laboratorio, el segundo, podía modelar un núcleo fracturado a escala de laboratorio pero su licencia era muy costosa, ante estas eventualidades y entendiendo que lo que se quería era modelar propiedades físicas de la roca como lo es detectar la presencia de las microfracturas por medio de datos acústicos de velocidad de ondas P y ondas S, entendiendo que a partir de la inversión acústica se obtienen datos de velocidades de onda, se proyectó

hacer que cada obtención de velocidades fueran registradas en una matriz cuadrada y el conjunto de estas al escanear verticalmente la roca con el DBSR generará una multimatriz de velocidades, de esta manera hacer una “roca de números” y con un gradiente de colores poder diferenciar la parte matricial de la parte microfracturada; el software que reúne estas características para hacer la representación virtual y se puede acceder más fácilmente es MATLAB®.

La curva de aprendizaje para modelar virtualmente los prototipos de rocas microfracturadas, se genera en adquirir los conocimientos del manejo del software MATLAB® a través de tutoriales subidos en internet para el manejo de comandos y asesoría de personas calificadas en el tema, una vez proyectado el marco conceptual del trabajo que se quería ejecutar, la cantidad de conocimiento comienza a crecer mucho en poco tiempo, lográndose de esta manera poder caracterizar una curva de aprendizaje.

#### **4.1 DEFINICIÓN DE LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ACÚSTICA 3.5 D PARA LA VISUALIZACIÓN VIRTUAL DE LAS MUESTRAS**

La técnica de Tomografía Acústica 3.5 D es un protocolo no destructivo donde se utilizan parámetros de ondas acústicas como la frecuencia, amplitud, tiempo y velocidad para la obtención de imágenes de una sección plana (2D) de un objeto tridimensional (ver Cap. 1, Ítem 1.3.2), en el caso de esta investigación, se utilizará la velocidad de ondas P y ondas S para modelar físicamente la matriz de rocas (areniscas y calizas) y las discontinuidades de la misma, la cual denominamos de acuerdo a la escala de laboratorio, “microfracturas”.

Existen distintas formas de generar Tomografía, debido a que lo importante es visualizar virtualmente la parte interna de la roca sin destruirla, se tiene que generar a partir de una propiedad inherente de la materia, esta puede ser para el

caso de la Tomografía Computacional utilizada en la rama de la medicina (TC) la *atenuación* que presenta los *rayos X* al propagarse en el medio, *la temperatura* a lo largo de una superficie y *la densidad* de los materiales, son las propiedades más importantes.

La propiedad inherente que se evalúa en esta investigación es la densidad del material y estado de la materia, para la onda P, su velocidad es proporcional a la densidad, siendo mayor en sólidos, menor en líquidos y a su vez menor en gas; la onda S tiene las características de no propagarse en fluidos (Cap. 1, ítem 1.2.3), únicamente lo hace en sólidos con la particularidad de polarizarse en onda S1 rápida y onda S2 lenta, dependiendo de la dirección de anisotropía que presente el medio, por medio de este principio físico se generaran matrices de velocidades de onda P y onda S en cada corte virtual que se realice a las muestras.

Antes de hacer énfasis acerca de la dimensión 3.5 D, se debe definir el término de *dimensión*. Existen muchas connotaciones asociadas a la dimensión, dimensión espiritual, dimensión social, dimensión física, entre otras. El término *dimensión* se define como *extensión de un objeto/cosa en una dirección determinada*.<sup>27</sup> En este caso, el objeto/cosa es el *espacio* y las direcciones son las coordenadas X (izquierda-derecha), la coordenada Y (adelante-atrás) y la coordenada Z (arriba-abajo), este es el principio de la dimensión espacial o dimensión tridimensional refiriéndose al largo, ancho y profundidad, a su vez este principio es el fundamento matemático de esta técnica para optar por la creación de matrices en sistemas de multimatrices. El sistema de multimatrices estará conformado por filas (eje X), columnas (eje Y) y niveles/páginas (eje Z).

El análisis de la dimensión 3.5 D hace referencia en asignarle una propiedad o atributo a una coordenada tridimensional, y como tal la propiedad o atributo no es

---

<sup>27</sup> Diccionario de la Real Academia Española. 2013

tomada como una dimensión<sup>28</sup>. Esto, en su efecto, no quiere decir que existe una dimensión 0.5, ya que la dimensión solo puede tomar un número entero, una dimensión (1D), dos dimensiones (2D), tres dimensiones (3D) y cuatro dimensiones (4D) haciendo referencia esta última al principio de relatividad de Albert Einstein.

## 4.2 SOFTWARE MATLAB®<sup>29</sup>

MATLAB® es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación. Con este software se puede analizar datos, desarrollar algoritmos, crear modelos y aplicaciones. El lenguaje, herramientas y funciones integradas de matemáticas permiten explorar múltiples enfoques y llegar a una solución más rápida que a comparación de las hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como C, C++ o Java™.

MATLAB® tiene una gama de aplicaciones, incluyendo el procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imágenes y vídeo, sistemas de control, prueba y medición, finanzas computacionales y la biología computacional, como tal el lenguaje de este software es de cálculo técnico.

Para la aplicación en esta investigación se utilizará una versión libre de *MATLAB® R2013a*, profundizándose en las aplicaciones de procesamiento de imágenes y de señales a partir de arreglos matriciales de velocidad de ondas acústicas.

**4.2.1 Estructura de Matrices en Matlab®.** Una matriz es un arreglo de elementos en líneas horizontales y verticales, esta son de dos dimensiones: La dimensión fila y la dimensión Columna (nxn), ver figura 53. Las matrices que tiene más de dos

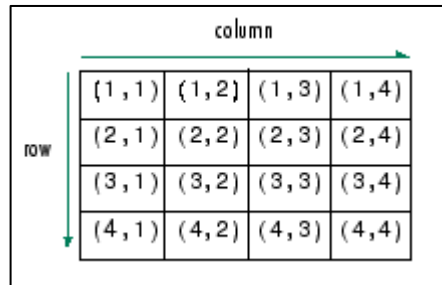
---

<sup>28</sup> TORRES, Jairo. Profesor de Geofísica UIS

<sup>29</sup> MATWORKS. Products & Services. MATLAB: The Language of Technical Computing. 2013

dimensiones se llama *matriz multidimensional* (nxn) en la aplicación de MATLAB® y son una extensión de la matriz de dos dimensiones normales. Es de aclarar que también existen matriz de una dimensión llamados *vectores*, estos en su efecto, pueden ser una fila (nx1) o puede ser una columna (1xn)

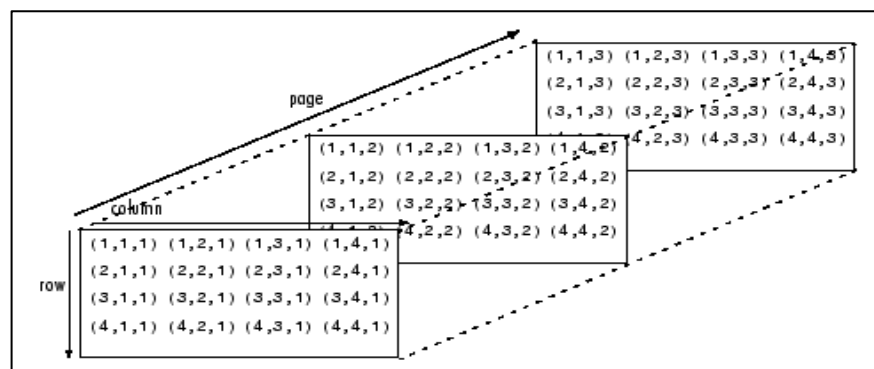
**Figura 51. Estructura de Matriz Bidimensional**



Fuente: MATHWORKS, Documentation Center: MATLAB/Language Fundamentals/Matrices and Arrays/Sorting and Reshaping Arrays

Para acceder a un elemento de matriz bidimensional se utiliza dos subíndices: el primero representa el índice de la fila y el segundo representa el índice de la columna. Las matrices multidimensionales (ver figura 54) utilizan subíndices adicionales para su indexación. Una matriz de tres dimensiones, por ejemplo, utiliza tres subíndices de la siguiente manera.

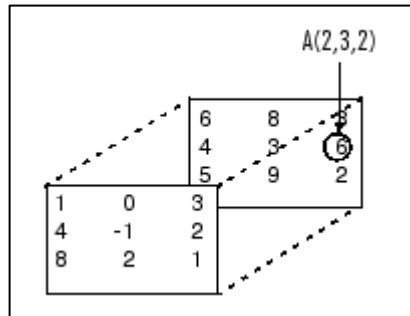
**Figura 52. Estructura de Matriz Multidimensional**



Fuente: MATHWORKS, Documentation Center: MATLAB/Language Fundamentals/Matrices and Arrays/Sorting and Reshaping Arrays

Para acceder al elemento de la segunda fila, tercera columna de la página/nivel 2 de la multimatriz A (ver figura 55), por ejemplo, se utilizan los subíndices (2,3,2).

**Figura 53. Ejemplo para ubicar un elemento de una matriz en MATLAB®**



Fuente: MATHWORKS, Documentation Center: MATLAB/Language Fundamentals/Matrices and Arrays/Sorting and Reshaping Arrays

### 4.3 METODOLOGÍA ROCA VIRTUAL 3.5 D

Las metodologías que fundamentan la técnica de Tomografía Acústica como visualización virtual de las muestras en esta investigación, están basadas en una serie de pasos o protocolo creados en la interfaz de MATLAB®, estos protocolos son llamados *RUTINAS* y son la esencia que materializa los datos (tiempo de propagación-velocidades de onda) generados por el osciloscopio en los Tomogramas 3.5 D. Es de resaltar que no se presentarán las rutinas debido a que hace parte del material confidencial pactado entre el autor y el convenio del grupo de investigación al cual pertenece; sin embargo, el paso a paso de la metodología que se muestra indica los principios matemáticos y físicos aplicados a las rutinas.

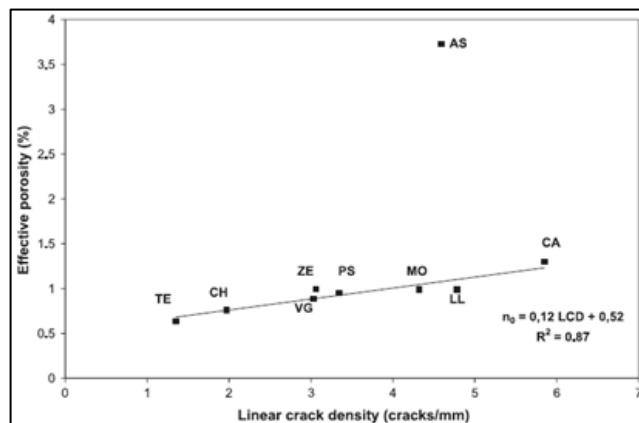
La metodología de la Roca Virtual 3.5 D es la base teórica-ideal, de cómo crear un Tomograma 3.5 D, el cual represente la parte continua de una roca que es la matricial y la parte discontinua que son las microfracturas, por lo tanto, marca el inicio de la curva de aprendizaje para modelar este tipo de muestras en

MATLAB®. Estas rutinas se basan en que el usuario crea las matrices de velocidades de onda P para una roca con determinada porosidad a partir de datos experimentales obtenidos en la literatura (ver figura 32). Además este ejercicio académico está basado bajo ciertas consideraciones ideales de la roca:

- Se aplica modelo de fracturas de Hudson (1980): Paralelas y Subparalelas.
- La longitud de onda solo detecta microfracturas.
- Las muestras son secas, no confinadas y a temperatura ambiente.
- La relación Porosidad vs Fractura es 1:1.

La última consideración está basada en una relación (ver figura 56) encontrada en la literatura la cual muestra la tendencia proporcional del crecimiento de la densidad de fractura respecto a la porosidad efectiva.

**Figura 54. Crecimiento proporcional de las fracturas respecto a la porosidad efectiva en distintos afloramientos**



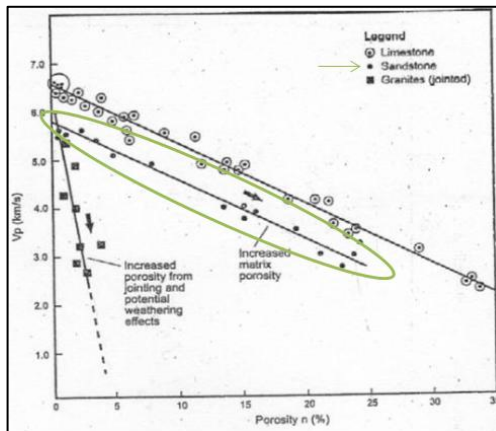
Fuente: FOURMAINTRAUX, D. Quantification des discontinuités des roches et des massifs rocheux. Rock Mech. 1995

• **Paso 1: Selección tipo de Roca**

Utilizando la gráfica de FORMAINTRAUX (1995), la cual muestra la tendencia experimental de velocidad de onda P ( $V_p$ ) en Calizas, Areniscas y Granitos en

función de la porosidad, se selecciona el tipo de roca a analizar, en este caso del ejercicio se toma la arenisca.

**Figura 55. Tendencia de la Vp en Areniscas, Calizas y Granitos en función de la porosidad**



Fuente: Modificada de FOURMAINTRAUX, D. Quantification des discontinuities des roches et des massifs rocheux. Rock Mech. 1995

- **Paso 2: Selección de la porosidad**

Teniendo en cuenta la curva de la arenisca, para este ejercicio se tomó las siguientes porosidades con sus respectivas velocidades, estas velocidades representa la velocidad promedio de la onda P en la matriz de la roca; la velocidad de las fracturas se asume como la del aire (356 m/s), ya que las muestras no son saturadas:

0% → 5800 m/s

5% → 5100 m/s

25% → 2800 m/s

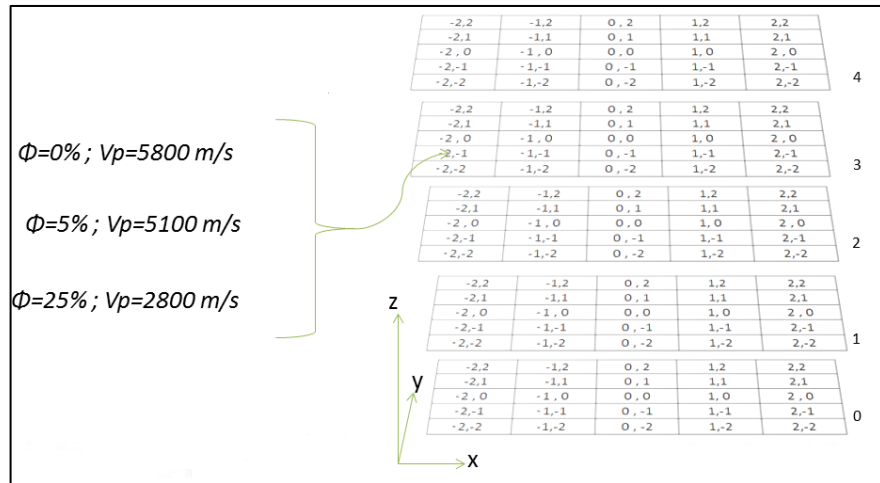
- **Paso 3: Armar el sistema multimatriz**

Este sistema de multimatriz se arma a partir de una plantilla de Microsoft Excel®, en donde se organiza por niveles (eje Z) de un mismo punto de coordenadas X e

Y una cuádrupla ordenada con sus velocidades de onda P correspondientes, es decir, se asigna a cada coordenada tridimensional una Vp (ver figura 58).

La dimensión de esta multimatriz para caso práctico y evitar congestión en el tiempo de procesamiento en la computadora se ha tomado de 5 unidades de longitud en las coordenadas X, Y y Z (5X5X5), para un total de 125 de puntos de muestreo o elementos, que su efecto pueden ser 125 unidades cubicas de volumen.

**Figura 56. Tendencia de la Vp en Areniscas, Calizas y Granitos en función de la porosidad**



Tomando en cuenta la consideración de la relación Porosidad vs Fractura 1:1, es decir, que por cada unidad de porosidad existe una unidad de fractura, para una roca de 0% existen cero (0) unidades de fractura, por ende, el usuario debe llenar todas los puntos de muestreo de la multimatriz en la plantilla de EXCEL con la velocidad de onda P promedio de la matriz de la roca, en este caso es de 5800 m/s.

Igualmente, para una roca de 5% de porosidad, se toman 5 unidades de fracturas y se ubican dentro de la multimatriz de tal manera, que en los puntos de muestreo

y/o coordenadas donde se ubiquen sean consecutivas para darle forma a las microfracturas y sean paralelos (no intersectados, teoría Hudson). Finalmente, se repite lo mismo para la roca de 25% de porosidad; en figura 59 se puede visualizar la plantilla de Excel para el caso de esta última roca.

**Figura 57. Plantilla en EXCEL: Cuádrupla ordenada X-Y-Z-Vp**

	A	B	C	D
1	x	y	z	Vp
2	-2	2	0	2800
3	-2	2	1	2800
4	-2	2	2	2800
5	-2	2	3	2800
6	-2	2	4	2800
7	-1	2	0	2800
8	-1	2	1	2800
9	-1	2	2	2800
10	-1	2	3	356
11	-1	2	4	2800
12	0	2	0	2800
13	0	2	1	2800
14	0	2	2	356
15	0	2	3	2800
16	0	2	4	2800
17	1	2	0	2800
18	1	2	1	2800
19	1	2	2	356
20	1	2	3	2800
21	1	2	4	2800
22	2	2	0	2800
23	2	2	1	356
24	2	2	2	2800
25	2	2	3	2800
26	2	2	4	2800
27	2	1	0	356
28	2	1	1	2800
29	2	1	2	2800
30	2	1	3	2800

De esta forma se puede expresar la *densidad de microfractura (Dmf)* como un porcentaje volumétrico correspondiente a la microfractura respecto al volumen total de la muestra, con la siguiente expresión:

$$Dmf \% = \frac{\text{Unidades de Fracturas}}{\text{Unidades Volumen total de la Roca Virtual}} * 100 \text{ Ec.3}$$

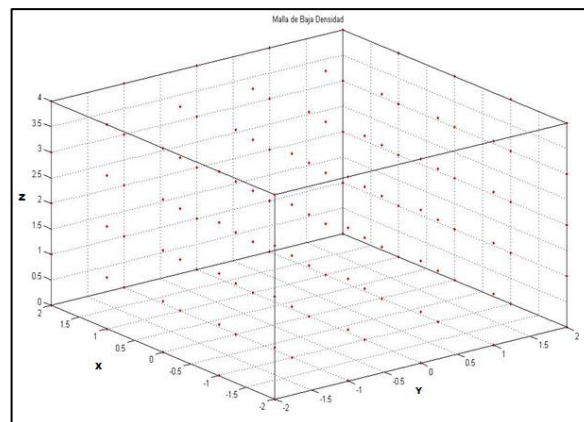
**Tabla 8. Valores de Densidad de Microfractura de las Rocas Virtuales 3.5 D**

Roca \ Parámetro	Unidades Vol. Total (UVT)	Unidades de Fractura (UF)	Unidades de Matriz (UVT-UF)	Dmf [%] ((UF/UVT)*100)
$\Phi=0\%$	125	0	125	0
$\Phi=5\%$	125	5	120	4
$\Phi=25\%$	125	25	100	20

- **Paso 4: Aplicación de la Rutina MATLAB®**

Este paso consiste en utilizar los datos de la cuádrupla ordenada [X-Y-Z-Vp] de la plantilla de EXCEL y exportarlos a la rutina creada en MATLAB® para la visualización del Tomograma 3.5 D. Lo que se hace en esta rutina una vez exportados los datos de velocidades y adjudicados en una matriz de la rutina, organizar las columnas X-Y-Z-Vp como un vectores independientes X, Y, Z y Vp, esto es con el fin de escoger los vectores X, Y y Z para graficar un enmallado 3D con los puntos de esos vectores, en un inicio se tienen 125 puntos los cuales se pueden ver el figura 60.

**Figura 58. Enmallado de roca virtual: Baja densidad de puntos**



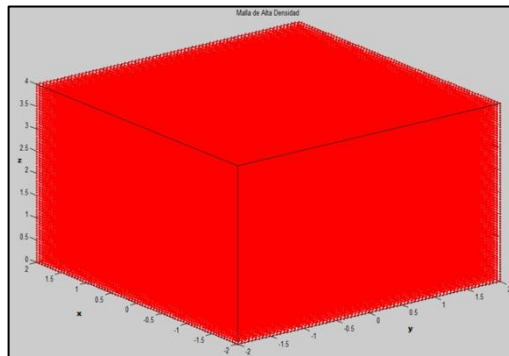
- **Paso 4.1: Remuestreo**

Como se puede apreciar en la figura 34, los puntos están separados con un delta de espacio de 1 unidad, estos puntos tienen una función muy importante al

momento de generar el Tomograma, ya que estos son los pixeles de la imagen generada y potencializan la resolución ofrecida por la cantidad de PZT al momento de escanear el corte de la roca, de nada sirve tener muchos PZT para ser la inversión de ondas acústicas si los puntos de muestreo o pixeles del enmallado son pocos y viceversa.

Al tener mayor densidad de puntos de muestreo (ver figura 61) el pixelado del Tomograma será mejor y se optimizará la resolución ofrecida por los PZT, cuando se adjudique los atributos que en este caso, la velocidad de onda P, a cada una de sus coordenadas tridimensionales respectivas, la interpolación entre un valor y otro será más discretizada en el enmallado de alta densidad de puntos a diferencias de baja densidad.

**Figura 59. Enmallado de roca virtual: Alta densidad de puntos**

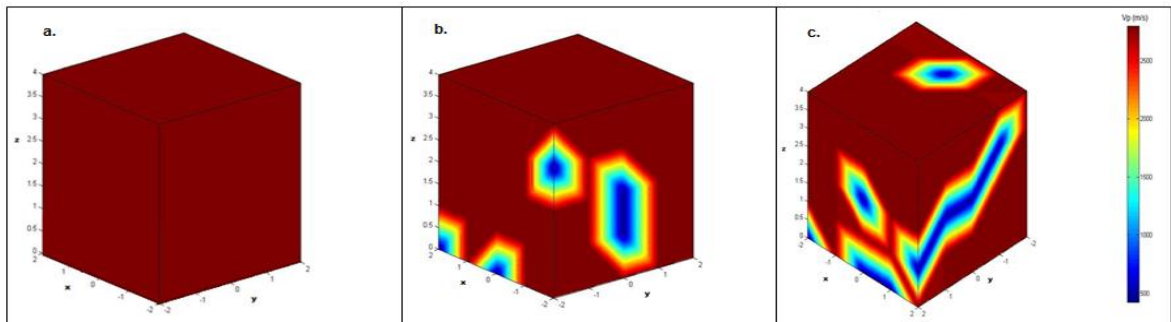


- **Paso 4.2: Visualización de la Roca Virtual 3.5 D**

El enmallado 3D de alta densidad está formado por 75 puntos en cada una de las coordenadas, es decir, lo componen 421875 puntos de muestreo a diferencia de los 125 del anterior, posteriormente se toman los datos del vector independiente  $V_p$  de la roca de 0% de porosidad y se le asigna a cada coordenada correspondiente tal cual establecida desde la plantilla desde EXCEL, de la misma forma se aplica para las rocas de 5% y 25% de porosidad. Después de interpolar valores entre puntos de muestreo, se asigna un gradiente de colores en el que las

velocidades altas (matrices de la roca) corresponden al color rojo y las velocidades bajas (microfracturas) corresponden al color azul. Finalmente se obtienen los siguientes Tomogramas que representan el ejercicio académico de las Rocas Virtuales 3.5 D, ver figura 62.

**Figura 60. Rocas Virtuales 3.5 D: a. Porosidad 0% b. Porosidad 5% c. Porosidad 25%**



A partir de este principio matricial (matemático) aplicado en las rutinas de MATLAB® se generarán las demás rutinas que representen modelos virtuales en 3.5 D generados de la inversión de ondas acústica en las muestras reales.

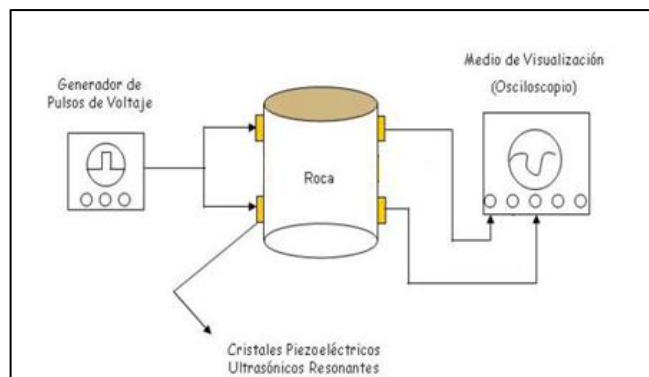
#### **4.4 ESTADO DEL ARTE: METODOLOGÍA TOMOGRAFÍA ACÚSTICA LABORATORIO MECÁNICA DE ROCAS (LMR). INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO (ICP) – ECOPETROL S.A.**

Esta investigación busca generar un modelamiento virtual volumétrico para proponer un mejoramiento a las rutinas generadas en el LMR del ICP. Como antecedente principal de esta investigación se debe resaltar que en el LMR anteriormente ya se estaba trabajando en el perfeccionamiento de la técnica de Tomografía Acústica, haciendo inversión de ondas acústicas por medio de PZT y renderizando los valores de velocidad en MATLAB®, esta investigación es una propuesta a mejorar la técnica.

A continuación se describirá el protocolo, en resumen debido a razones de confidencialidad, que se hace en el LMR para obtener tomogramas acústicos, que en orden de ideas que describe el autor de esta investigación son tomogramas acústicos en 2.5 D, es decir, asignación de un atributo/propiedad intrínseca a una coordenada 2D:

- **Paso 1:** Se almacenan las señales por medio del Sistema de Adquisición Acústica del LMR que cuenta con un pulsador de tensión, un osciloscopio y dos series de PZT onda P alrededor de la roca, ver figura 63.

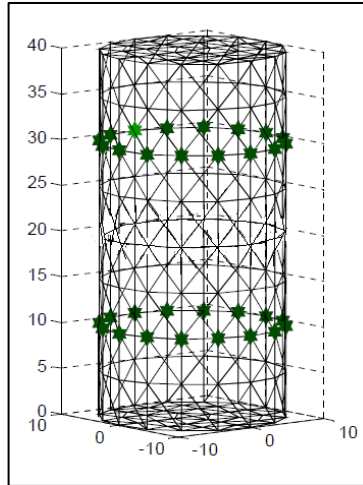
**Figura 61. Esquema del Sistema de Adquisición Acústica LBR-ICP**



Fuente: Modificado de GALVIS, J. Generador electrónico de pulso voltaje para su aprobación en pruebas dinámicas sobre medios porosos. GIEP, UIS-ICP. 2006

El esquema de la inversión de ondas acústicas en la roca se puede apreciar en la figura 64, este consta de dos anillos de 12 PZT cada uno de onda P ubicados de forma radial a cierta distancia vertical. Los PZT están adheridos una sustancia llamada epóxico de plata pegándolos a la roca y evitando que el efecto tangencial entre la superficie plana del cristal y superficie curva de la roca genere alteraciones de ruidos y demás componentes no deseadas en las señales, una vez realizado el ensayo, los PZT no se pueden volver a utilizar ya que el epoxico de plata los alteraría físicamente si se utilizan en otras muestras y/o rocas.

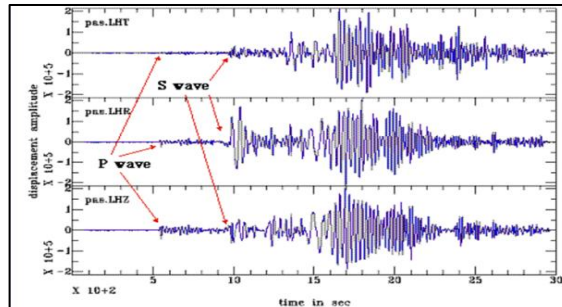
**Figura 62. Esquema del Sistema de Adquisición Acústica LBR-ICP**



Fuente: Modificado de STACEY, Robert. Electrical Impedence Tomography. 2006.

- **Paso 2:** Se realiza tratamiento digital de la señal para eliminar el ruido obtenido y demás componentes no deseadas.
- **Paso 3:** Se calcula el tiempo de tránsito de la señal, con el fin de conocer las velocidades a las que ésta señal acústica viajó por la muestra. Éste proceso se realiza utilizando tratamiento digital de señales para diferenciar entre el pulso, la zona de estabilización y el inicio de la señal compresional o de corte, en la figura 65 se muestra como como se detecta una onda P como la primera señal (primer pico de amplitud relevante) generada ya que es más rápida que la onda S; sin embargo, debido a que la onda S transporta mayor energía y es más lenta que la onda P, esta se detecta como un segundo pico de amplitud mucho más relevante que el primero. La amplitud de una señal hace referencia a la energía transportada.

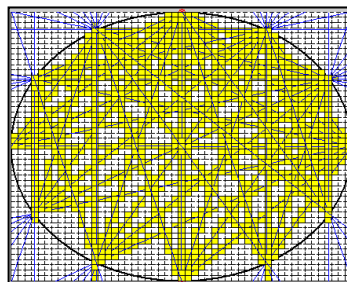
**Figura 63. Ondas P y Ondas S detectadas por sensores sismicos**



Fuente: <http://cuicatlali.files.wordpress.com/2011/04/seismogram.gif>

- **Paso 4:** Se almacenan los datos de tiempo de propagación generado por cada trayectoria entre PZT en un archivo de EXCEL, el cual ya tiene caracterizadas cada una de las distancias por las que viajó la señal acústica. Cada trayecto tiene una distancia pre-definida la cual ya se encuentra establecida; a esa distancia se le establece su correspondiente velocidad de onda en función del tiempo de propagación calculado. Para este paso se establece una matriz en una rutina de MTALAB® en la que su tamaño es la resolución del pixelado y se adjudican dichas trayectorias (evitando el cristal más cercano); la rutina hace una diferenciación dependiendo del ángulo; si el ángulo entre el transmisor y el receptor es mayor a 27.1 grados, teniendo como base el eje Y en el X máximo, la trayectoria se tiene en cuenta, esto es con el fin de evitar redundancia de datos de velocidad, ver figura 66.

**Figura 64. Trazado de trayectorias, dibujo de pixeles y cristales.**

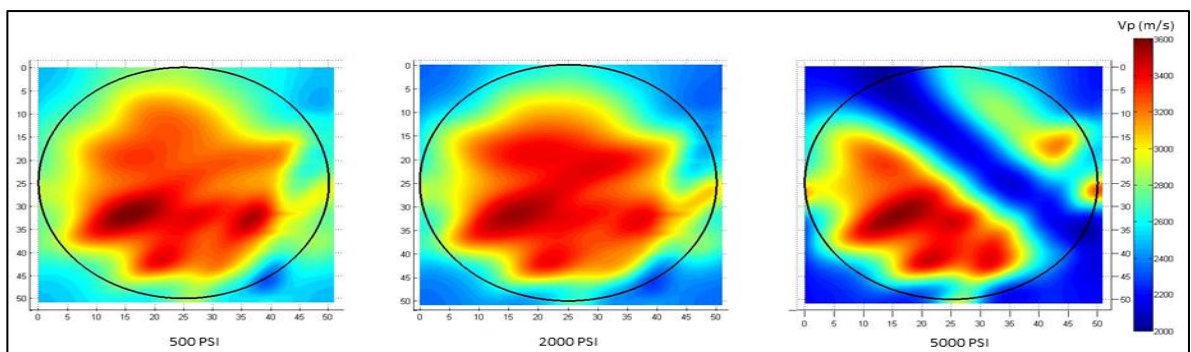


Fuente: RAMÍREZ, Luis. LACHE, Andrei. Statuos Quo: Tomografía. LMR ICP – ECOPETROL S.A. 2012

- **Paso 5:** Los datos son leídos por una rutina de MATLAB®, la cual se encarga finalmente de generar el tomograma 2.5 D asignándole la velocidad de la matriz a cada uno de los pixeles que recorre toda la trayectoria, los comandos internos de la rutina se encargan de renderizar (generar gradiente de colores) las velocidades y suavizar la matriz (interpolación de rayos).

En la figura 65 se puede observar tres ensayos de Tomografía Acústica de onda P, generados en tres cargas puntuales uniaxial a una muestra sintética de arena. El gradiente de colores establece rojo para las velocidades altas y azul para bajas, a medida que el la carga crece, 500 PSI y 2000 PSI, el centro de la muestra se intensifica el color rojo, esto se debe a que los granos dentro de la misma están sufriendo un proceso de compactación y por ende, disminución de porosidad, permitiendo una mejor propagación de la onda P en el medio; al tomar un tercer ensayo de tomografía a 5000 PSI se puede observar que la muestra ha fallado, aparece una línea gruesa de color azul en el centro indicando bajas velocidad de onda P y alrededor zonas de color rojo tenue e intenso, esto quiere decir que la onda P tuvo que sortear su propagación a lo largo de esta discontinuidad, además, por ser una roca no saturada esta discontinuidad estaba llena de aire lo cual también incide en la disminución de la velocidad.

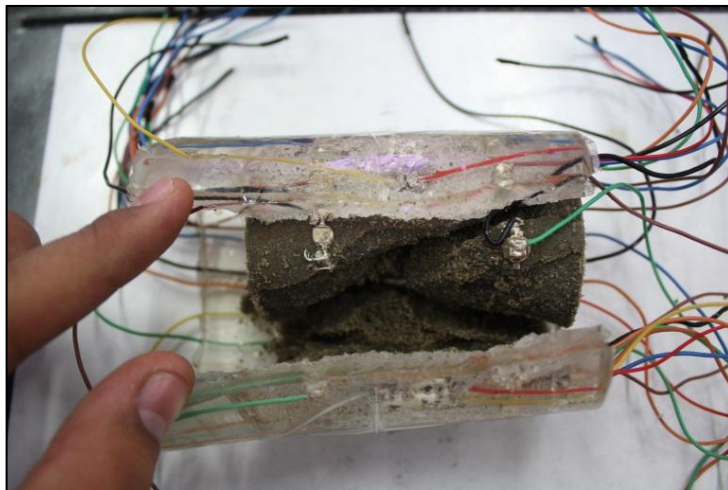
**Figura 65. Cortes Tomografía Acústica 2.5 D con aumento de carga uniaxial.**



Fuente: Ensayos de Tomografía Acústica. LMR ICP – ECOPETROL S.A. 2012

- **Paso 6:** Finalmente, los ensayos de tomografía “fallados” (falla generada) de forma optativa para verificar su validación, se comparan respecto a la muestra física que fue sometida a carga, en este ejercicio se verifica coincidencia de distancias, aspectos físicos, entre otras características. En la figura 66 se puede apreciar físicamente la muestra que fue sometida a carga, el anillos de PZT que se utilizó para analizar los cortes o tomogramas de la figura 41 es el de la izquierda, el corte que hace este anillo coincide con la falla generada en el tomograma generado a los 5000 PSI de carga uniaxial.

**Figura 66. Corte Tomografía Acústica 2.5 D con aumento de carga uniaxial**



Fuente: Ensayos de Tomografía Acústica. LMR ICP – ECOPETROL S.A. 2012

#### **4.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA TÉCNICA TOMOGRAFÍA ACÚSTICA 3.5 D: ENSAYOS ACÚSTICOS DEL LMR**

El aporte generado por el equipo de trabajo del LMR además del asesoramiento técnico y teórico de esta investigación, es principalmente ayudar a adquirir las señales acústicas en los cortes de muestras y hacer la entrega de las matrices de velocidad respectivas, ya que este procedimiento es una técnica que aún no se ha patentado y por ende se trabaja bajo el principio de ética de confidencialidad.

Una vez generada la rutina de la *Roca Virtual 3.5 D* por parte del autor, ésta es considerada base de las demás rutinas propuestas, en este primer ejercicio académico, el usuario debe ingresar y/o crear su propia matriz de velocidades de acuerdo a los datos e información que encuentre en la literatura, en este caso, la velocidad de onda P que está en función de la porosidad de la roca y de acuerdo a la relación 1:1 de porosidad-fractura, incluir las microfracturas como velocidades de onda P del aire, visualizándose de esta manera una roca microfracturada teórica e ideal.

La anterior rutina debe reestructurarse a algo más real, así como a partir de la ecuación de gases, sin factor Z de compresibilidad, surgió para analizar el comportamiento del gas en dichas condiciones y posteriormente incluyeron el factor Z de compresibilidad, factor forma de las moléculas, entre otras, hasta llegar a un modelo numérico que se asemejará un comportamiento más real; tal cual en este caso, se modificó la rutina inicial en donde las matrices de velocidad no fueran de datos teóricos sino obtenidas mediante la adquisición directa de señales utilizando el Sistema de Adquisición Acústica del LMR, esto con el fin de acercarnos más a la realidad; para esto, se ejecutaba los primeros 4 pasos del ítem 4.4 del presente capítulo. El entregable del LMR a esta investigación son las matrices de velocidades acústicas de todos los cortes hechos a las muestras, para una posterior aplicación de las rutinas hechas en MATLAB® basadas en los siguientes pasos:

1. Tomografía Acústica 2.5 D en geometría Cuadrada
2. Tomografía Acústica 3.5 D en geometría Cuboide
3. Tomografía Acústica 3.5 D en geometría Cilíndrica

Para estos ejercicios de aplicación, el LMR ha ofrecido una matriz de velocidades de onda P.

**4.5.1 Tomografía Acústica 2.5 D En Geometría Cuadrada.** Para esta primera aplicación la herramienta base de trabajo es una matriz de velocidades generada de un ensayo de tomografía acústica a una roca del LMR, esta matriz es entregada en una extensión *.mat* para archivos que se puedan abrir en MATLAB®. La matriz es llamada Sg4Vp, las características principales de esta se puede ver en la figura 69, es cuadrada (51x51), sus valores mínimos y máximos de velocidad de onda P son respectivamente son de 2656,5 y 4191,5 m/s.

**Figura 67. Lectura en la interfaz de MATLAB® del Ensayo Sg4VP**

Name ▲	Value	Min	Max
Sg4Vp	<51x51 double>	2.6565e+03	4.1915e+03

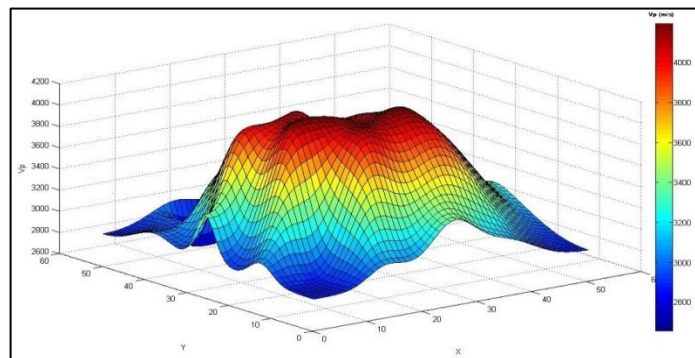
En la figura 68 está la matriz Sg4Vp ampliada en las 51 filas y 51 columnas, de esta manera se puede observar cada uno de los valores de velocidad correspondientes a cada posición, la cual posteriormente será los pixeles del tomograma

**Figura 68. Lectura en la interfaz de MATLAB® del Ensayo Sg4VP**

Sg4Vp <51x51 double>											
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
29	3.6200e+03	3.5503e+03	3.4977e+03	3.4107e+03	3.3482e+03	3.2890e+03	3.2290e+03	3.1699e+03	3.1409e+03	3.1239e+03	3.1139e+03
30	3.6234e+03	3.5568e+03	3.4851e+03	3.4110e+03	3.3379e+03	3.2692e+03	3.2079e+03	3.1567e+03	3.1171e+03	3.0903e+03	3.0768e+03
31	3.6221e+03	3.5586e+03	3.4875e+03	3.4116e+03	3.3345e+03	3.2603e+03	3.1927e+03	3.1352e+03	3.0902e+03	3.0594e+03	3.0438e+03
32	3.6213e+03	3.5632e+03	3.4953e+03	3.4198e+03	3.3404e+03	3.2614e+03	3.1875e+03	3.1230e+03	3.0716e+03	3.0360e+03	3.0177e+03
33	3.6196e+03	3.5697e+03	3.5081e+03	3.4363e+03	3.3572e+03	3.2750e+03	3.1950e+03	3.1229e+03	3.0640e+03	3.0224e+03	3.0010e+03
34	3.6122e+03	3.5736e+03	3.5226e+03	3.4592e+03	3.3846e+03	3.3020e+03	3.2169e+03	3.1365e+03	3.0687e+03	3.0198e+03	2.9943e+03
35	3.5883e+03	3.5642e+03	3.5289e+03	3.4800e+03	3.4159e+03	3.3374e+03	3.2496e+03	3.1614e+03	3.0839e+03	3.0266e+03	2.9963e+03
36	3.5430e+03	3.5347e+03	3.5187e+03	3.4902e+03	3.4435e+03	3.3752e+03	3.2884e+03	3.1935e+03	3.1055e+03	3.0387e+03	3.0029e+03
37	3.4705e+03	3.4744e+03	3.4765e+03	3.4698e+03	3.4448e+03	3.3930e+03	3.3137e+03	3.2170e+03	3.1220e+03	3.0476e+03	3.0075e+03
38	3.3821e+03	3.3891e+03	3.4012e+03	3.4105e+03	3.4052e+03	3.3724e+03	3.3069e+03	3.2160e+03	3.1212e+03	3.0446e+03	3.0029e+03
39	3.2906e+03	3.3027e+03	3.3257e+03	3.3394e+03	3.3320e+03	3.3027e+03	3.2438e+03	3.1709e+03	3.0900e+03	3.0222e+03	2.9848e+03
40	3.2317e+03	3.2161e+03	3.2146e+03	3.2095e+03	3.2031e+03	3.1838e+03	3.1435e+03	3.0936e+03	3.0349e+03	2.9839e+03	2.9552e+03
41	3.1578e+03	3.1243e+03	3.1067e+03	3.0895e+03	3.0770e+03	3.0606e+03	3.0337e+03	3.0052e+03	2.9704e+03	2.9390e+03	2.9209e+03
42	3.1146e+03	3.0533e+03	3.0097e+03	2.9801e+03	2.9659e+03	2.9614e+03	2.9508e+03	2.9353e+03	2.9168e+03	2.8999e+03	2.8899e+03
43	3.0823e+03	3.0168e+03	2.9701e+03	2.9393e+03	2.9203e+03	2.9081e+03	2.8987e+03	2.8895e+03	2.8801e+03	2.8719e+03	2.8670e+03
44	3.1067e+03	3.0250e+03	2.9655e+03	2.9252e+03	2.8994e+03	2.8834e+03	2.8732e+03	2.8659e+03	2.8601e+03	2.8557e+03	2.8533e+03
45	3.1397e+03	3.0419e+03	2.9709e+03	2.9227e+03	2.8918e+03	2.8729e+03	2.8617e+03	2.8549e+03	2.8508e+03	2.8482e+03	2.8469e+03
46	3.1537e+03	3.0601e+03	2.9796e+03	2.9254e+03	2.8909e+03	2.8701e+03	2.8581e+03	2.8515e+03	2.8480e+03	2.8462e+03	2.8455e+03
47	3.1544e+03	3.0723e+03	2.9866e+03	2.9290e+03	2.8926e+03	2.8707e+03	2.8583e+03	2.8517e+03	2.8485e+03	2.8471e+03	2.8466e+03
48	3.1346e+03	3.0739e+03	2.9890e+03	2.9314e+03	2.8946e+03	2.8724e+03	2.8599e+03	2.8534e+03	2.8504e+03	2.8492e+03	2.8488e+03
49	3.1313e+03	3.0650e+03	2.9866e+03	2.9316e+03	2.8959e+03	2.8741e+03	2.8617e+03	2.8553e+03	2.8524e+03	2.8513e+03	2.8510e+03
50	3.1208e+03	3.0518e+03	2.9817e+03	2.9306e+03	2.8964e+03	2.8752e+03	2.8631e+03	2.8568e+03	2.8540e+03	2.8529e+03	2.8526e+03
51	3.1188e+03	3.0424e+03	2.9779e+03	2.9295e+03	2.8965e+03	2.8758e+03	2.8638e+03	2.8576e+03	2.8548e+03	2.8538e+03	2.8535e+03

Después de verificar la matriz Sg4Vp, finalmente mediante comandos de MATLAB® lo que se hace es la creación de la malla y superficie en funciones del tipo  $Z=f(X,Y)$ , donde X e Y son las variables independientes y Z es la dependiente, para este caso Vp es la variable dependiente y la función es  $Vp=f(X,Y)$  (ver figura 69).

**Figura 69. Grafica de la matriz Sg4Vp de la forma:  $Vp=f(x,y)$**

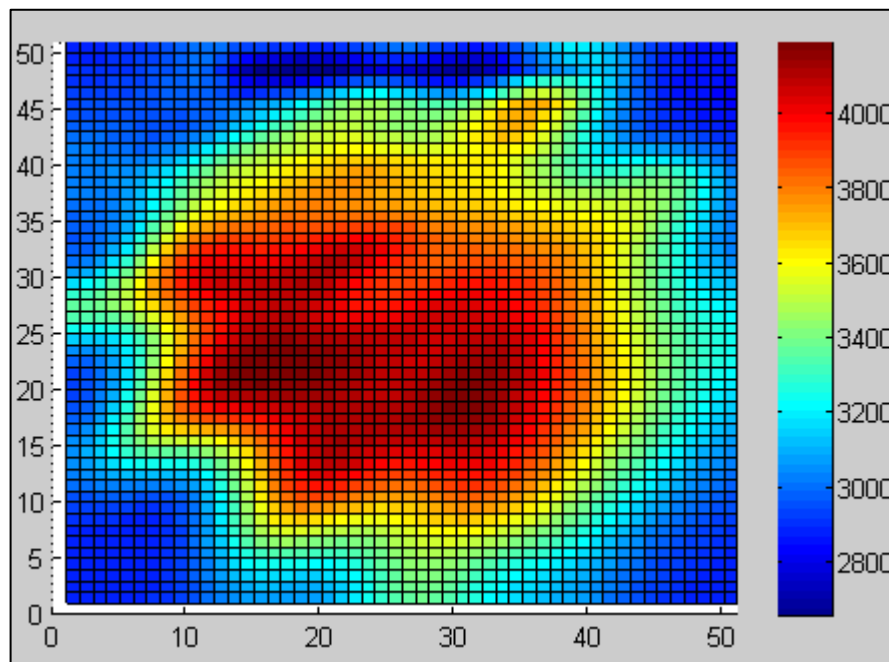


Lo anterior supone que en un determinado dominio 2D, los valores de Vp pueden ser calculados en función de X e Y generando un tomograma 2.5 D (ver figura 72).

Este tomograma acústico 2.5 D se puede construir en tres pasos: El primer paso consiste en crear un enrejado en el plano x-y, que cubre el dominio de la función. El segundo paso consiste en calcular el valor de z en cada punto de del enrejado x-y. El tercer paso es crear la línea que une los puntos y forma la gráfica.

Hasta este momento lo único que se ha demostrado cómo se puede renderizar las matrices de velocidades generadas por parte del LMR, pero todavía no se ha cargado la matriz en la rutinas creadas

**Figura 70. Lectura en la interfaz de MATLAB® del Ensayo Sg4VP**

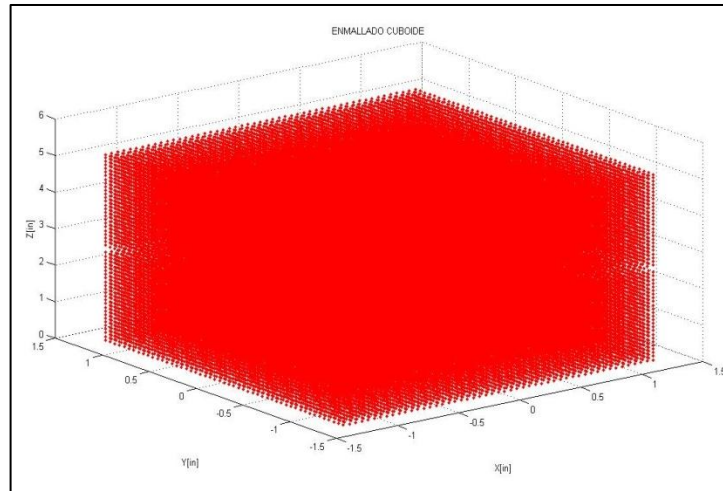


**4.5.2 Tomografía Acústica 3.5 D En Geometría Cuboide<sup>30</sup>** A partir de este punto, se toma la matriz Sg4Vp para cargarla a la rutina creada en MATLAB®. Los cambios que se efectuaron en esta nueva rutina respecto a la inicial a modo de metodología, fueron:

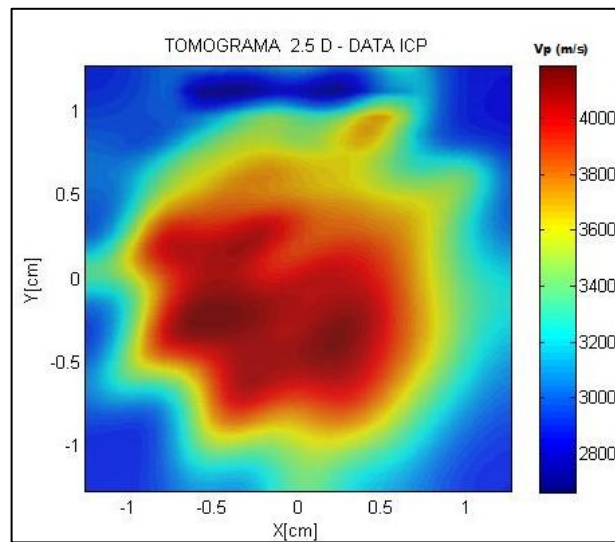
<sup>30</sup> GÓMEZ, Luis. Rutinas MATLAB®: Tomografía Acústica. UIS. 2013

1. El ingreso de datos (Matriz Vp) no es manual; si no, que simplemente se carga la matriz, en este caso Sg4Vp a MATLAB® (figura 45) y se llama con el nombre del archivo directamente al inicio de la rutina.
2. Se crean vectores independientes X e Y, los cuales estarán subdivididos en función al tamaño de la matriz, 51. Estos vectores dimensionan realmente el tomograma de acuerdo a las medidas reales, si la muestra es de 1 in de diámetro (2,54 cm), se logrará ver el eje X y el eje Y de -1,27 cm hasta 1,27 pasando por cero para ubicar el centro.
3. De igual manera, se crea otro vector independiente con los datos de velocidad de Sg4Vp y se organizan los vectores en una terna ordenada [X, Y, Vp].
4. Una vez obtenida la terna ordenada, se añade otro vector independiente que será el eje Z, este vector Z, discretizará la altura del tomograma, en este caso, se establece que sea el doble del diámetro, 2 in (5.08 cm). Para validar la geometría 3D del tomograma o enmallado, se ordena la visualización (ver figura 73).
5. Al enmallado 3D se le asigna a cada 1 mm (0,1 cm) del eje Z (altura) un tomograma 2.5 D (ver figura 74), en este caso se está trabajando con un solo tomograma 2.5 D, repitiéndose en toda la altura, por lo tanto hace ver la roca homogénea lateralmente. La discretización de la altura cada milímetro se debe a que se quiere garantizar la detección de microfracturas debido a su dimensión crítica que es 1 mm, por ende, el barrido vertical así lo será, de igual manera justifica una mejor interpolación (menos margen de error) entre planos cuando se ejecute la rutina

**Figura 71. Enmallado Geometría Cuboide**

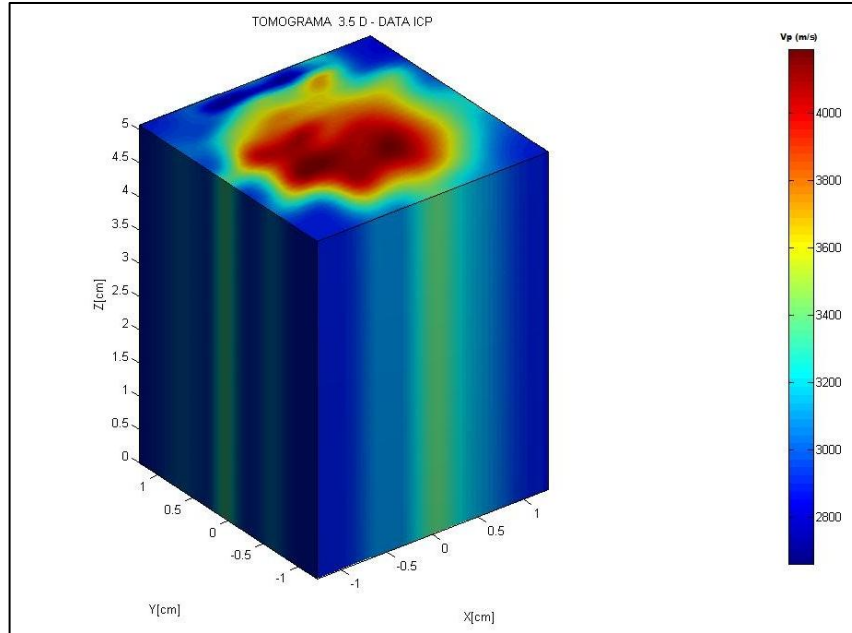


**Figura 72. Tomograma 2.5 D, matriz Sg4Vp**



6. Finalmente, se aplican los mismos acabados finales de la rutina de la Roca Virtual 3.5 D, visualizándose el siguiente tomograma acústico de onda P, *geometría cuboide*, soportado por una malla multimatriz (ver figura 75).

**Figura 73. Tomograma 3.5 D, multimatriz Sg4Vp**

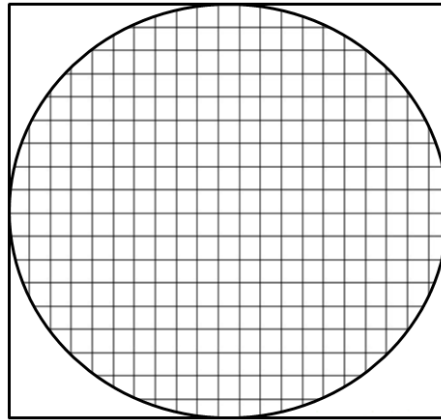


**4.5.3 Tomografía Acústica 3.5 D En Geometría Cilíndrica<sup>31</sup>.** La aplicación de esta rutina se basa en la geometría real de las rocas una vez extraídas del afloramiento y/o formación, las rocas son extraídas con un taladro rotativo de broca cilíndrica hueca, de ahí la geometría.

Partiendo de que el LMR obtiene son matrices cuadradas y que las velocidades de los bordes de las mismas no proporcionan información importante, se ha implementado una nueva rutina en la que por medio de la creación de una función llamada "*Circular\_Domain*" tome la terna ordenada  $[X, Y, Vp]$  que es un el dominio cuadrado  $[X, Y]$  con su rango  $[Vp]$  y la convierta en un dominio circular de los mismos valores, el diámetro de este círculo es la longitud de un lado de la matriz cuadrada, es decir, como se aprecia de la figura 76, se toma un círculo circunscrito del cuadrado.

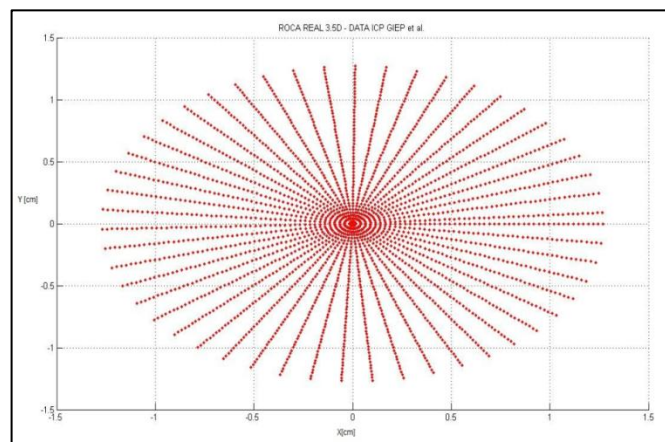
<sup>31</sup> GÓMEZ, Luis. Rutinas MATLAB®: Tomografía Acústica. UIS. 2013

**Figura 74. Demostración grafica función “Circular\_Domain”.**



La función *Circular\_Domain*, está programada como una subrutina y por ende, solamente con cargar la matriz y especificar la longitud de los lados de ésta, la función toma esa longitud como el radio con el que generará el nuevo dominio, optando por tener en cuenta todos los valores (velocidades de onda acústica) que estén dentro del radio y descartando el resto de valores, estos valores son reasignados con una representación aritmética original de MATLAB® llamado *NaN* (Not a Number), ver figura 77.

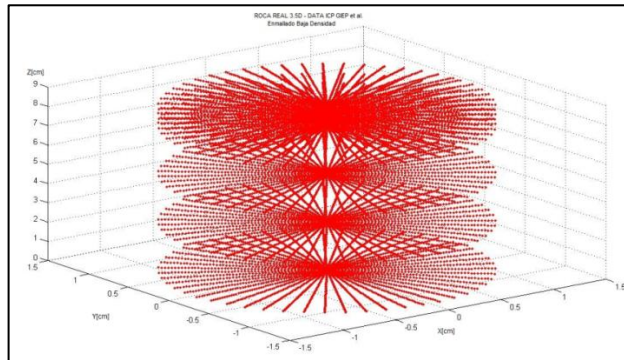
**Figura 75. Demostración grafica función “Circular\_Domain”.**



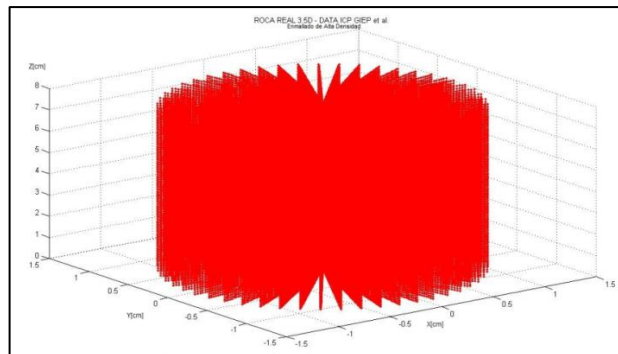
Cada cambio de la rutina es un paso trascendental para acercarnos mucho más a un modelamiento virtual que represente la realidad física de una roca microfracturada. Una vez obtenido el dominio circular  $[X,Y]$  (ver figura 52) con sus correspondientes valores de  $V_p$ , se ejecutan los demás pasos principales mencionados en las anteriores rutinas, entre estos esta:

- Crear la cuádrupla ordenada  $[X,Y,Z,V_p]$ , verificando la geometría 3D como un enmallado de baja densidad y alta densidad de puntos, para este caso el diámetro es de 1 in (2,54 cm) y la altura el triple, 3in (7,62 cm), ver figuras 78 y 79 respectivamente.

**Figura 76. Enmallado 3D Cilíndrico, baja densidad**

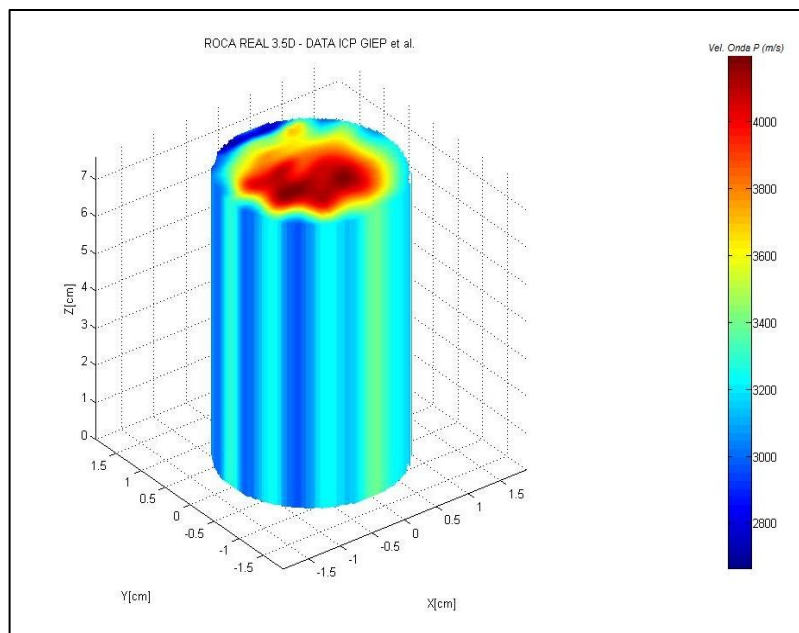


**Figura 77. Enmallado 3D Cilíndrico, baja densidad**



- Adjudicar los dominios circulares o matrices circulares a cada uno de los niveles correspondientes del eje Z dentro del enmallado 3D.
- Interpolación entre puntos y planos para el suavizar el tomograma 3.5 D.
- Creación del gradiente de velocidades.
- Visualización de la Tomografía Acústica 3.5 D: Geometría Cilíndrica (ver figura 80).

**Figura 78. Tomografía Acústica 3.5D: Geometría Cilíndrica**



#### **4.6. GENERACIÓN DE MICROFRACTURAS SINTÉTICAS EN LOS MODELOS CILÍNDRICOS 3.5 D**

La importancia de esta rutina radica en la visualización que se espera de las microfracturas sin haber hecho las pruebas reales. Se ha tomado como referencia el tomograma que se encuentra “fallado” a 5000 PSI de carga uniaxial (figura 67), las velocidades de la matriz oscilan entre 3000 y 3600 m/s, las velocidades de la fractura entre 2000 y 2400 m/s, se decide tomar valores cercanos (inferior) de la

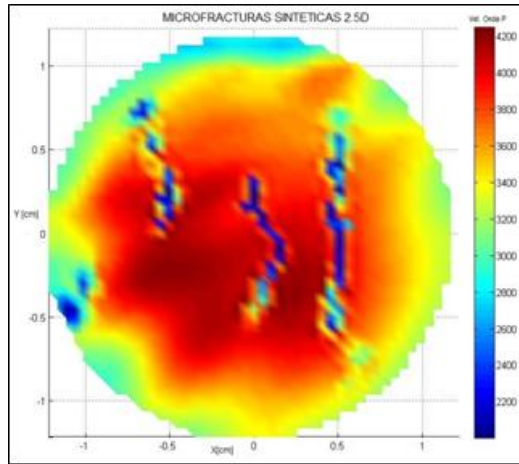
Vp de fractura y modificar algunos datos (celdas) de la matriz Sg4Vp (figura 43), para esto se reemplazan algunas celdas con Vp de fractura de tal forma que tenga la continuidad para demostrar una microfractura. Una vez modificada Sg4Vp, se guarda en un nuevo archivo *.mat* llamado *Mfrac* (ver figura 81), la cual será la nueva matriz con datos de velocidad de microfracturas (Vpm).

**Figura 79. Modificación matriz Sg4Vp: Matriz Mfrac**

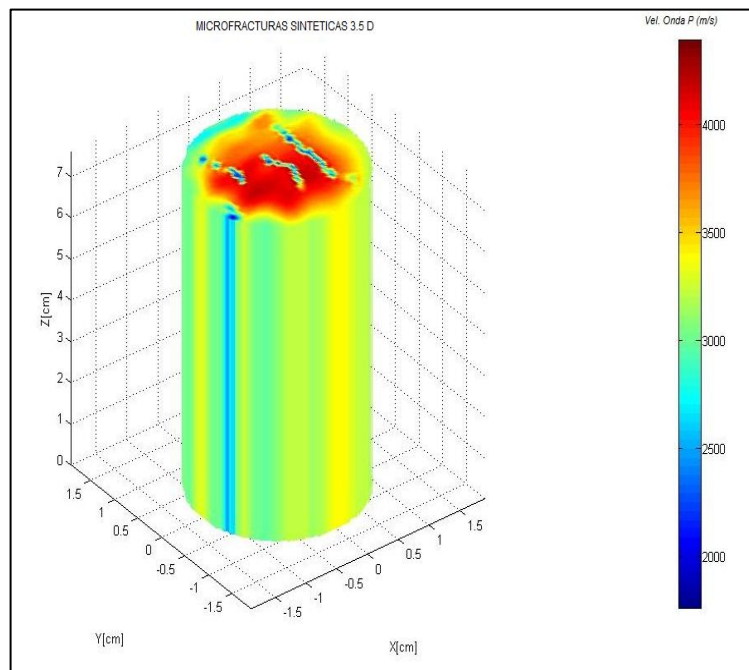
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
22	3.9021e+03	4.0152e+03	4.0970e+03	4.1494e+03	4.1779e+03	4.1895e+03	4.1911e+03	4.1876e+03	4.1817e+03
23	3.8522e+03	3.9643e+03	4.0506e+03	4.1110e+03	4.1485e+03	4.1680e+03	4.1747e+03	4.1735e+03	4.1676e+03
24	3.8156e+03	3.9196e+03	4.0034e+03	4.0661e+03	4.1092e+03	4.1351e+03	4.1467e+03	4.1474e+03	4.1407e+03
25	3.8068e+03	3.8967e+03	3.9711e+03	4.0294e+03	4.0725e+03	4.1011e+03	4.1159e+03	4.1183e+03	4.1103e+03
26	3.8340e+03	3.9059e+03	3.9655e+03	4.0133e+03	4.0505e+03	4.0770e+03	4.0924e+03	4.0959e+03	4.0876e+03
27	3.8913e+03	3.9453e+03	3.9880e+03	4.0217e+03	4.0487e+03	1986	4.0831e+03	4.0876e+03	4.0809e+03
28	3.9575e+03	3.9976e+03	4.0249e+03	4.0442e+03	4.0600e+03	4.0736e+03	1976	4.0919e+03	4.0902e+03
29	4.0035e+03	4.0371e+03	4.0533e+03	4.0606e+03	4.0660e+03	4.0733e+03	1989	4.0948e+03	4.1023e+03
30	4.0081e+03	4.0426e+03	4.0534e+03	4.0525e+03	4.0500e+03	1976	1970	1983	4.0947e+03
31	3.9675e+03	4.0088e+03	4.0205e+03	4.0166e+03	4.0094e+03	4.0070e+03	1983	4.0293e+03	4.0529e+03
32	3.8915e+03	3.9422e+03	3.9604e+03	3.9604e+03	3.9545e+03	3.9510e+03	1984	3.9650e+03	3.9849e+03
33	3.7948e+03	3.8540e+03	3.8821e+03	3.8920e+03	3.8946e+03	3.8963e+03	1993	3.9051e+03	3.9154e+03
34	3.6902e+03	3.7546e+03	3.7922e+03	3.8141e+03	3.8297e+03	1990	3.8532e+03	3.8592e+03	3.8622e+03
35	3.5877e+03	3.6535e+03	3.6971e+03	3.7282e+03	1987	3.7813e+03	3.8037e+03	3.8181e+03	3.8231e+03
36	3.5032e+03	3.5680e+03	3.6139e+03	3.6489e+03	1985	3.7153e+03	3.7484e+03	3.7751e+03	3.7909e+03
37	3.4376e+03	3.5019e+03	3.5494e+03	3.5854e+03	1980	3.6512e+03	3.6874e+03	3.7225e+03	3.7511e+03
38	3.3873e+03	3.4540e+03	3.5062e+03	3.5450e+03	1970	3.6052e+03	3.6373e+03	3.6723e+03	3.7071e+03
39	3.3180e+03	3000	3000	1950	3.5353e+03	3.5617e+03	3.5875e+03	3.6163e+03	3.6486e+03
40	3.2257e+03	3.3021e+03	2500	1990	3.4847e+03	3.5175e+03	3.5438e+03	3.5684e+03	3.5949e+03
41	3.1176e+03	3.1888e+03	3.2660e+03	2000	3.4010e+03	3.4483e+03	3.4856e+03	3.5160e+03	3.5431e+03
42	3.0323e+03	3.0867e+03	3.1538e+03	3.2258e+03	3.2961e+03	3.3581e+03	3.4125e+03	3.4581e+03	3.4961e+03
43	2.9824e+03	3.0151e+03	3.0618e+03	3.1189e+03	3.1824e+03	3.2466e+03	3.3108e+03	3.3711e+03	3.4258e+03
44	2.9693e+03	2.9837e+03	3.0092e+03	3.0452e+03	3.0907e+03	3.1426e+03	3.2010e+03	3.2632e+03	3.3266e+03

Posteriormente se le aplica la rutina del ítem 4.5.1 para visualizar el tomograma en 2.5 D (geometría cuadrada) y la rutina del ítem 4.5.3 para generar una hypermatriz y visualizar el tomograma en 3.5 D (geometría cilíndrica), adjudicando 70 tomogramas 2.5 D cada milímetro a lo largo de los 7 cm del eje Z (ver figuras 82 y 83).

**Figura 80. Modificación matriz Sg4Vp: Matriz Mfrac**



**Figura 81. Tomografía Acústica 3.5 D: Microfracturas Sintéticas**



Tanto en la figura 82 y 83 se puede apreciar que las microfracturas sintéticas cumplen con el principio de paralelismo y subparalelismo de la teoría de Hudson (1980), este ejercicio académico es fundamental, ya que este modelo de microfractura es la base teórica-ideal de poder visualizar las microfracturas en las

rocas y en cuanto a la matrices generadas se esperan valores discontinuos de  $V_{pm}$  como en el caso de la matriz  $M_{frac}$ .

#### 4.7. ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE MICROFRACTURAS A PARTIR DE LOS MODELOS MICROFRACTURADOS CILINDRICOS 3.5 D<sup>32</sup>

El valor cuantitativo de la densidad de microfractura ( $D_{mf}$ ) es un valor porcentual de microfractura ( $mf$ ) respecto al volumen total de la roca, luego:

$$D_{mf} = \frac{Vol_{mf}}{Vol_{Total\ Roca}} \times 100 \quad [\%] \quad Ec. 4$$

A partir del anterior planteamiento se debe programar una subrutina que cuente el número de celdas de la hypermatriz 3.5 D (roca microfracturada virtual) que tenga valores de velocidad de microfracturas, se puede optar por un rango de velocidad ya que ésta no es puntual.

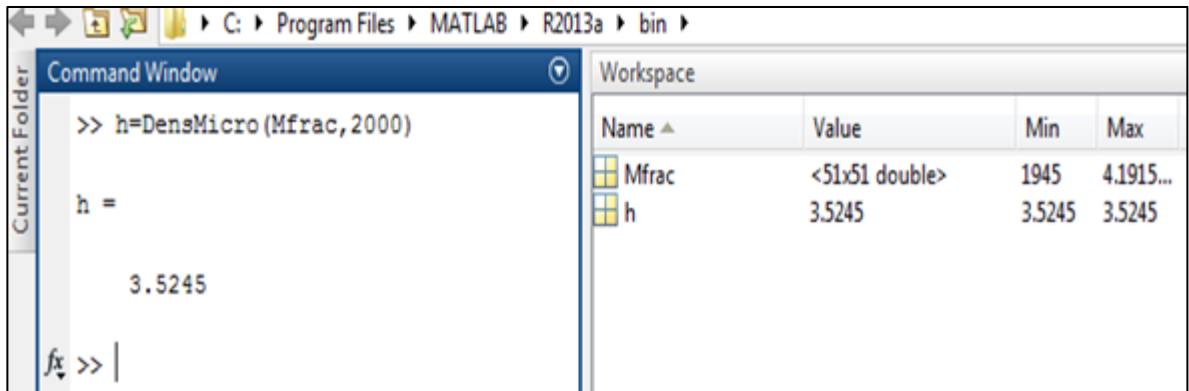
Para poder cumplir con la ecuación 4, se ha creado una función como subrutina llamada "DensMicro", ésta como datos de entrada pide el nombre de la hypermatriz y la velocidad a la cual por debajo de este valor se quiere cuantificar las celdas, entregando un valor  $h$  como valor porcentual de densidad de microfractura.

Haciendo una prueba se introduce los valores a la función "Densmicro", en este caso  $M_{frac}$  y 2000, queriendo decir que se cuantificará las celdas de velocidades menores a 2000 de la hypermatriz  $M_{frac}$ , las divide por el número total de celdas y las multiplique por 100, de esta manera es generado un valor  $h$  de densidad de microfractura de 3,5345 % como se puede observar en la figura 84.

---

<sup>32</sup> GÓMEZ, Luis. Rutinas MATLAB®: Tomografía Acústica. UIS. 2013

**Figura 82. Ejecución Función DensMicro en interfaz MATLAB®**



Para validar lo anterior, se ha realizado una prueba escritorio a partir del ejercicio académico que consistió en generar la hypermatriz *Mfrac* 3.5 D, se modificaron 72 celdas de las 2043 que tiene la matriz circular, luego como la hypermatriz 3.5 D fue construida a partir de la repetición de 70 veces la matriz *Mfrac* en el eje Z, el número total de celdas es 143010 y de microfracturas es 5040.

Para contar el número de celdas en la matriz circular nos basamos en un factor de corrección que entrega el área del círculo circunscrito en un cuadrado, el análisis matemático es el siguiente:

- Área del Cuadrado:

$$A_{cu} = L^2 \quad Ec. 5$$

- Área del Circulo:

$$A_{ci} = \frac{\pi L^2}{4} \quad Ec. 6$$

El factor de corrección (FC) correspondiente del área de un círculo circunscrito a partir de un área cuadrada es:

- Factor de corrección:

$$FC = \frac{Aci}{Acu} = \frac{\pi L^2}{4 L^2} \quad Ec.7$$

$$FC = \frac{\pi}{4} \cong 0,7854$$

Por lo tanto:

- N° total de celdas Matriz cuadrada =  $51 \cdot 51 = 2601$
- N° total de celdas Matriz Circular =  $Acu \cdot FC = 2601 \cdot 0,7854 = 2043$

Aplicando la ecuación 4, la prueba escritorio sería:

$$Dmf = \frac{{}_0^{Nmz} NCVmf}{FC * DimMat * Nmz} * 100 \quad \% \quad Ec.8$$

Dónde:

- Nmz= Número de matrices Eje Z
- NCVmf= Número de celdas con velocidad de microfractura
- DimMat= Dimensión de la matriz cuadrada

Reemplazando valores quedaría:

$$Dmf = \frac{{}_0^{70}(i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_{69} + i_{70})}{0,7854 * 51 * 51 * 70} * 100 = 3,52 \%$$

La anterior ecuación toma la sumatoria de los 70 tomogramas que están ubicados en el eje Z de la multimatriz microfracturada 3.5 D y tiene 72 celdas modificadas en cada una de ellas, esto es dividido por el total de celdas de la multimatriz, donde el valor de Dmf es de 3,52%, muy parecido al de la subrutina planteada.

Para el caso de la aplicación real, la función “*DensMicro*” está en la capacidad de contar todas las celdas que tengan velocidad de onda de microfractura ( $V_{pm}$ ) de las diferentes matrices que se obtengan al barrer la roca, es de recordar que hasta este punto se ha trabajado solo con una matriz  $Sg4Vp$  ofrecida por LMR-ICP.

## 5. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ACÚSTICA EN MUESTRAS REALES

*“En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento”*

*Albert Einstein*

Los modelamientos de los fenómenos físicos han servido como respuesta a diversos estudios hechos a los comportamientos que encontramos en la naturaleza, la precisión de estos se basan en la calidad de abarcar todos los detalles que rigen dicho comportamiento. En esta investigación, el fenómeno físico estudiado son las “*microfracturas*” como propagación de una discontinuidad en materiales rocosos (medio continuo); la técnica utilizada es la Tomografía Acústica, la cual como técnica no destructiva, conlleva la inversión de ondas acústicas dentro de las muestras escogidas con el fin de cuantificar el tiempo de viaje, y con sus correspondientes distancias entre cristales piezoeléctricos emisores y receptores, calcular trayectorias de velocidades; con este último atributo poder generar tomogramas acústicos en función de la velocidad de ondas acústicas.

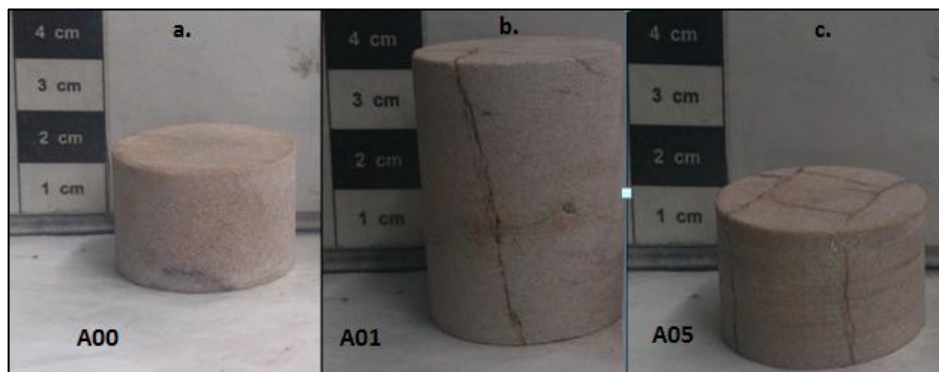
En esta sección de la investigación se coloca en práctica los capítulos anteriores, partiendo desde la teoría de las microfracturas, la propagación de ondas acústicas y la definición de la técnica de Tomografía Acústica, se escogieron las muestras más representativas en las cuales se pudiera visualizar las microfracturas virtualmente. La instrumentación general de adquisición acústica se integró para dar inicio a la generación de señales, las cuales como se indica en el presente capítulo fueron sometidas a mejoramientos para optimizar la calidad de las mismas. La creación de plugs sintéticos de cementos fue fundamental para darle

validación a la instrumentación y la metodología implementada. Finalmente, el entrenamiento de rutinas en MATLAB® para generar tomogramas acústicos 3.5 D de rocas virtuales por medio de datos de la literatura y rocas reales a partir de datos de laboratorio, es la base principal para procesar los datos adquiridos a partir de las señales invertidas en las muestras analizadas.

## 5.1 MUESTRAS SELECCIONADAS

El análisis hecho para seleccionar las muestras en las cuales se alcanzarán a detectar microfracturas como anomalías de un medio continuo (matriz rocosa) es enfatizado en la intensidad y apertura de la microfractura. En las areniscas se encontraron muestras que no contenían microfracturas como la A00 presentada en la figura 85a, microfracturas secas y abiertas a simple vista como la A01 (ver figura 85b), y microfracturas secas pero muy cerradas y/o compactas como la A05 (ver figura 85c), de igual manera las areniscas A02 hasta la A06 presentan iguales características que la A02 como se puede apreciar en la figura 51.

**Figura 83. a. Arenisca A00 b. Arenisca A01 c. Arenisca A05**

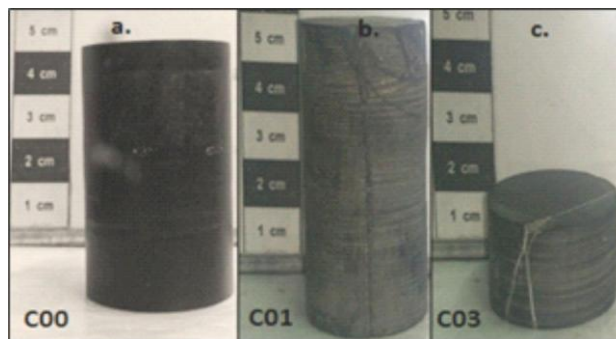


De acuerdo con el anterior orden de ideas, se seleccionó la Arenisca A01 debido a que su intensidad y gran apertura de microfracturamiento con inclusiones de

volúmenes de aire permiten mayores contrastes de tiempo de propagación respecto a la matriz cuarzosa en comparación a las demás muestras.

En cuanto a las calizas, al igual que las areniscas, se encontraron muestras sin intensidad de microfracturamiento como la C00 (ver figura 86a), otras con intensidad de microfracturamiento no abiertas pero con inclusión de petróleo bituminoso como la C01 (ver figura 87b) y C02, y con inclusiones de precipitaciones de cemento carbonatado como la C03 (ver figura 87c).

**Figura 84. a. Caliza C00 b. Caliza C01 c. Caliza C03**



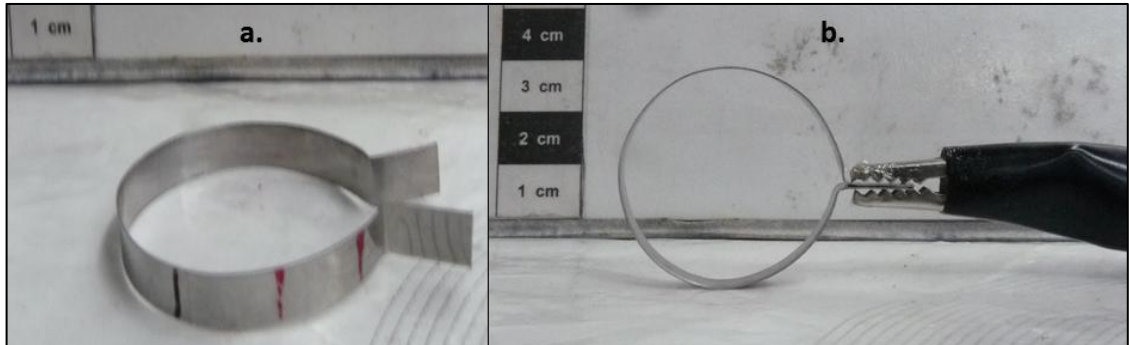
La selección fue la muestra C01, este procedimiento fue análogo a las areniscas, con la diferencia que el alto contraste de tiempo de propagación en este tipo de muestra lo genera la inclusión material orgánico (petróleo bituminoso) respecto a la matriz calcárea.

## **5.2 ABRAZADERA DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS**

Este dispositivo tiene como función hacer el mismo proceso del *Dispositivo de Barrido de Señales* propuesto en el capítulo 2, el cual es contener los PZT y poder hacer el barrido vertical en la muestra. La construcción de esta abrazadera resultó ser factible tanto económica como técnicamente debido a que se utilizó

Acero Inoxidable de espesor de 0.2 mm, favoreciendo la maleabilidad al momento de manipular el material para cortarlo y darle la forma apropiada para que ajustará a la circunferencia de las muestras de 1.25 in (ver figura 87a).

**Figura 85. a. Abrazadera Acero Inoxidable    b. Ajustamiento con caimán electrónico**



**5.2.1 Especificaciones De La Abrazadera De Señales De Adquisición Acústica.** Las especificaciones de la abrazadera se hicieron en función de las dimensiones de la muestras y de los cristales piezoeléctrico.

**Tabla 9. Especificaciones de la abrazadera**

<i>MATERIAL DE LA ABRAZADERA</i>	<i>ACERO INOXIDABLE</i>
<i>DIAMETRO DE LA MUESTRA</i>	<i>1.25 in = 3.175 cm</i>
<i>CIRCUNFERENCIA DE LA MUESTRA</i>	<i>9.9 cm</i>
<i>LARGO Y ANCHO PZT</i>	<i>5 mm</i>
<i>LARGO ABRAZADERA</i>	<i>12 cm</i>
<i>ANCHO ABRAZADERA</i>	<i>6 mm</i>
<i>ESPESOR ABRAZADERA</i>	<i>0.2 mm</i>
<i>VELOCIDAD ONDA P – ACERO</i>	<i>5800 m/s</i>
<i>VELOCIDAD ONDA P – ACERO</i>	<i>3200 m/s</i>

El material de la abrazadera debía ser escogido de un material que acústicamente estuviera caracterizado y su manejo fuera fácil al momento de la creación, para esto, se eligió el Acero Inoxidable.

La circunferencia de la abrazadera debe coincidir con el de la roca (aprox. 10 cm), para esto se diseñó el largo de la abrazadera de 12 cm con el fin de cubrir totalmente la roca, dejando dos pestañas de 1 cm cada una para poder implementar un dispositivo de ajuste, en este caso en la figura 87b un caimán electrónico.

El ancho de la abrazadera de 6 mm se diseñó de acuerdo a las dimensiones de los PZT con el fin de garantizar una efectiva adhesión.

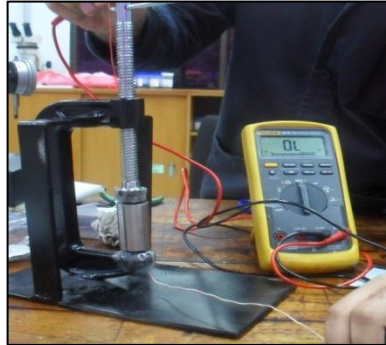
El espesor de la abrazadera viene de fábrica, debido a que ese es el mínimo espesor encontrado en el comercio, sin embargo, a menor espesor menor atenuación de la señal dentro de este material.

**5.2.2 Calibración De Los PZT.** Los cristales piezoeléctricos (PZT) son instrumentos muy fundamentales ya que por medio de ellos se puede generar ondas mecánicas (acústica) a partir de ondas eléctricas. La excitación de los PZT depende de la frecuencia de resonancia a la cual estén diseñados desde fábrica para poder generar las señales acústicas, la excitación la provoca el Generador de Pulsos. Debido que en el Laboratorio de Mecánicas de Rocas del ICP el Generador de Pulsos envía pulsos a un máximo de frecuencia de 1 MHz no fue posible utilizar los cristales onda P de 5 MHz y los cristales onda S de 3 MHz de geometría circular (diámetro 5 mm) pedidos para esta investigación; por lo tanto, fueron utilizados cristales de onda P y onda S del Laboratorio de Mecánica de Rocas de 0.6 MHz los cuales están en la capacidad de ser excitados eléctricamente por el Generador de Pulsos.

Antes de adherir los PZT a la abrazadera, se realizó la calibración de los mismos utilizándose una muestra patrón de acero como se puede ver en la figura 88 de 1.5 in de diámetro, con relación longitud/diámetro (L/D) de 2, donde los PZT de

onda P son ubicados en los bordes laterales y presionados por medio de una prensa en “C” con terminales de caucho.

**Figura 86. Calibración PZT**



Una vez obtenida la señal P, se cuantificó el tiempo de viaje y teniendo el espacio recorrido (longitud de la muestra) se calculó la velocidad de la onda, comparándose esta con la velocidad de onda P en el acero obtenida en las tablas de *Acoustical Properties Of Common Materials, NDT SYSTEM, 2013*.

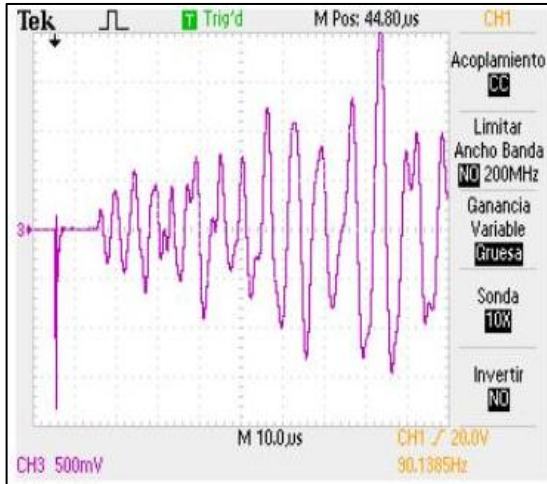
**Tabla 10. Acústica del patrón de Acero**

ACÚSTICA ACERO	
ONDA	Velocidad (m/s)
P	5800
S	3200
ACÚSTICA ONDA P ACERO EXPERIMENTAL LMERO	
<i>Espacio de Viaje</i>	2 in = 0.0508 m
<i>Tiempo de Viaje</i>	9 us
<i>Velocidad</i>	5644 m/s
<i>Error</i>	2.6 %

Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

La señal obtenida a partir de esta prueba se caracterizó por ser una señal óptima, es decir, no tiene ruido, es estable y presenta buena amplitud, además el tiempo de viaje se puede detectar fácilmente a través de la detección del primer pico de la señal como se observa en la figura 88.

**Figura 87. Señal onda P – Patrón de Acero**



Para darle un valor cuantitativo a la calidad de la señales, los tres ítems se le han asignado valores iguales (33.33%) los cuales suman 100% para una señal de óptima calidad, por ende para esta prueba, la calidad está representado en la tabla 11.

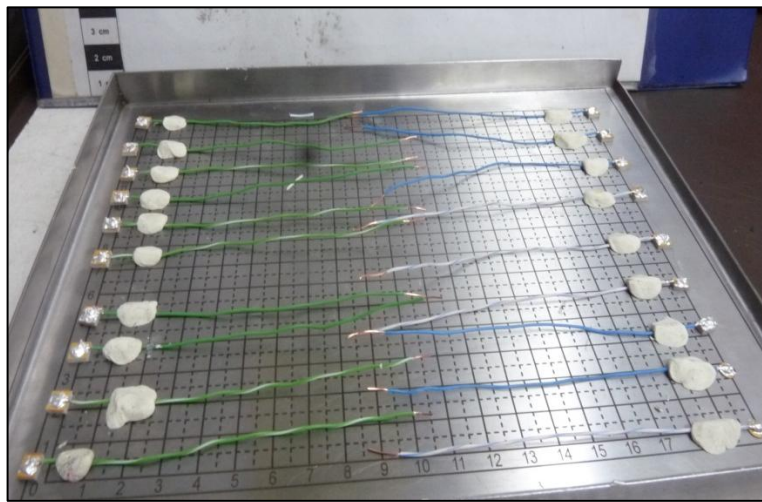
**Tabla 11. Características señal prueba patrón**

CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL	
AMPLITUD	Alta
ESTABILIDAD	Si
RUIDO	No
CALIDAD SEÑAL	100 %

**5.2.3 Adhesión De Los Pzt En La Abrazadera.** La adhesión de los PZT en la abrazadera se realiza después verificar que en su integridad física no existan grietas, imperfectos o la superficie esté rayada y de comprobar que los PZT están

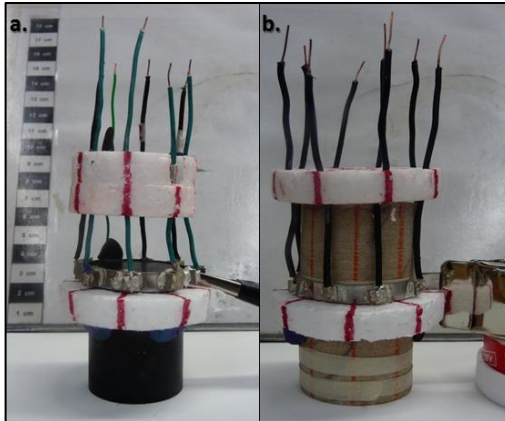
generando buenas señales acústicas por medio de una muestra patrón. Para conectar el circuito Generador de Pulsos-PZT se debe adherir cables a los PZT con Epoxico de Plata, este material es líquido al principio y una vez solidificado tiene la capacidad de ser conductivo. En la figura 90 se muestra los PZT onda P y onda S adheridos con sus respectivos cables en espera de la solidificación del epoxico de plata.

**Figura 88. Adhesión de cables a los PZT**



Después de solidificado el epoxico de plata entre los cables y los PZT, se adhirieron en su conjunto a la abrazadera de acero inoxidable, 8 PZT de ondas P y 8 PZT de ondas S ubicados en la circunferencia de la abrazadera de forma equidistante separados por ángulos de  $45^\circ$ , para esto se crearon acopladores de icopor como se muestra en la figura 91 con el fin de garantizar el contacto entre PZT y abrazadera, también la integridad de los cables para que no se suelten de los PZT al momento de manipularlos.

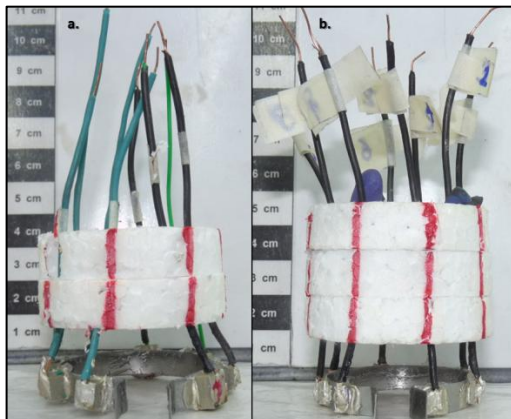
**Figura 89. Adhesión de los PZT a la abrazadera a. PZT Onda P b. PZT Onda S**



Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

La figura 92 muestra el acabado final de la Abrazadera de Adquisición de Señales Acústica, se crearon dos tipos, Abrazadera de Onda P (ver figura 90a) y de Onda S (ver figura 90b), estas se diferencian por espesor de los PZT, ya que los P por generar ondas de compresión presentan más espesor que los S; sin embargo, los PZT S generan ondas de corte que se polarizan de acuerdo la anisotropía del medio y presentan una orientación de propagación de la onda con una “muesca” en la superficie del mismo.

**Figura 90. a. Abrazadera PZT Onda P b. Abrazadera PZT Onda S**

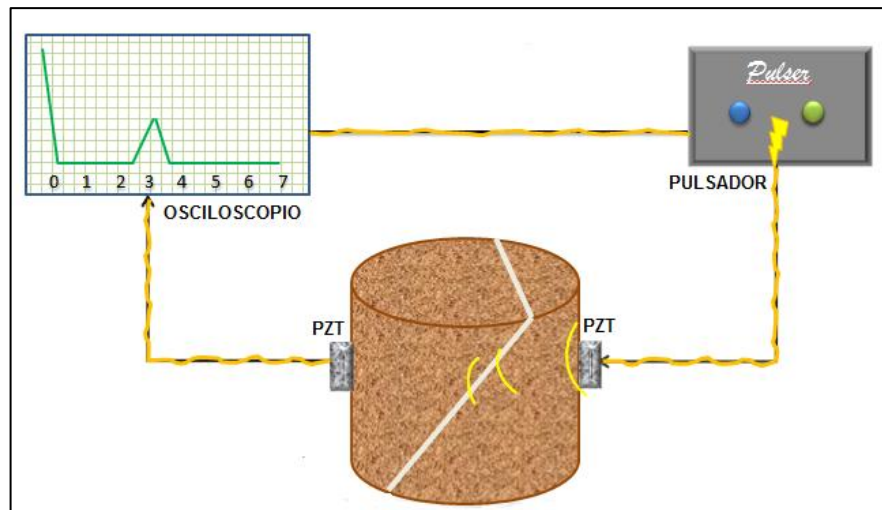


### 5.3 MONTAJE DE LA INSTRUMENTACIÓN GENERAL PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS

El montaje de la instrumentación general para adquirir señales acústicas comprende de tres dispositivos principales como se muestra en la figura 93 y que se describen en el capítulo 2:

1. Generador de Pulsos.
2. Cristales Piezoeléctricos.
3. Osciloscopio.

**Figura 91. Instrumentación General de Adquisición de señales Acústica**



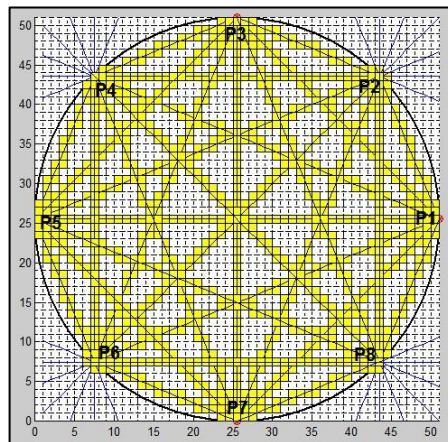
Además de los dispositivos principales, están los cables con conectores BNC y conectores tipo "caimán". En la figura anterior se puede apreciar la forma como se hace una prueba básica ultrasónica, el generador de pulsos emite ondas eléctricas a una frecuencia específica la cual coincide con la frecuencia de resonancia con la que los PZT vibran para poder generar ondas acústicas (mecánicas), de igual manera las convierte en ondas eléctricas y son recibidas en el osciloscopio donde se detecta el primer pico de la señal, traduciéndose esto

como el tiempo de viaje de la onda acústica adentro de la roca, la señal directa entre pulsador-osciloscopio se traduce como el pulso de referencia que marcará el pico de señal del tiempo cero en el osciloscopio.

## 5.4 MEJORAMIENTO DE LAS SEÑALES ACÚSTICAS

La descripción anterior de la prueba básica ultrasónica es una manera teórica en la que el montaje de instrumentación general no tiene problemas con la calidad de señal generada en el osciloscopio; sin embargo, generar una señal óptima, es decir, sin ruidos, estable, con alta amplitud fue el emprendimiento de mejoras técnicas dentro de una curva de aprendizaje. Esta curva de aprendizaje parte de ajustar la abrazadera con un caimán electrónico, después con una pinza de muselina y por último aplicar sello con grasa de vació. Cada PZT será emisor y receptor en sus respectivos turnos, generando de esta manera señales representadas por trayectorias como se muestra en la figura 94, estas señales deben cumplir con las especificaciones óptimas descritas anteriormente.

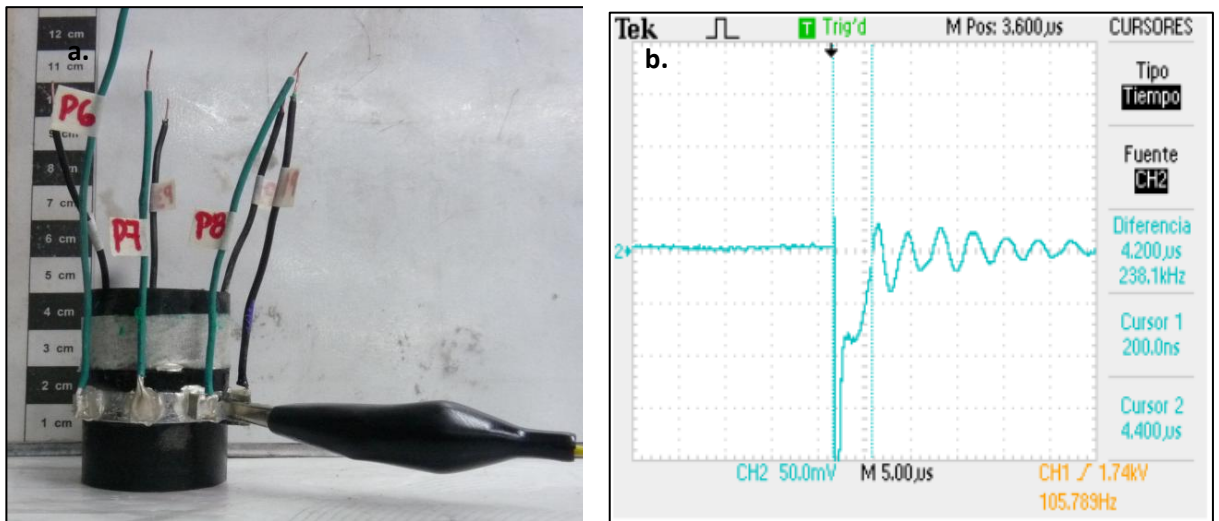
**Figura 92. Trayectorias de las señales acústicas**



**5.4.1 Ajustamiento Con Caimán Electrónico.** Debido a que la abrazadera debe ser ajustada, en primera instancia, esta se hizo con un “caimán electrónico” en la

que se ejercía el cierre necesario para cubrir totalmente la roca, sin embargo, el ajuste generado no era totalmente lo suficiente fuerte para presionar la roca y por lo tanto la señal era deficiente al momento de adquirirla como se puede ver en la figura 95a.

**Figura 93. a. Montaje caimán electrónico b. Señal Onda P Montaje caimán electrónico**



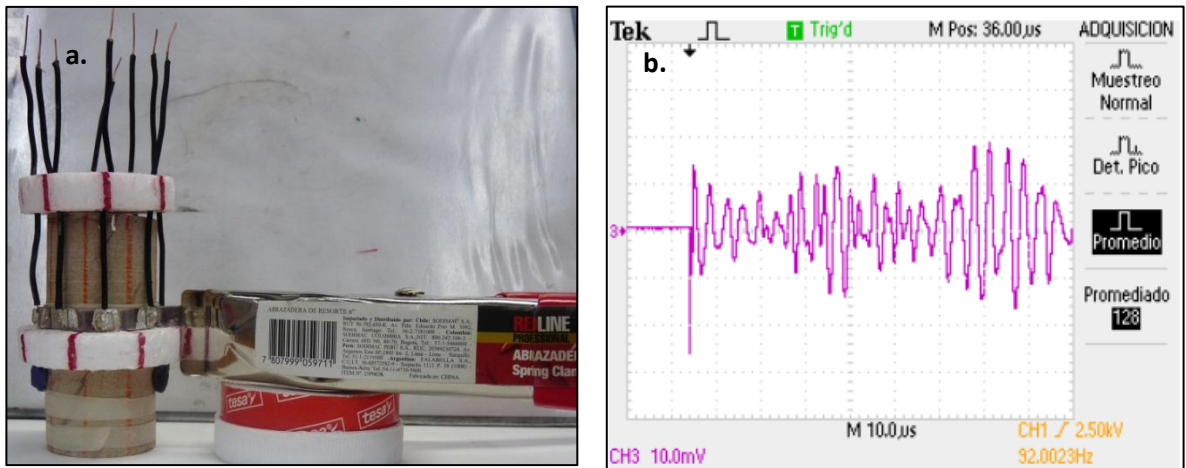
Las características de esta señal de onda P (ver figura 95b) están descritas y cuantificadas en la tabla 12, como se puede apreciar su calidad no se aproxima al 100% y por ende no puede ser tomada en cuenta como un dato confiable de adquisición acústica.

**Tabla 12. Características señal montaje caimán electrónico**

CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL	
AMPLITUD	Media-Alta
RUIDO	No
ESTABILIDAD	No
CALIDAD DE SEÑAL	67 %

**5.4.2 Ajustamiento Con La Pinza De Muselina Y Grasa De Vacío.** El problema en este punto radica en que no se está ejerciendo la suficiente fuerza a la abrazadera para poder tener una señal con mayor amplitud, estable y poner cuantificar el tiempo de viaje; la solución inmediata fue reemplazar el terminal de “caimán electrónico” por una pinza de muselina o abrazadera de resorte de 6” (ver figura 96) la cual ejerce mayor fuerza de ajuste a la abrazadera y que está pueda cubrir efectivamente la roca.

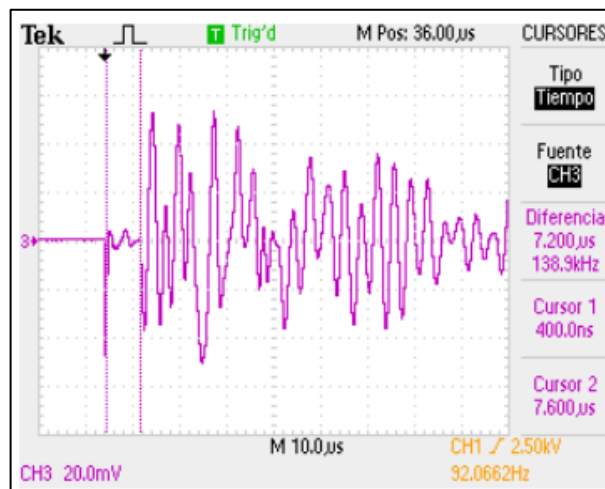
**Figura 94. a. Montaje pinza de muselina b. Señal Onda P Montaje pinza de muselina**



La calidad de la señal P generada (ver figura 96b) con este mejoramiento no llega a un valor próximo al 100% debido al ruido que se presenta al inicio y no deja

cuantificar el tiempo de llegada de la misma, este problema es asociado a la falta de sellamiento de los pequeños espacios airosos dejados entre la abrazadera y la superficie de la roca. La solución inmediata aplicada fue utilizar grasa de vacío “*Dow Corning*” permitiendo de esta manera sellar los espacios descritos, permitiendo el paso de la señal de la abrazadera a la roca sin ningún inconveniente de atenuación y ruido generado por el aire, como resultado se obtiene una señal óptima la cual aparece en la figura 97, sin ruido y que se puede cuantificar el tiempo de viaje de la señal.

**Figura 95. Señal P óptima generada por el mejoramiento con grasa de vacío**



Finalmente de esta manera se llegó a una calidad de señal de 100% tal cual como se generó en la prueba con el patrón de acero (ver tabla 12), a partir de este montaje se generaron con certeza datos acústicos de confianza para la representación de la técnica de tomografía acústica.

**Tabla 13. Características señal montaje pinza de muselina con grasa de vacío**

CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL	
AMPLITUD	Alta
ESTABILIDAD	Si
RUIDO	No
CALIDAD DE SEÑAL	100 %

### 5.5 PLANTILLA DE EXCEL PARA EL CALCULO DE DISTANCIAS

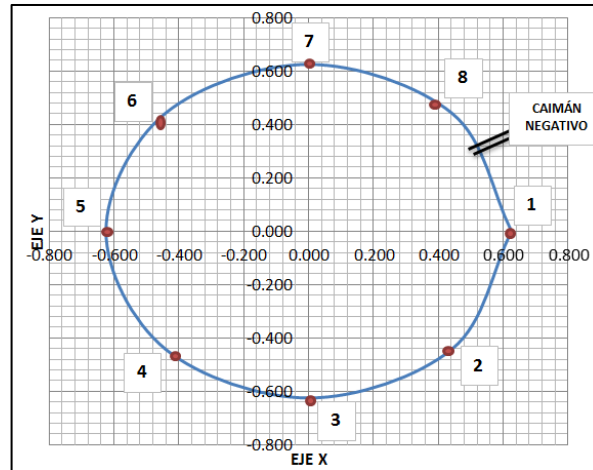
Obtenidos los tiempos de propagación de las señales es importante calcular las distancias respectivas, a partir de los puntos equidistantes donde se ubican los PZT en la abrazadera se puede ubicar el punto de origen (0,0) en el centro y con el radio poder calcular la posición de cada uno de ellos. Para esto se hizo una plantilla en Excel en la que se pedían *datos de entrada* (celdas verdes) y se producían *data generada* (celdas azules) como se muestra en la tabla 13.

**Tabla 14. Sección ingreso de datos - Calculo de distancias**

Diámetro (D) [in]	Radio (r=D/2) [in]	Cristales Total (CT)	Delta Ángulo ( $\Delta\phi=360/CT$ )	N. Cristal	$[\phi]$	$X=r\cos\phi$	$Y=r\sin\phi$
1.25	0.63	8	45	1	0	0.625	0.000
				2	45	0.442	0.442
				3	90	0.000	0.625
				4	135	-0.442	0.442
				5	180	-0.625	0.000
				6	225	-0.442	-0.442
				7	270	0.000	-0.625
				8	315	0.442	-0.442
				1	360	0.625	0.000

Una vez calculadas las posición en coordenadas cilíndricas, se graficó el diagrama de la circunferencia de la abrazadera con la ubicación de los puntos de los PZT como se muestra en la figura 98.

**Figura 96. Grafica de posiciones de los PZT**



La distancia entre los puntos equivalente a la distancia de las trayectorias de velocidades es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + y_2 - y_1^2} \quad \text{Ec. 9}$$

Finalmente se calcula cada una de las distancia numerándose respectivamente, en total son 56.

**Tabla 15. Calculo de las distancias de las trayectorias entre PZT**

Trayectoria	Transmisor	Receptor	Distancia (d) [in]
1	1	2	0.478
2	1	3	0.884
3	1	4	1.155
4	1	5	1.250
5	1	6	1.155
6	1	7	0.884
7	1	8	0.478
8	2	1	0.478
9	2	3	0.478
10	2	4	0.884
11	2	5	1.155
12	2	6	1.250

Trayectoria	Transmisor	Receptor	Distancia (d) [in]
13	2	7	1.155
14	2	8	0.884
15	3	1	0.884
16	3	2	0.478
17	3	4	0.478
18	3	5	0.884
19	3	6	1.155
20	3	7	1.250
21	3	8	1.155
22	4	1	1.155
23	4	2	0.884
24	4	3	0.478
25	4	5	0.478
26	4	6	0.884
27	4	7	1.155
28	4	8	1.250
29	5	1	1.250
30	5	2	1.155
31	5	3	0.884
32	5	4	0.478
33	5	6	0.478
34	5	7	0.884
35	5	8	1.155
36	6	1	1.155
37	6	2	1.250
38	6	3	1.155
39	6	4	0.884
40	6	5	0.478
41	6	7	0.478
42	6	8	0.884
43	7	1	0.884
44	7	2	1.155
45	7	3	1.250
46	7	4	1.155
47	7	5	0.884
48	7	6	0.478
49	7	8	0.478
50	8	1	0.478
51	8	2	0.884

Trayectoria	Transmisor	Receptor	Distancia (d) [in]
52	8	3	1.155
53	8	4	1.250
54	8	5	1.155
55	8	6	0.884
56	8	7	0.478

## 5.6 PLANTILLA DE EXCEL PARA EL CALCULO DE VELOCIDADES

Cada uno de los datos de las matrices obtenidas por corte o sección del barrido vertical hecho en la roca estarán en función de la velocidad de onda acústica (P o S), para esto se necesita calcular este parámetro a partir del tiempo y la distancia de trayectorias entre PZT; sin embargo, los PZT no están adheridos totalmente a la muestras, sino a la abrazadera de acero inoxidable, por lo tanto es importante calcular el tiempo de propagación de la onda dentro de este material que acústicamente ya está caracterizado (Tiempo Abrazadera) y se conoce su espesor, posteriormente debe ser restado al Tiempo de Viaje Total (tvt) para poder obtener realmente en Tiempo de Viaje Roca (tvr), este último es el que se tiene en cuenta para calcular la velocidad de onda al interior de la muestra, la tabla 14 muestra parte de la plantilla hecha en Excel la cual está en capacidad de hacer estos cálculos de velocidad para poder generar las matrices.

**Tabla 16. Calculo de las primeras 6 velocidades de trayectorias entre PZT – Muestra C01**

CALCULO VELOCIDAD ONDA S: MUESTRA C01						
Trayectoria	Tiempo de viaje total (tvt) [s]	Espesor Abrazadera [m]	Vel. Onda S Acero [m/s]	Tiempo Abrazadera [s]	Tiempo de Viaje Roca (tvr) [s]	Vel. Onda S Roca [m/s]
1	0.000009	0.0002	3200	6.25E-08	8.9375E-06	1359.463
2	0.0000087	0.0002	3200	6.25E-08	8.6375E-06	2599.206
3	0.00001	0.0002	3200	6.25E-08	9.9375E-06	2951.766

CALCULO VELOCIDAD ONDA S: MUESTRA CO1						
Trayectoria	Tiempo de viaje total (tvt) [s]	Espesor Abrazadera [m]	Vel. Onda S Acero [m/s]	Tiempo Abrazadera [s]	Tiempo de Viaje Roca (tvr) [s]	Vel. Onda S Roca [m/s]
4	0.000012	0.0002	3200	6.25E-08	1.19375E-05	2659.686
5	0.0000125	0.0002	3200	6.25E-08	1.24375E-05	2358.446
6	0.0000121	0.0002	3200	6.25E-08	1.20375E-05	1865.058

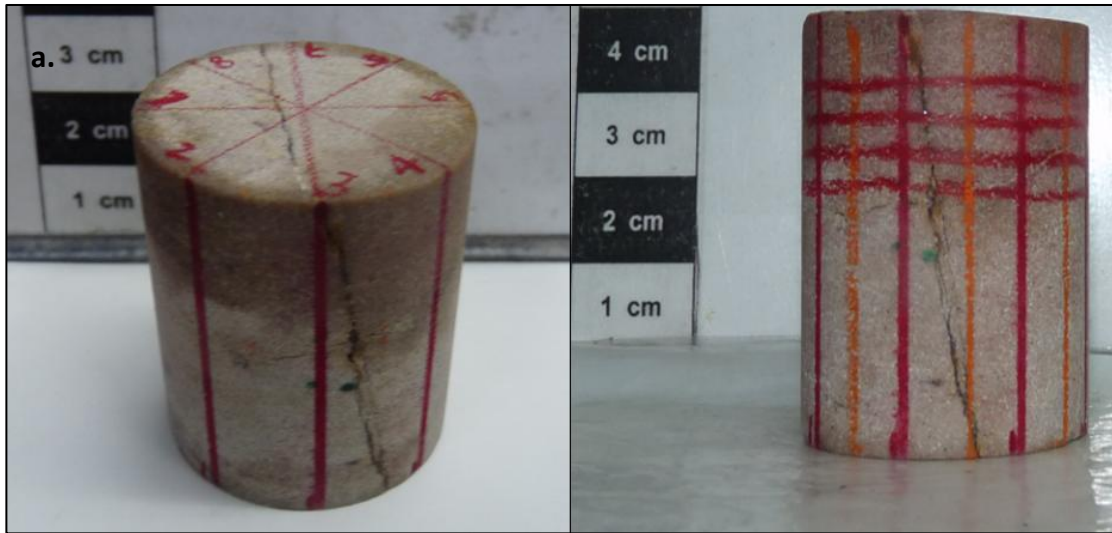
Obtenida la anterior información se exporta a la rutina de Matlab *Tomografia090911.m*, esta hace parte de los productos de innovación y tecnología del Laboratorio Mecánica de Rocas, ICP-ECOPETROL<sup>33</sup>, por lo tanto el autor de esta investigación entrega la información de todas las rocas analizadas (areniscas, calizas, cementos) como se muestra en la tabla 14 y el administrador encargado de la rutina genera las matrices de velocidad acústica cuyo tamaño en pixeles de 51X51 tal cual como se apreció en la figura 70.

## 5.7 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: ARENISCA – A01

La tomografía acústica en areniscas fue practicada solamente a la muestra A01 (ver figura 99) debido a las características mencionadas en el ítem 5.1 del presente capítulo. Para la ubicación de los PZT en la roca se trazaron 8 líneas que atravesaran 8 puntos enumerados donde estratégicamente estarían ajustados los PZT, esto con el fin de tener referencias al momento de generar el tomograma acústico; de igual manera, se trazaron 4 líneas horizontales o “niveles” para ubicar la abrazadera cada vez que se haga un movimiento vertical. La primera línea horizontal está a una distancia de 6 mm respecto al borde superior y coincide con el ancho de la abrazadera, las tres siguientes tienen espacios de 3 mm para un total de barrido por muestra de 15 mm.

<sup>33</sup> Rutina desarrollada por L. Ramírez, A. Lache, J. M. Carvajal Jiménez. 2011

**Figura 97. Arenisca A01**



Se realizó el montaje de la abrazadera con previa impregnación de grasa de vacío en su interior para evitar el ruido y ajustamiento con la pinza de muselina para la generación de una señal estable, en la figura 100 se puede verificar el montaje de la abrazadera en el primer nivel del barrido vertical.

**Figura 98. Montaje Arenisca A01**



**5.7.1 Resultados Tomografía Acústica 2.5 D.** Los primeros resultados que se obtienen son matrices bidimensionales que generan individualmente tomogramas acústicos 2.5 D, es importante analizarlos cada uno por separados ya que la tendencia de las microfracturas (discontinuidades) debe coincidir con la realidad física de la muestra, una vez hecho este análisis se procede a ubicar cada uno de los tomogramas en el Z para generar el Tomograma Acústico 3.5 D y por ende cuantificar la densidad de microfractura. La señal o tipo de abrazadera utilizado es de Onda S, luego el tomograma acústico está en función de la velocidad de este tipo de onda.

Las matrices se generan en un dominio cartesiano (cuadrado) y por ende deben ser pasadas a un dominio cilíndrico (circular) para ir adquiriendo la geometría real de las muestras, esto se hace por medio de una rutina en Matlab® llamada "*Circular Domain*" descrita anteriormente en el ítem 4.5.3 del capítulo 4.

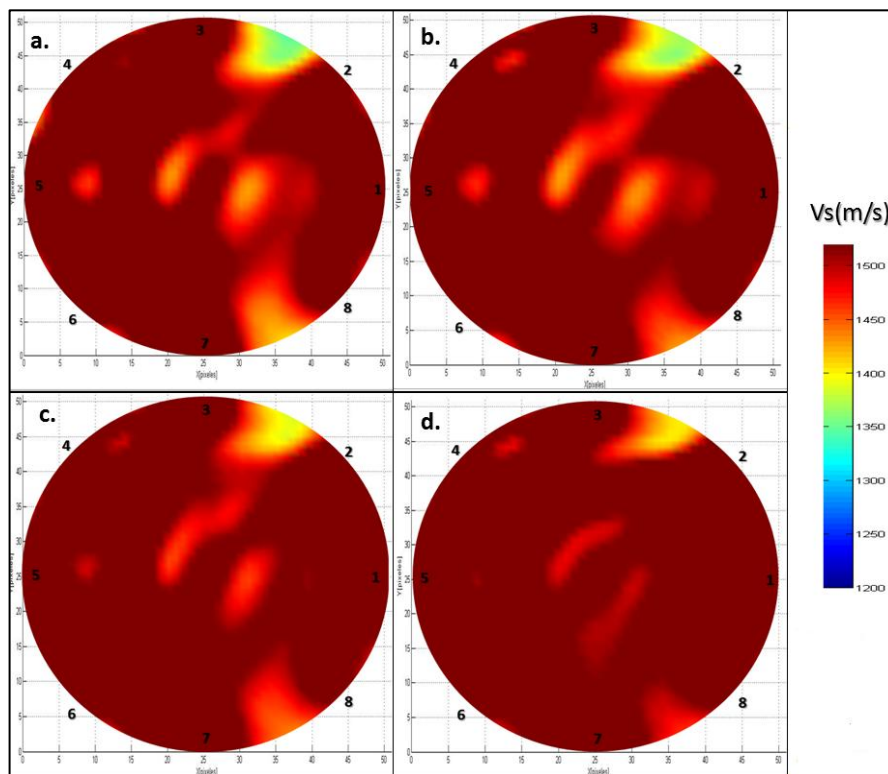
La figura 101a corresponde al tomograma acústico de la muestra A01 en el primer nivel, su dominio circular puede ser comparado con la figura 99a en la cual se puede ver la posición enumerada de cada uno de los PZT. Esta arenisca cuarzosa presenta una microfractura que la atraviesa en un plano casi vertical alrededor de 10° de desviación (referencia vertical), desde la vista superior se extiende desde el punto 3 que corresponde al PZT 3 hasta la inmediación de los puntos 7 y 8.

El gradiente (rango) de velocidades de onda S generado por la rutina oscila entre 1200 y 1550 m/s; sin embargo, la gama de colores esta entre verde amárela, amarillo y rojo. Se puede observar que las tonalidades rojas corresponden a la matriz cuarzosa de la arenisca con velocidad cercana a los 1550 m/s y las tonalidades amarillas marcan la tendencia de la microfractura, más no su estructura finamente definida, con velocidades entre 1390 y 1425 m/s. De igual

manera la tendencia de la microfRACTURA se encuentra entre las posiciones descritas en la realidad física de la roca.

En las demás figuras 101b, 101c y 101d las cuales corresponden a los niveles 2, 3 y 4 respectivamente se observa claramente la misma tendencia; sin embargo, a medida que la abrazadera va bajando la tonalidad amarilla tiende a desaparecer, eso se debe a que a pesar que la muestra esta microfRACTURADA en su interior, existe precipitación de cemento lo cual permite integridad en todo el volumen de la muestra separado por el plano de microfRACTURA, este cemento permite propagar la onda como si fuera un medio continuo, es decir, matriz rocosa.

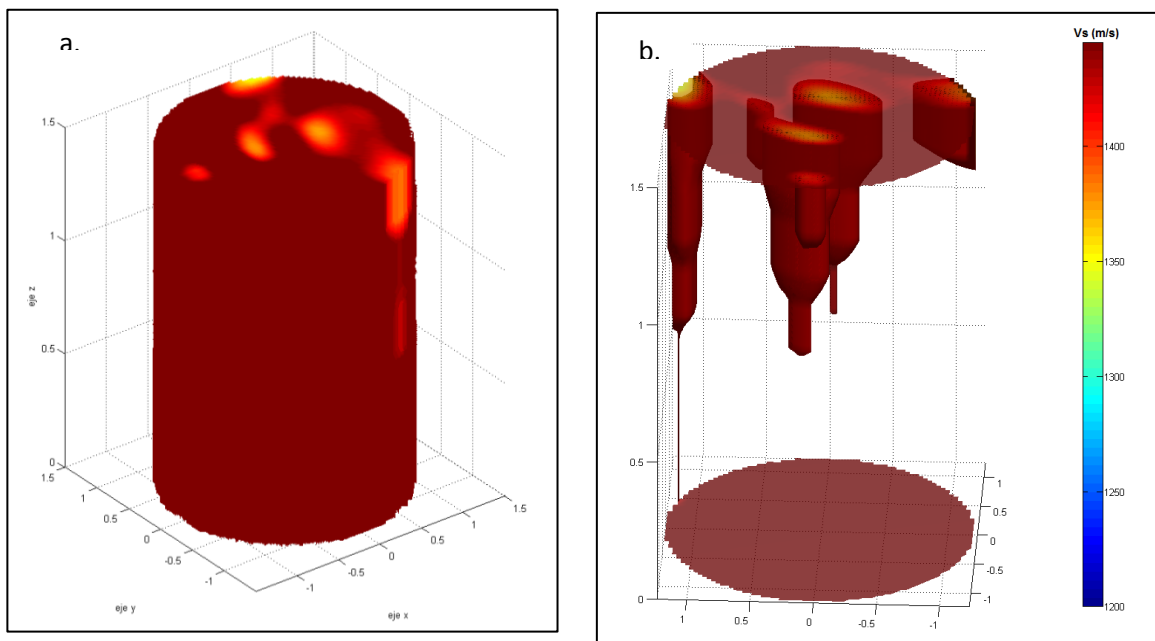
**Figura 99. Tomografía Acústica 2.5 D A01 a. Nivel 1 b. Nivel 2 c. Nivel 3 d. Nivel 4**



**5.7.2 Visualización Tomografía Acústica 3.5 D.** Aplicada la rutina *VirtualRock3* en donde los tomogramas acústicos 2.5 D son ubicados en el eje Z de acuerdo al

orden de muestreo vertical (niveles), se obtiene los Tomogramas Acústicos en 3.5 D como se puede apreciar en la figura 102a, en este caso la visualización es externa y se logra generar la tendencia que tiene la microfRACTURA en la realidad física de muestra. Por otro lado, mediante el comando *alphamap* se puede visualizar las microfRACTURAS internamente como lo muestra la figura 102b, confirmando la presencia de precipitación de cemento a interior de la microfRACTURA.

**Figura 100. Tomografía Acústica 3.5 D A01 a. Visualización Externa b. Visualización Interna**



**5.7.3 Estimación De La Densidad De Microfractura Arenisca A01: Rutina Densmicro.** La aplicación de la rutina *DensMicro* descrita en el capítulo 4 es para calcular el parámetro de densidad de microfRACTURA en las rocas, esta como información pide el nombre interno de la matriz y el valor máximo que caracteriza la velocidad de onda acústica las microfRACTURAS. A partir del rango de velocidades de onda S correspondientes para las microfRACTURAS de la muestra A01 se estableció un máximo de 1400 m/s, como se puede apreciar en la figura

103 se muestra el ejecutable en Matlab® el cual calcula este parámetro para la muestra A01 en 1.0216 % de volumen de microfractura.

**Figura 101. Aplicación rutina *DensMicro* – A01**

```
function h=DensMicro(Data,vel)
%Funcion para determinar la densidad
% en porcentaje de los datos menores a cierta velocidad

%data = matriz (n x n)
%vel = velocidad maxima de calculo

if nargin ~= 2
    error('Ingrese Dos argumentos "DensMicro(data,vel)" ',
end

[i j k] = size(Data);
[m n] = find(Data <= vel);
long=length(m);
Dens=100*length(m)/(i*j*k);

%h=['Densidad =',num2str(Dens),' ' '%'];
h=Dens;
>> h=DensMicro(data,1400)

h =

    1.0216
```

## 5.8 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: CALIZA – C01

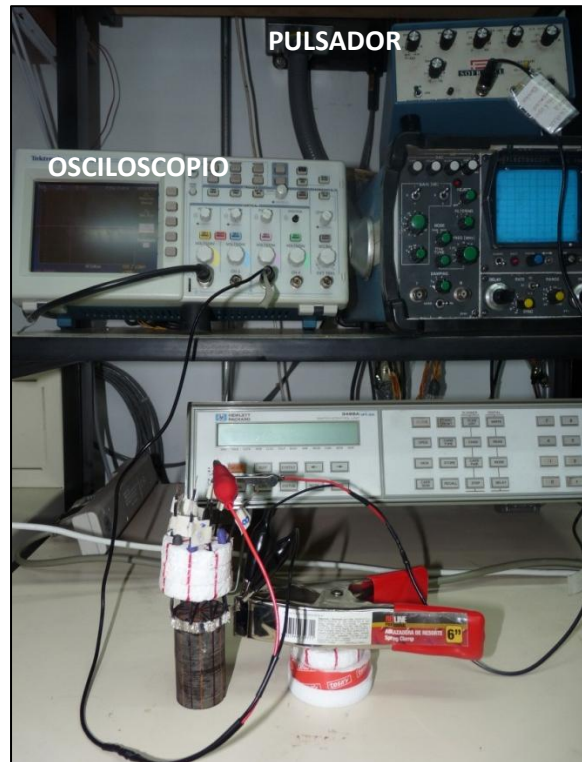
Análogamente a la arenisca A01, de las calizas fue seleccionada la muestra C01 (ver figura 104) bajo las consideraciones del ítem 5.1 del presente capítulo. La presencia significativa de petróleo bituminoso dentro de sus microfracturas fue un factor importante para su selección, además de la apertura

**Figura 102. Caliza C01**



Se practicó el respectivo montaje para cerrar el circuito entre pulsador, muestra, osciloscopio (ver figura 105), como en cualquier prueba básica ultrasónica se verificó con el multímetro que no exista corto para garantizar la integridad de los equipo

**Figura 103. Montaje de Instrumentación general de adquisición acústica - Muestra C01**

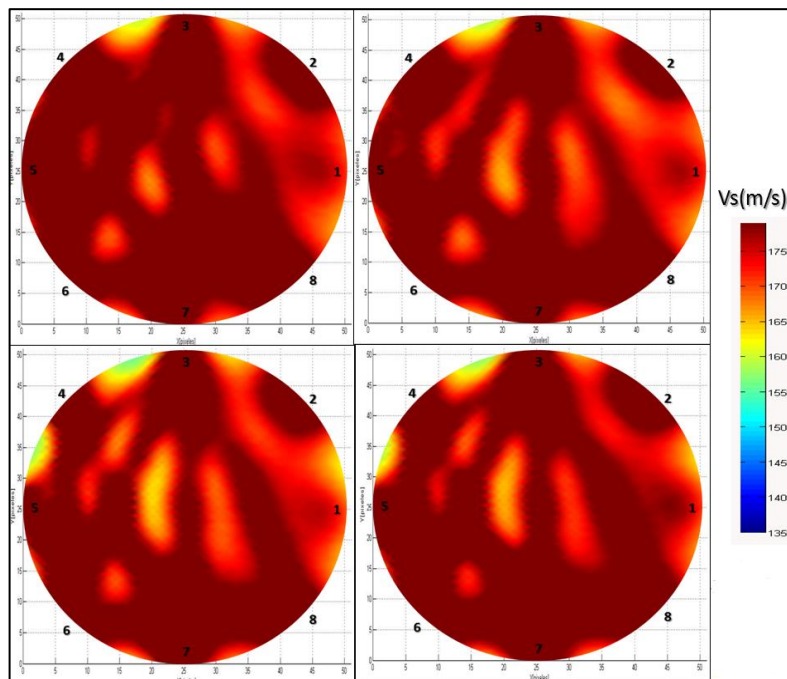


**5.8.1 Resultados Tomografía Acústica 2.5 D.** El gradiente de velocidades de Onda S generado por la rutina para esta muestra oscila entre 1350 y 1780 m/s. Se visualizan tonalidades de color amarillo y rojo, donde el rojo representa la parte matricial calcárea con velocidad cercana a los 1780 m/s y la amarilla la microfractura y demás discontinuidades con velocidad alrededor de los 1650 m/s.

Físicamente la muestra está atravesada por un plano vertical de microfractura (ver figura 106a), desde la vista superior comprende los puntos 3 - 2 y se extiende hasta los puntos 1 - 8 (ver figura 106b), esta tendencia es visible en los tomogramas acústicos 106a, 106b, 106c y 106d con intensidad constante a diferencia de las tomografías acústicas 2.5 D de la muestra A01; sin embargo, se presentan una serie de anomalías de tonalidades amarillas que si varían la intensidad de color y presencia, menor en el tomograma de nivel 1 (ver figura

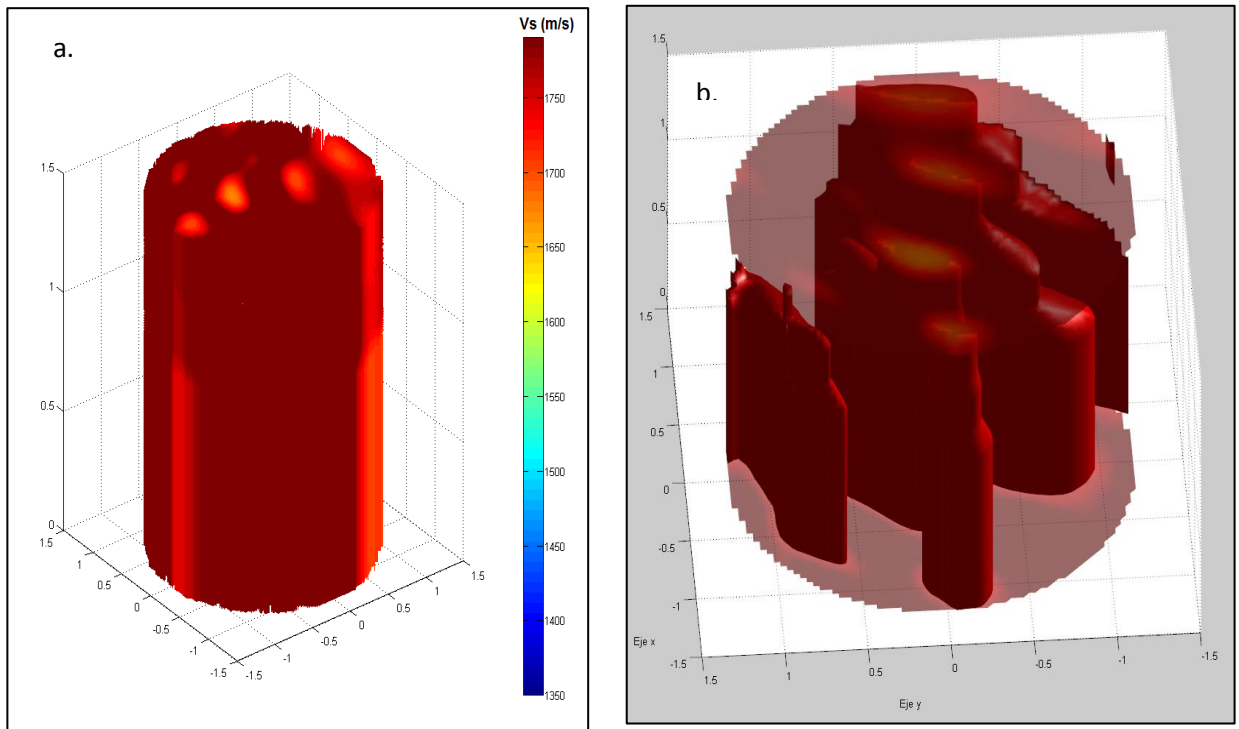
106a) y mayor en el de nivel 4 (ver figura 106b), esto se asocia a la presencia de posible material orgánico en su interior y que se refleja a medida que se realiza el barrido vertical, es importante recalcar que la muestra es de la formación La Luna obtenida de una veta bituminosa.

**Figura 104. Tomografía Acústica 2.5 D C01 a. Nivel 1 b. Nivel 2 c. Nivel 3 d. Nivel 4**



**5.8.2 Visualización Tomografía Acústica 3.5 D.** La obtención del Tomograma Acústico 3.5 D de la muestra C01 se obtuvo de manera análoga a la muestra A01 practicándose la aplicación de la rutina *VirtualRock3*. La figura 107a muestra la visualización tomográfica externa, coincidiendo con la realidad física de la muestra, la figura 107b muestra la visualización tomográfica interna la cual muestra una alta presencia de anomalías, estas son asociamos a la microfractura principal de la muestra (región superior) y demás material orgánico que puede presentar esta roca de extraída de una veta bituminosa de la formación la Luna.

**Figura 105. Tomografía Acústica 3.5 D C01 a. Visualización Externa b. Visualización Interna**



**5.8.3 Estimación De La Densidad De Microfractura Arenisca A01: Rutina Densmicro.** La visualización interna de las muestras permiten de manera a priori intuir de manera cualitativa la densidad de microfracturas, si es alta o baja, en el caso de la muestra C01 en la figura 107b se puede intuir que es alta, comprobándose esto en la aplicación de la rutina *DensMicro* (ver figura 108) con un porcentaje de 28.0851 %. Este parámetro además del alto contenido orgánico presentado en esta muestra, refleja también la apertura de la microfractura que es mayor a la muestra A01.

Figura 106. Aplicación rutina *DensMicro* – C01

```
function h=DensMicro(Data,vel)
%Funcion para determinar la densidad
% en porcentaje de los datos menores a cierta velocidad

%data = matriz (n x n)
%vel = velocidad maxima de calculo

if nargin ~= 2
    error('Ingrese Dos argumentos "DensMicro(data,vel)" ',
end

[i j k] = size(Data);
[m n] = find(Data <= vel);
long=length(m);
Dens=100*length(m)/(i*j*k);

%h=['Densidad =',num2str(Dens),' ' '%'];
h=Dens;

>> DensMicro(data,1740)

ans =

    28.0851
```

## 6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

*“El experimentador que no sabe lo que está buscando,  
no comprenderá lo que encuentra”*

*Claude Bernard*

La investigación además de buscar un mayor entendimiento de la ciencia, también debe generar el ordenamiento de la aplicación encontrada. En esta investigación se entrega como producto final el siguiente objetivo general: *“Desarrollar una metodología para estimar la densidad de microfracturas en rocas, empleando la integración del tiempo, velocidad y frecuencia como parámetros de ondas de corte y de compresión, con el fin de disminuir la incertidumbre en la caracterización de rocas naturalmente fracturadas”*; por lo tanto, siendo la metodología un procedimiento ordenado regido por la investigación científica, en este caso, la parte operacional de este trabajo es descrita en una serie de pasos los cuales el autor definió para uso práctico en el Laboratorio Mecánica de Rocas ICP-ECOPTROL, el fin es utilizar esta metodología como producto de innovación y tecnología en sus actividades cotidianas propias de laboratorio.

### 6.1 PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR LA DENSIDAD DE MICROFRACTURA EN LAS ROCAS

1. Extraer las muestras en el afloramiento: Ver capítulo 3, ítem 3.2 al 3.5

**Figura 107. Extracción de muestras. Fm. La Luna**



2. Aplicar los siguientes instructivos en el área de corte, dependiendo el tipo de muestra:

2.1 Instructivo Extracción de Plugs. 2011.

2.2 Instructivo Perfilaje Lateral.

2.3 Instructivo para la Preparación de Muestras Consolidadas (Pulido de Perfilaje y Cilindricidad). UST-LRM-E-008. 2011

**Tabla 17. Instructivo según tipo de muestra**

<b><i>Tipo de Muestra</i></b>	<b><i>Aplicar Instructivo</i></b>
Bloques Rocosos	2.1; 2.2; 2.3
Corazones Rocosos	2.2; 2.3
Plugs Sintéticos	2.3

Ver capítulo 3, ítem 3.7: *Preparación de muestras*

3. Organizar las muestras:

3.1 Por Litología: Arenisca, Calizas, Shales, etc. Ver Cap.3, ítem 3.8: *Muestras Terminadas.*

3.2 Por Inclusiones: Cantidad de inclusiones. Ver Cap. 3, ítem 3.6: *Plugs Sintéticos*.

**Tabla 18. Marcación de Niveles en muestra**

<b><i>Muestra</i></b>	<b><i>Aplicar Organización</i></b>
Rocas	3.1
Plugs sintéticos	3.2

4. Marcar los niveles (líneas horizontales) en la muestra para hacer el barrido vertical acústico y las líneas de referencia (líneas verticales) separadas cada 45°. Existen dos tipos de líneas de referencia, las rojas y las amarillas. Entre líneas de mismo tipo las líneas estarán separadas cada 45°, de distinto tipo cada 22.5°.

**Figura 108. Marcación de Niveles en muestra**



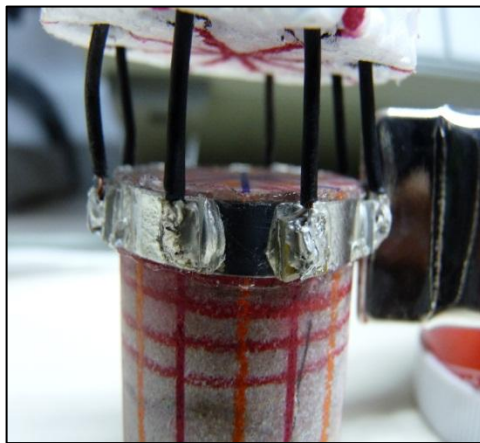
5. Adicionar grasa de vacío en la parte interna en la Abrazadera de acero de 0.2 mm de espesor.

**Figura 109. Adhesión de grasa de vacío parte interna de la abrazadera**



6. Posicionar la Abrazadera en el primer nivel, verificar que esté totalmente nivelada y que los cristales se ubiquen en líneas de referencia de un mismo tipo.

**Figura 110. Posicionamiento de PZT en la muestra. Señales Sencillas**



7. Ajustar la Abrazadera con la Pinza de Muselina (abrazadera de resorte).

**Figura 111.. Ajustamiento de la Abrazadera**



**8. Encender el Computador y Osciloscopio.**

**Figura 112. Instrucción encendido osciloscopio**



**9. Crear una carpeta para guardar los archivos de las señales, estas deben ser creadas en el siguiente orden:**

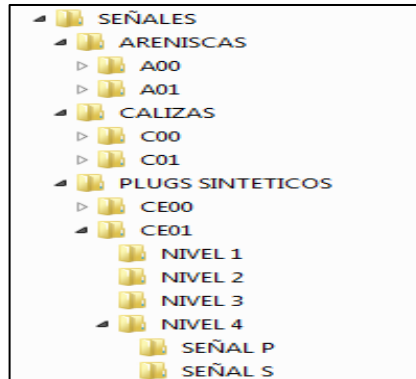
**9.1 Tipo de Litología:** Arenisca, Caliza, Cemento.

**9.2 Rotulado de la Muestra:** A0n, C02, CE03 ...

**9.3 Nivel Barrido en la muestra:** Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3 ...

**9.4 Tipo de Señal Adquirida:** Señal P, Señal S.

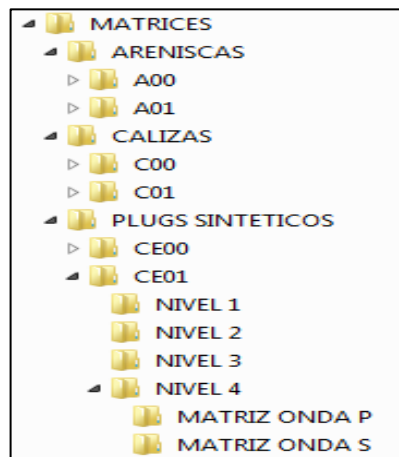
**Figura 113.Ruta de Carpetas SEÑALES**



**10.** Crear una carpeta para guardar los archivos de las matrices de velocidades, estas deben ser creadas en el siguiente orden:

- 10.1** Tipo de Litología: Arenisca, Caliza, Cemento.
- 10.2** Rotulado de la Muestra: A01, C02, CE03 ...
- 10.3** Nivel Barrido en la muestra: Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3 ...
- 10.4** Tipo de Matriz generado: Señal P, Señal S.

**Figura 114.Ruta de Carpetas MATRICES**



**11.** Conectar el primer conector 2x1 [Caimán-BNC] del Osciloscopio (BNC) hacia la muestra (caimanés), el caimán positivo estará dirigido hacia el primer cable del

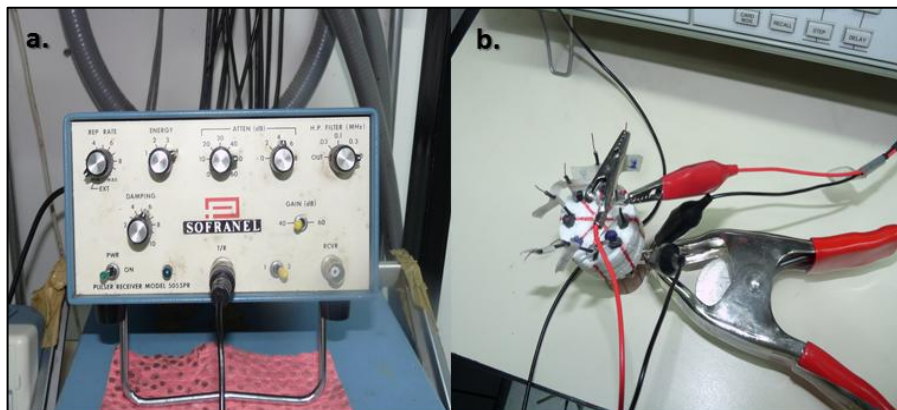
PZT 1 y el negativo hace tierra en alguna parte de metal de la Pinza de Muselina para que haga tierra.

**Figura 115. a. Cables (2x1). b. Conexión al Osciloscopio (Channel 3). c. Conexión a la muestra.**



12. Conectar el segundo conector 2x1 [Caimán-BNC] del pulsador [BNC] hacia la muestra (Caimanes), el caimán positivo estará dirigido hacia el segundo cable del PZT 2 y el negativo en alguna parte de metal de la Pinza de Muselina para que haga tierra. En ningún momento puede haber contacto entre cables del mismo signo. Los negativos siempre estarán fijos.

**Figura 116. a. Conexión al pulsador. b. Conexión a la muestra.**



13. Verificar que no exista corto circuito con el multímetro.

**Figura 117. Verificación de corto circuito**



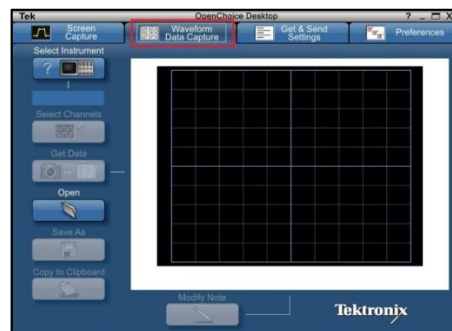
14. Diríjase al computador y abra el programa *Tektronix*.

**Figura 118. Apertura software Tektronix**



15. Haga Click en *Waveform Data Capture*.

**Figura 119. Opción Captura de Señal**



16. Encender pulsador.

**Figura 120. Encendido de Pulsador**



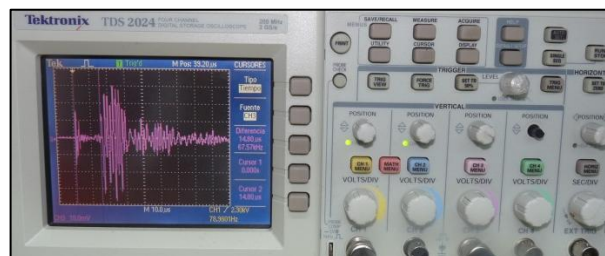
17. Verificar en el osciloscopio que sea una señal óptima en la que se pueda cuantificar el tiempo de llegada de la primera señal con las siguientes características:

17.1 Estable.

17.2 Sin Ruido.

17.3 Con buena amplitud.

**Figura 121. Características óptimas de Señal**



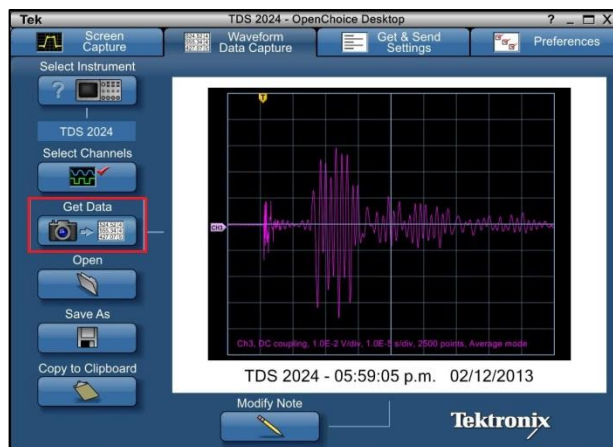
Si no se cumple algunas características del paso 16, evalúela y ejecute la corrección principal:

**Tabla 19. Correcciones ante problemas de señales**

<b>Característica Afectada</b>	<b>Corrección Principal</b>
17.1	Ajustar debidamente la Pinza de Muselina
17.2	Adicionar uniformemente la grasa de vacío en la cara interna de la Abrazadera.
17.3 Muy Alta o Muy Baja [17.1 y 17.2 OK]	Manipular amplitud en el osciloscopio ( <i>VOLTS/DIV</i> ) hasta ajustar una adecuada amplitud.
17.3; 17.1	Manipular <i>DAMPING</i> y <i>ENERGY</i> en el pulsador, por lo general se configura Alto <i>DAMPING</i> con Baja <i>ENERGY</i> para disminuir el ruido en la señal.
17.1; 17.2; 17.3	Verificar estado de adhesión de los PZT a la abrazadera, de los cables a los PZT y de los conectores en general.

18. Haga Click en *Get Screen* para capturar la señal momentáneamente en el software.

**Figura 122. Nomenclatura señales sencillas**



19. Haga Click en Save As para guardar señal capturada

20. Utilice la ruta tal cual como lo indica el punto 9.

21. Guardar la Señal con su nombre en la carpeta creada para el respectivo nivel, con la extensión *.txt* de la siguiente manera:

**Tabla 20. Nomenclatura señales sencillas**

<i>Dirección de la Señal</i>	<i>Nombre de la Señal</i>
PZT 1 a PZT 2	<i>1-2.txt</i>
PZT 1 a PZT 8	<i>1-8.txt</i>
PZT <i>n</i> a PZT <i>m</i>	<i>n-m.txt</i>
PZT 7 a PZT 8	<i>7-8.txt</i>

22. Orientar cada señal manualmente hasta completar las señales desde PZT 1 – PZT 2 hasta PZT 7 – PZT 8, repitiendo los pasos desde el 16 hasta el 21. Estas señales se llamarán *señales sencillas*.

23. Girar la abrazadera 22.5° en el mismo nivel de la muestra para cambiar el tipo de línea de referencia y ejecutar el paso 22. Estas señales se llamarán *señales primas*, esto es con el fin de aumentar la densidad de trayectorias de las señales y aumentar la certidumbre en la interpolación de las mismas. Junto con las *señales sencillas*, formaran un solo paquete de información para generar el respectivo tomograma. Análogamente al paso 21, estas señales se guardarán en la misma carpeta del respectivo nivel de la siguiente manera:

**Tabla 21. Nomenclatura señales primas**

<i>Dirección de la Señal</i>	<i>Nombre de la Señal</i>
PZT 1 a PZT 2	<i>11-22.txt</i>
PZT 1 a PZT 8	<i>11-88.txt</i>
PZT <i>n</i> a PZT <i>m</i>	<i>nn-mm.txt</i>
PZT 7 a PZT 8	<i>77-88.txt</i>

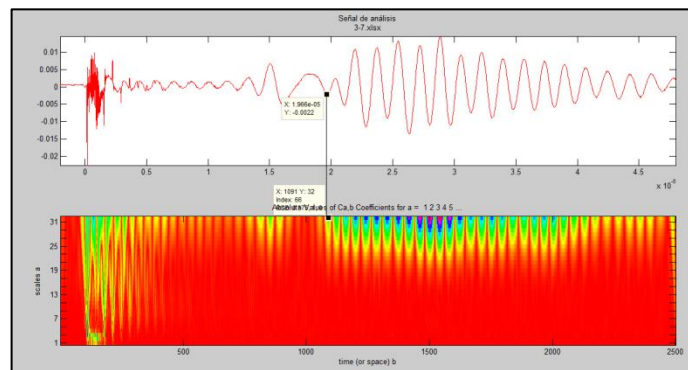
**Figura 123. Posicionamiento de PZT en la muestra. Señales Primas**



- 24.** Convertir los 56 archivos guardados de extensión *.txt* (Blog de Notas) a *.xlsx* (Excel), dejándolos en la misma carpeta. Se recomienda ordenar los archivos de la carpeta por *Tipo*.
- 25.** Bajar verticalmente la abrazadera por todos los niveles demarcados en la muestra siguiendo los pasos 22 hasta el 24. Tener en cuenta el orden de información propuesto en el punto 9.3. A partir de este paso se puede trabajar en otro ordenador, no hay necesidad de tener el software de *Tektronix*.

26. Abrir la rutina de Matlab *WaveGetTime.m*<sup>34</sup>. Teniendo en cuenta el orden con que fueron guardados todos los paquetes de información acústica, basándose en el punto 9 se analizarán las señales. En esta rutina se muestra gráficamente (tiempo [s] vs amplitud [volt]) cada una de las señales guardadas en .xlsx, se procede a “picar” o cuantificar el tiempo del arribo de la primera señal.

Figura 124. Picado de la Señal. Señal S



27. Abrir la Macro de Excel, *Trayectorias de los Cristales.xlsx*, ubicar la columna “Tiempo de viaje total (tvt) [s]” y asignar el tiempo estimado en el paso anterior de manera manual a la respectiva celda de la trayectoria.

Figura 125. Trayectorias de los Cristales.xlsx

CALCULO DE LA VELOCIDAD ONDA P: MUESTRA XXX									
INFORMACIÓN MUESTRA C00				Trayectoria	Transmisor	Receptor	Distancia (d) [in]	Distancia (d) [m]	Tiempo de viaje total (tvt) [s]
LITOLOGÍA				1	1	2	0.478	0.012	
FORMACIÓN				2	1	3	0.884	0.022	
CARGA	N.A.			3	1	4	1.155	0.029	
CONFINAMIENTO	N.A.			4	1	5	1.250	0.032	
TEMPERATURA	AMBIENTE			5	1	6	1.155	0.029	
				6	1	7	0.884	0.022	
				7	1	8	0.478	0.012	
				8	2	1	0.478	0.012	

<sup>34</sup> Producto de Innovación y Tecnología de LMERO-ICP-ECOPETROL. Desarrollado por Ing. Luis Fernando Ramírez Silva & Jenny M. Carvajal Jiménez. 2011

- 28.** Exportar la información de la Macro: Trayectorias, Distancias, Tiempo de viaje, Velocidad y Lentitud de la señal a la Rutina de Matlab *Tomografía090911.m*<sup>35</sup>. Se obtiene las matrices acústicas en función de la interpolación de las velocidades de las trayectorias.
- 29.** Guardar la matriz siguiendo la ruta del punto 10, en la cual estará la información de los tomogramas acústicos, estos archivos quedarán con extensión *.mat*
- 30.** Generar el tomograma acústico mediante la renderización de cada una de las velocidades (pixel) de la matriz generada, mediante el comando *Surf* en la ventana de principal de Matlab de la siguiente manera: `>> Surf(Nombre de la matriz)`.
- 31.** Discretizar los rangos de velocidades del tomograma de la muestra, especificando los rangos de velocidad matricial y velocidad microfracturada/inclusión (roca/cemento).
- 32.** Repetir los pasos desde el 26 hasta el 31 para generar todas las matrices de velocidades correspondientes de los niveles de la muestra, ubique la información de la muestra desde el punto 9.2.
- 33.** Abrir la rutina en Matlab, *VirtualRock3.m*<sup>36</sup>, importar el conjunto de matrices ubicando la información a partir del punto 10.2. Ubicarlas en la rutina verticalmente tal cual en su orden de adquisición. Esto generará el Tomograma 3.5 D de la muestra analizada.

---

<sup>35</sup> Producto de Innovación y Tecnología de LMERO-ICP-ECOPETROL. Desarrollado por Ing. Luis Fernando Ramírez Silva, Andrei Lache y Jenny M. Carvajal Jiménez. 2011

<sup>36</sup> Rutina generada en la Investigación. Luis Arturo Gómez Luna. 2013

- 34.** Abrir la rutina en Matlab, DensiMicro<sup>37</sup>, esta rutina pide los nombres de las matrices separadas por comas “,” y el de sus respectivas velocidades máximas de microfractura/discontinuidad dependiendo si es roca o cemento. Esta es la información de la muestra que se está analizando. Esto generará una estimación porcentual del volumen de microfractura de la muestra.
- 35.** Aplicar la metodología con el resto de muestras para obtener los Tomogramas Acústicos 3.5 D, para generar la visualización de la matriz y microfracturas en función de velocidades de ondas acústicas, y la estimación de la densidad de microfractura en las rocas, la cual oscila entre 6% y 8% de margen de error. Para cada una de la muestras repita los pasos desde el punto 32 hasta el 34. Tenga el orden de información descrito en el punto 10.

---

<sup>37</sup> Rutina generada en la Investigación. Luis Arturo Gómez Luna. 2013

## 7. VALIDACIÓN

*“En la investigación es incluso más importante  
el proceso que el logro mismo”*

*Emilio Muñoz*

Toda metodología creada a partir de la investigación científica debe terminar con la validación de la misma, esta permite verificar que tan desviado se encuentra la metodología respecto a la realidad o qué porcentaje de error presenta. En esta investigación se decidió crear plugs sintéticos de cementos cuya matriz es cemento blanco y las inclusiones fueron generadas por medio de inclusiones de caucho de geometría cilíndrica, una vez endurecido el cemento se extrajeron los cauchos para poder dejar inclusiones huecas (airosas), al igual que las demás muestras se aplicó la metodología descrita en el capítulo 6 en una sola sección transversal por muestra de cemento analizada. La finalidad es comparar las distancias de los diámetros generados en los tomogramas acústicos respecto a los diámetros reales de las muestras, de igual manera, comparar la densidad de microfractura, en este caso, densidad de la inclusión obtenida en la rutina *DensMicro* respecto a la densidad de inclusión real, ya que las geometrías tanto de la muestra como de la inclusión están definidas.

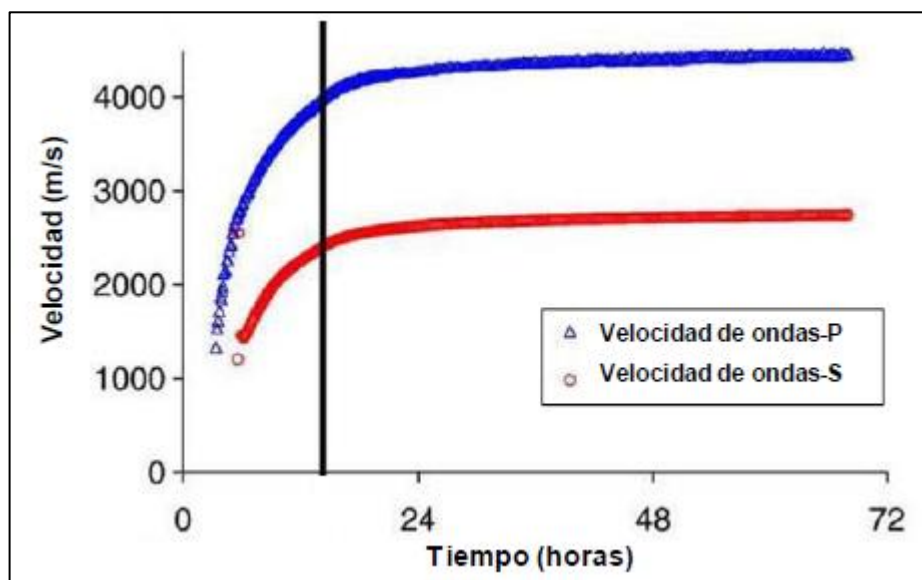
Las comparaciones mencionadas anteriormente se cuantificarán por medio de porcentajes de error, siendo el valor experimental todo aquel que se obtenga de la metodología; finalmente de esta manera termina de forma parcial esta investigación, ya que como creación de una particular técnica de Tomografía Acústica para el Laboratorio Mecánica de Rocas del ICP-ECOPTEROL, este trabajo ha sido un primer escalón en indagar que tan lejos se puede llegar con la instrumentación actual del Laboratorio.

## 7.1 CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL CEMENTO

El cemento es un material tipo conglomerático capaz de unir otros materiales firmemente por medio de la cohesión, se crea a partir de una mezcla de calizas-arcillas calcinadas y posteriormente molidas. Para su preparación y llegar al endurecimiento se tiene mezclar con agua dependiendo de la relación agua-cemento ( $w/c$ ) que se quiera utilizar, en esta investigación se utilizó de 0.45 ya que en la literatura hay publicaciones como la Rebolledo, 2010, en la cual se practicaron pruebas ultrasónicas en cementos con esta relación.

En la figura 128 se muestra el comportamiento de ondas P y ondas S en el cemento, al igual que la figura 40 del capítulo 3, se la tendencia es asintótica en cuanto a la velocidad a medida que aumenta el tiempo, es decir, el proceso del endurecimiento del cemento ultrasónicamente finaliza con el periodo de estabilización de la velocidades de onda P y de onda S, en este caso la velocidad onda P se estabiliza en 4250 m/s y la velocidad de onda S en 2800 m/s.

**Figura 126. Caracterización acústica del cemento.  $w/c=0.45$**



Fuente: REBOLLEDO, N. Aplicación de técnicas no destructivas al estudio de hormigón fresco. Universidad Politécnica de Madrid. 2010

## 7.2 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: CEMENTO – CE04

La muestra de cemento CE04 (ver figura 129) presenta la mayor inclusión hueca de 10 mm de diámetro con una profundidad de 19.85 mm, además los diámetros de todos los cementos son de 1.25 in, con estas dimensiones se puede calcular un parámetro teórico de densidad de microfractura.

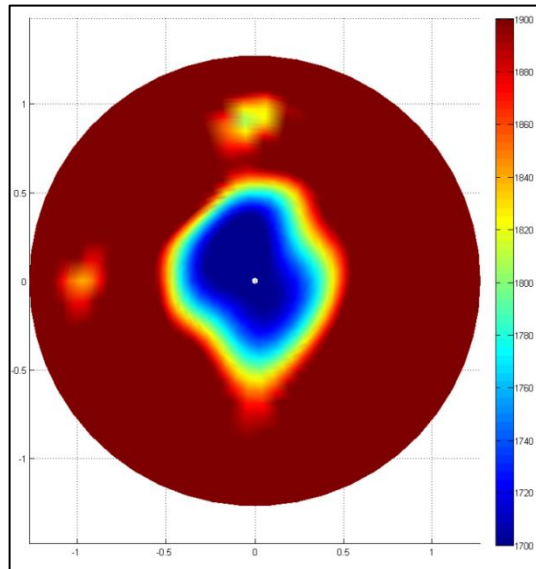
**Figura 127. Cemento CE04**



**7.2.1 Visualización Tomografía Acústica 2.5 D.** Generado el tomograma de solo una sección transversal de la muestra CE04 (ver figura 130), la rutina entregó un gradiente que oscila entre 1890 a 1690 m/s, cuyos colores marcan tonalidades de rojo a azul principalmente, la velocidad de onda S matricial del cemento esta alrededor de los de los 1750 y 1890 m/s y la de las discontinuidad de 1690 y 1700 m/s. En el centro se puede observar la presencia de una discontinuidad cuya geometría tiende a ser circular en representación de realidad física; sin embargo, debido al ajustamiento por parte de la pinza de muselina se está ejerciendo más fuerza en la parte horizontal que vertical, es por eso que parece ser como un elipse, además, las discontinuidades en formas de manchas amarillas alrededor

de la discontinuidad central son generadas debido a la presencia vugs (burbujas de aire) que no pudieron salir en el periodo del fraguado.

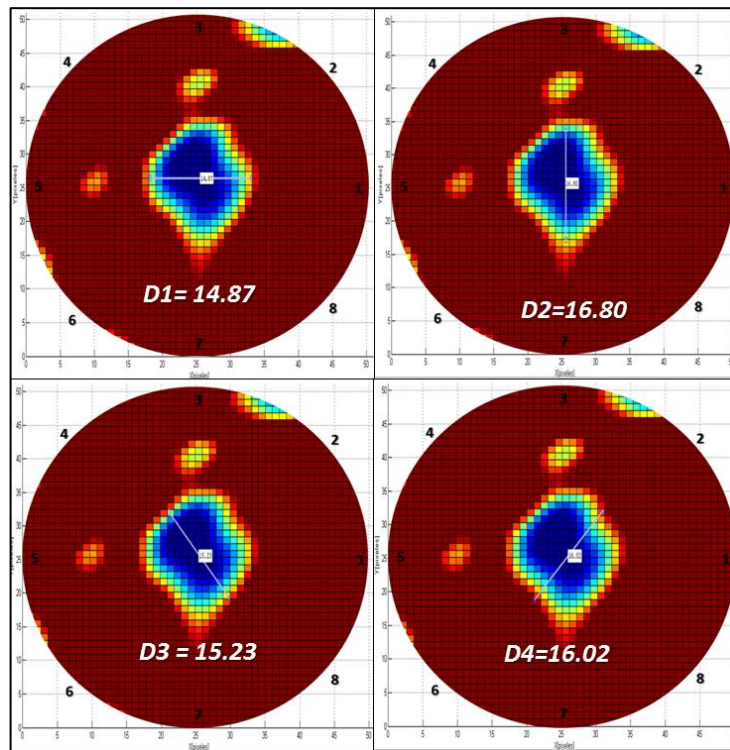
**Figura 128. Tomografía Acústica - Cemento CE04**



**7.2.2 Medición De Distancias Y Porcentaje De Error.** Utilizando el comando *imdístline* se puede medir las distancias entre puntos de una imagen, aplicándolo en este caso, en los tomogramas acústicos. Teniendo en cuenta que el dominio que genera los tomogramas es de 51X51 pixeles, es decir que el diámetro en pixeles de la muestra es de 51 y este a su vez equivalente a 1.25 in (31.75 mm), todas las distancias fueron obtenidas en pixeles para luego ser convertidas en milímetros (51 pixeles= 31.75 mm).

Se tomaron 4 medidas a la discontinuidad central de forma horizontal D1 de 14.87 pixeles (ver figura 131a), vertical D2 de 16.80 pixeles (ver figura 131b) y dos diagonales de 15.23 y 16.02 pixeles respectivamente (ver figura 131c y 131d).

**Figura 129. Medición de Distancias CE04. a. Dist.Horizontal b. Dist. Vertical c. Dist. Diag. 1 d. Dist. Diag. 2**



Para cuantificar el porcentaje de error se tomó como valor teórico el diámetro real de la inclusión, 10 mm, y como valores experimentales las distancias obtenidas en el tomograma convertidas en mm tal cual como lo indica la tabla 20.

**Tabla 22. Calculo de porcentaje de error distancias CE04**

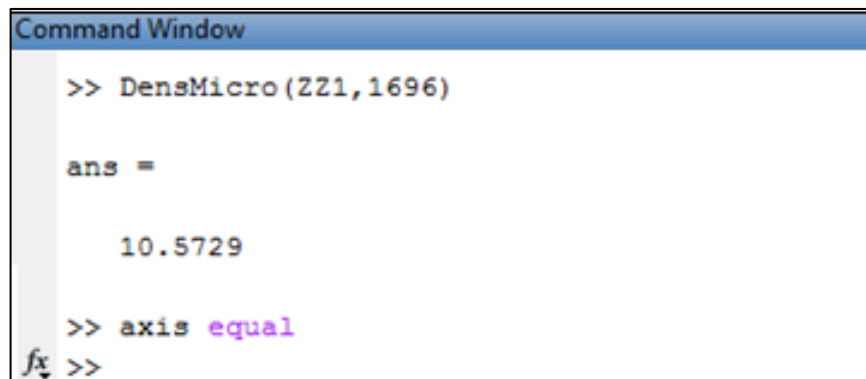
DISTANCIA	PIXELES	FAC. CONVERSIÓN [31.57/51]	MEDIDA REAL (mm)	DIAMETRO INCLUSIÓN (mm)	ERROR [%]	ERROR PROMEDIO [%]
D1	14.87	0.62	9.26	10	7.43	4.37
D2	16.8		10.46		4.59	
D3	15.23		9.48		5.19	
D4	16.02		9.97		0.27	

Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

Como se puede ver en la tabla 20 se obtuvieron los porcentajes de error de cada una de las distancias y se halló un promedio aritmético entre las 4 dando como resultado 4.37%, siendo este un porcentaje muy bajo, se ha considerado por parte del autor que representa tomográficamente con certeza la realidad física de la muestra CE04, de esta forma se logra validar la instrumentación general de adquisición de señales acústica utilizada.

**7.2.3 Aplicación De La Rutina Densmicro.** La rutina *DensMicro* explicada en el ítem 4.2 del capítulo 4 ha sido aplicada a la matriz de velocidades acústicas de la muestra CE04 (ver figura 132), los datos pedidos por esta rutina son el nombre de la hypermatriz cuando es 3.5 D o de la matriz cuando es 2.5 D y de la velocidad máxima que caracteriza las microfracturas, en este caso el nombre de la matriz es *ZZ1* y la velocidad máxima de microfractura es 1696 m/s, como resultado la densidad de microfractura en este caso es de 10.5729 %.

**Figura 130. Rutina DensMicro aplicada a la matriz CE04**



```
Command Window
>> DensMicro(ZZ1,1696)

ans =

    10.5729

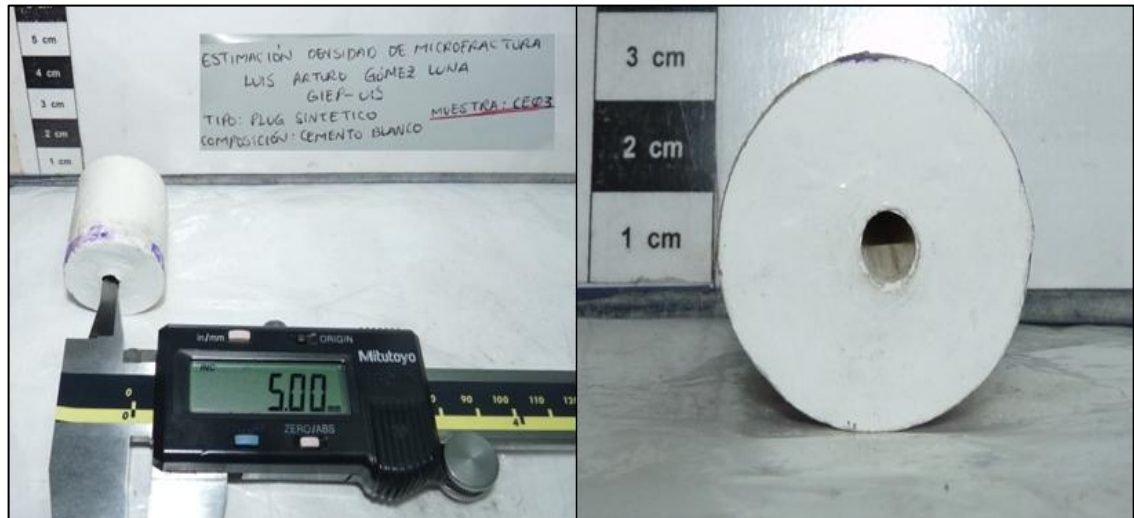
>> axis equal
fx >>
```

### 7.3 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: CEMENTO – CE03

La muestra de cemento CE03 (ver figura 133) presenta una inclusión hueca de 5 mm de diámetro con una profundidad de 22.2 mm, en el periodo del endurecimiento del cemento la inclusión sufrió una desviación, no quedando

totalmente vertical, con estas dimensiones se puede calcular un parámetro teórico de densidad de microfractura para esta muestra.

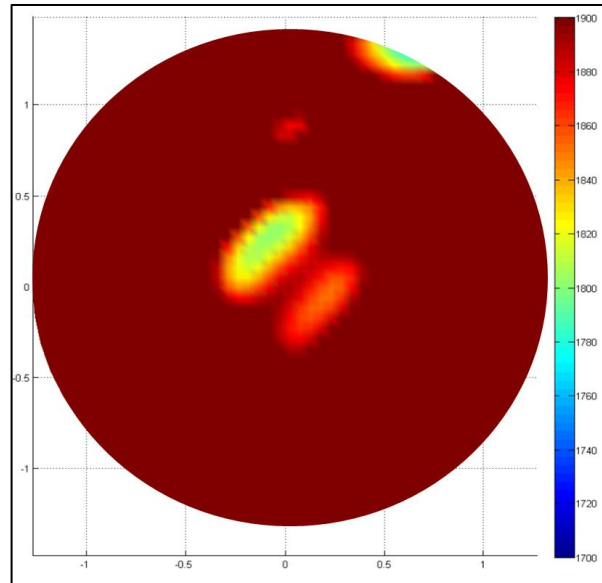
**Figura 131. Cemento CE03**



**7.3.1 Visualización Tomografía Acústica 2.5 D.** Obtenido el tomograma de la sección transversal de la muestra CE03 (ver figura 134), la rutina entregó un gradiente que oscila entre 1700 a 1900 m/s, cuyos colores marcan tonalidades de rojo a amarillo principalmente, la velocidad de onda S matricial del cemento esta alrededor de los de los 1820 y 1900 m/s y la de las discontinuidad de 1700 y 1811 m/s. En el centro se puede observar la presencia de una discontinuidad que es de geometría elipsoidal representando tomográficamente la realidad física de la inclusión circular de 5 mm de diámetro.

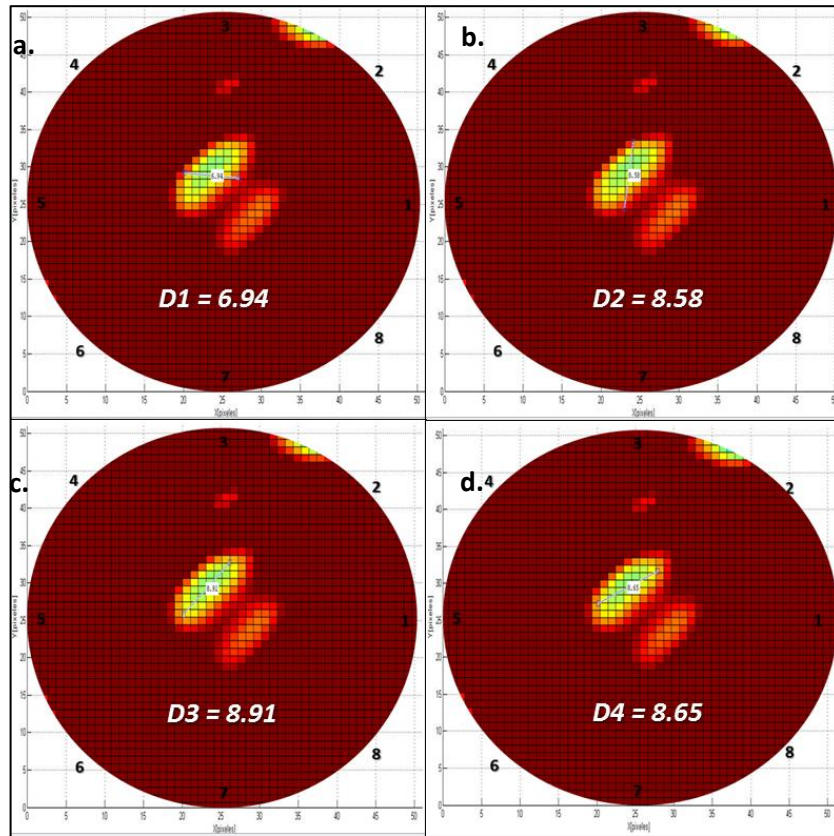
Los efectos del ajustamiento de la pinza de muselina al igual que el tomograma CE04 se ven reflejados con igual intensidad afectando considerablemente la visualización, también como la inclusión no quedo totalmente vertical y centrada en la muestra, es posible que esté afectando la visualización; sin embargo, la discontinuidad de mayor intensidad de color amarillo es a la que se estudiará sus dimensiones y cálculo de la densidad de microfractura.

**Figura 132. Tomografía Acústica – Cemento CE03**



**7.3.2 Medición De Distancias Y Porcentaje De Error.** Al igual que la muestra CE04, se tomaron 4 medidas a la discontinuidad central de forma horizontal D1 de 6.94 pixeles (ver figura 135a), vertical D2 de 8.58 pixeles (ver figura 135b) y dos diagonales de 8.91 y 8.65 pixeles respectivamente (ver figura 135c y 135d).

**Figura 133. Medición de Distancias CE04. a. Dist.Horizontal b. Dist. Vertical c. Dist. Diag. 1 d. Dist. Diag. 2**



Cuantificando el porcentaje de error se tomó como valor teórico el diámetro real de la inclusión, 5 mm, y como valores experimentales las distancias obtenidas en el tomograma convertidas en mm tal cual como lo indica la tabla 21.

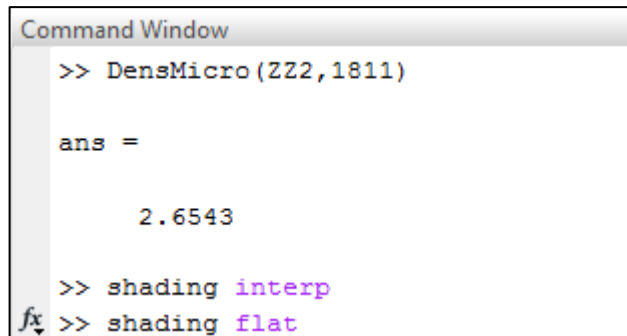
**Tabla 23. Calculo de porcentaje de error distancias CE03**

DISTANCIA	PIXELES	FAC. CONVERSIÓN [31.57/51]	MEDIDA REAL (mm)	DIAMETRO INCLUSIÓN (mm)	ERROR [%]	ERROR PROMEDIO [%]
D1	8.91	0.62	5.55	5	10.94	9.76
D2	6.94		4.32		13.59	
D3	8.58		5.34		6.83	
D4	8.65		5.39		7.70	

Como se puede ver en la tabla 21 el porcentaje error promedio de las distancias fue de 9.76%, siendo este porcentaje mayor que el anterior es aceptable debido a que a medida que las microfracturas ó discontinuidades son más pequeñas se necesita mayor capacidad de resolución de la tomografía, está se puede optimizar utilizando PZT de altas frecuencias y la mayor densidad de rayos de trayectorias (mayores cristales PZT en la abrazadera)<sup>38</sup> , se ha considerado por parte del autor que representa tomograficamente con certeza la realidad física de la muestra CE04, de esta forma se logra validar la instrumentación general de adquisición de señales acústica utilizada.

**7.3.3 Aplicación De La Rutina Densmicro.** Aplicando la rutina *DensMicro* (ver figura 136) los datos pedidos por esta rutina son el nombre de la matriz 2.5 D y de la velocidad máxima que caracteriza las microfracturas, en este caso el nombre de la matriz es ZZ2 y la velocidad máxima de microfractura es 1811 m/s, como resultado la densidad de microfractura en este caso es de 2.6543 %.

**Figura 134. Rutina DensMicro aplicada a la matriz CE04**



```
Command Window
>> DensMicro (ZZ2,1811)

ans =

    2.6543

>> shading interp
fx >> shading flat
```

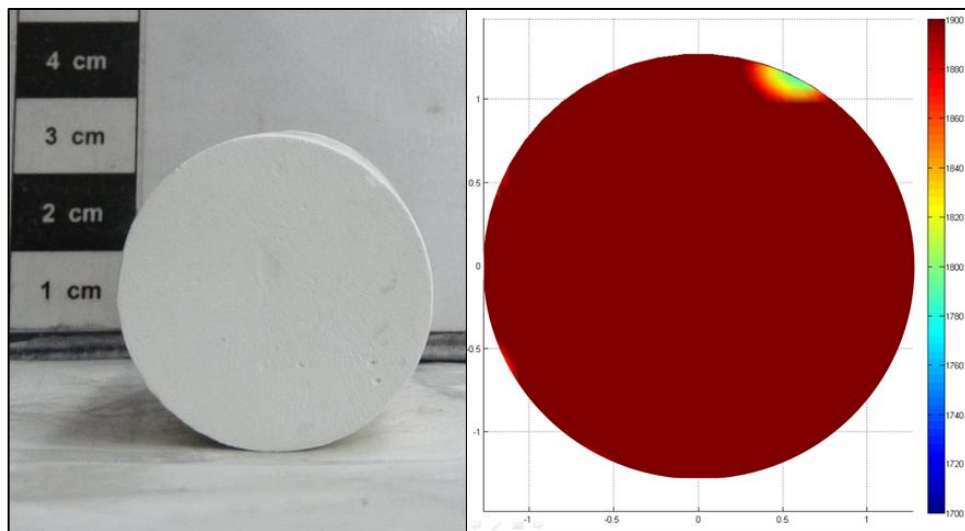
<sup>38</sup> Sherman, C.S. Characterizing internal macropores using cross-specimen acoustic tomography: verification of two dimensional results. Montana Tech of the University of Montana. 2009.

## 7.4 TOMOGRAFÍA ACÚSTICA: CEMENTO – CE00

Finalmente se tomó la acústica en el cemento CE00, este se caracteriza por ser la muestra patrón que no presenta ningún tipo de inclusiones, es netamente cemento en la totalidad de su volumen, la figura 137 muestra la realidad física de la muestra y su comparativo en la tomografía acústica 2.5 D obtenida a partir de una sección transversal del mismo.

Acústicamente presenta una velocidad de onda S de alrededor de los 1900 m/s, el color que presenta es rojo en toda la imagen, esto significa la homogeneidad de la muestra en su interior; la anomalía presentada en una región de su límite se debe a defectos de borde de la adquisición acústica que normalmente se presentan en este tipo de pruebas. Para esta prueba no aplica la medición de distancias y la densidad de microfractura es 0 %.

**Figura 135. Cemento CE04**



## 7.5 PORCENTAJE DE ERROR: APLICACIÓN RUTINA *DENSMICRO* EN CEMENTOS

La cuantificación del porcentaje de error de esta rutina está basada en el cálculo teórico de la densidad de microfractura de las muestras. Para poder aplicar la ecuación 4 (capítulo 4), se ha tomado como volumen de microfractura la sección estudiada por la abrazadera de adquisición acústica en la muestra, la altura corresponde al ancho de la abrazadera y el radio a la mitad del diámetro de la inclusión; para el volumen de la muestra (volumen cemento bruto), la altura corresponde también al ancho de la abrazadera y el radio a la mitad del diámetro de la muestra CE04.

Una vez calculado el volumen de cemento bruto y los volúmenes de las inclusiones, se obtuvo un parámetro de densidad de microfractura (inclusión) por medio de la ecuación 4, estos valores son valores teóricos y/o reales de la muestra. Respecto al cálculo de densidad de microfractura por medio de la rutina *DensMicro* el parámetro se obtiene a partir del resultado entregado por la rutina, este valor se toma como valor experimental.

Como se puede ver en la tabla 22, el porcentaje de error para la muestra CE04 obtenido es de 6.92 % y el de la muestra 7.19 %, estos resultados se interpretan muy aceptables debido a la visualización clara de la discontinuidad; sin embargo, se confirma que la capacidad de resolución es muy importante ya que a medida que se disminuye la discontinuidad se dificulta la detección de la anomalía, es por eso que el porcentaje de error aumenta cuando el tamaño de la anomalía disminuye.

**Tabla 24. Cálculo porcentaje de error rutina *DensMicro***

<b>VALIDACIÓN DE LA DENSIDAD DE INCLUSIONES DE LOS CEMENTOS</b>						
<b>Datos Cementos, Abrazadera e Inclusiones [cm]</b>		<b>DENSIDAD DE MICROFRACTURA (INCLUSIÓN) TEÓRICA - ECUACIÓN 4</b>				
		<b>Vol. Cemento Bruto [cc3]</b>	<b>Vol. Inclusiones [cc3]</b>		<b>Densidad de inclusiones real [%]</b>	
Diametro Cemento	3.175	4.7655	CE00	0	CE00	0.00
Ancho Abrazadera	0.6		CE03	0.11781	CE03	2.47
Diametro Inclusión CE00	0		CE04	0.47124	CE04	9.89
Diametro Inclusión CE03	0.5					
Diametro Inclusión CE04	1					
		<b>DENSIDAD DE MICROFRACTURA (INCLUSIÓN) EXPERIMENTAL - RUTINA <i>DENSMICRO</i></b>				
		<b>Densidad Inclusiones Tomografía [%]</b>	<b>Error [%]: Densidad Tomografía respecto</b>		<b>PROMEDIO DE ERROR [%]</b>	
		CE00	0.00	CE00	N.A.	7.06
		CE03	2.65	CE03	7.19	
		CE04	10.57	CE04	6.92	

De esta manera se valida la metodología aplicada en esta investigación para cuantificar el parámetro de densidad de microfracturas en las rocas.

## 8. CONCLUSIONES

1. La certidumbre del tiempo de viaje de las ondas acústicas generadas por los cristales piezoeléctricos depende de la calidad de la señal. Factores como el ajuste de la abrazadera, calidad de las conexiones, sellamientos de los espacios vacíos ayudan a optimizar la adquisición acústica.
2. La detección de las microfracturas está relacionada a la Frecuencia, esta a su vez está en función de la Velocidad y de la Longitud de Onda, siendo la Longitud de Onda la variable que podemos manipular ya que la velocidad es inherente del material rocoso.
3. Es indispensable el análisis minucioso de las señales obtenidas por medio del Tratamiento de Señales, ya que existen factores como el ruido y componentes ajenas que ayudan a disminuir la calidad de las mismas y por ende la veracidad de los datos.
4. La utilización de modelos controlados como plugs sintéticos de cementos con inclusiones “huecas”, a través de la variación del diámetro del mismo, permitió validar la instrumentación general de adquisición acústica utilizada y la metodología aplicada para estimar el parámetro de densidad de microfracturas en las rocas. De igual manera, estos modelos permiten sensibilizar la capacidad de resolución que puede generar los cristales PZT utilizados.
5. La resolución del tomograma depende principalmente de la longitud de onda y la densidad de trayectorias, estos dos factores permiten la detección de discontinuidades en el material analizado, en este caso, las rocas.

6. No existen formaciones netamente fracturadas, el fracturamiento depende de la magnitud de los esfuerzos locales que superen la resistencia de la roca y de las condiciones geológicas en que se encuentre la formación.

7. La utilización del taladro portátil es una opción de optimización de tiempo y de recursos, ya que extrayendo los núcleos directamente en el afloramiento podemos saber con certeza la intensidad del fracturamiento que se presenta, a diferencia de estar extrayendo grandes bloques para cortarlos posteriormente en un taladro fijo.

8. La longitud de onda no es el único factor que puede ayudar a la detección de microfracturas con ondas acústicas, fenómenos como la reflexión y difracción pueden estar afectando las lecturas de las señales debido a que son medios anisótropos, por ende, los plugs sintéticos de cementos o alguna muestra caracterizada son necesarios para poder validar la inversión de ondas acústicas ya que simulan un material de baja anisotropía.

9. El diseño y la creación del Equipo de Adquisición Acústica es muy importante ya que si se opera con un buen uso permitirá proteger y reutilizar los Cristales Piezoeléctricos que han sido comprados, mitigando recursos económicos. Además el equipo propuesto está diseñado para muestrear rocas de diámetro en un rango de 1 hasta 3 pulgadas, con longitud dos veces el diámetro y por lo tanto no está sujeto a un solo diámetro específico como en el caso de la abrazadera de acero inoxidable utilizada.

10. El material del equipo propuesto debe fabricado en DURALÓN, este es un tipo de material derivado del petróleo tipo «plástico», el cual evitará efectos negativos debido a los fenómenos de ondas (reflexión, refracción) y generación de componentes nocivas en el osciloscopio una vez se adquiera los datos acústicos en lugar del Acero Inoxidable.

11. La importancia de la Densidad de Microfractura en las rocas radica en el mejoramiento de la caracterización de los modelos de YNF, evaluación de riesgo de exploración y optimización del tratamiento para la extracción de hidrocarburos.

## 9. RECOMENDACIONES

1. Crear el Dispositivo de Barrido de Señales descrito en el capítulo 2, este podrá contener la roca y los cristales PZT dándole un mayor aseguramiento al proceso de adquisición acústica. Se debe tener en cuenta la concentricidad de la roca y un efectivo ajuste de los PZT hacia la muestra. De igual manera, acoplar este equipo a pruebas uniaxiales y triaxiales para obtener tomogramas acústicos bajo condiciones de altos esfuerzos.
2. El paso del tornillo que permite el movimiento vertical del soporte de los cristales PZT sea muy fino, permitiendo pasos de 1 mm para realizar barridos verticales mucho más discretos.
3. En relación a la abrazadera de acero inoxidable creada, utilizar láminas de acero más delgadas, menores a 0.2 mm, para poder disminuir los efectos considerables de atenuación de las señales.
4. Organizar el sistema de cableado en una Protoboard, de esta manera la manipulación de los cables que están adheridos a los PZT se minimizaría, evitando así riesgo de despagamiento tanto de los cables a los PZT o de los PZT a la abrazadera.
5. Debido que la adhesión de los cables a los PZT y de los PZT a la abrazadera se realiza por medio de un material que al endurecerse es conductivo, *Epoxico de Plata*, es necesario investigar otro material con iguales o similares características, ya que el material utilizado es económicamente es muy costoso.

6. Utilizar un computador de alta capacidad mínimo con memoria RAM de 16 GB, tarjeta gráfica de 2 GB y de procesador de 4 núcleos, con el fin de utilizar matrices con mayor cantidad de datos y generar Tomogramas Acústicos mucho más definidos.

7. Entre los equipos de instrumentación general para la adquisición acústica es importante tener un Generador de Pulsos con capacidad mayor o igual a 5 MHz, esto permitiría ampliar el grado de estudio de las pruebas ultrasónicas en el Laboratorio Mecánicas de Rocas del ICP. Debido a que a mayor frecuencia menor longitud de onda, se podrá detectar discontinuidades/defectos menores al centímetro en el material del estudio, en este caso, microfracturas en rocas.

8. La utilización de un *Swith de Canales* para direccionar las señales de forma automatizada, permite optimizar el proceso de adquisición de señales acústicas en comparación de la forma manual como se hizo en esta investigación, adquirir un corte o una sección transversal para generar una matriz a partir de 56 señales se demora aproximadamente 40 minutos.

9. Para optimizar tiempo y demás recursos al momento de muestrear en campo, es aconsejable hacerlo con un equipo completo de Taladro Portátil Saca Núcleos, de esta manera se permite extraer inmediatamente las muestras con geometría cilíndrica y verificar si efectivamente contiene microfracturas; contrario a extraer grandes bloques pesados, transportarlos grandes distancias y cortarlos para sacar las respectivas muestras.

10. Es importante preparar bien las muestras, pulirlas bien, tanto en sus bordes laterales como en su superficie circunferencial, la primera para que al momento de aplicar cargas de fuerza estas se distribuyan homogéneamente en toda la planitud, la segunda para que la abrazadera se acople y se ajuste eficientemente a la superficie curva de la muestra.

11. Además de las inclusiones de geometrías cilíndricas en los modelos controlados, se recomienda usar cuboides, esferas o geometrías irregulares de materiales como icopor y caucho.

12. Incluir el estudio de los fenómenos de ondas como la reflexión, refracción y atenuación como factores que afectan la calidad de la señal.

13. Lograr cuantificar el parámetro de densidad de microfractura en función de otros factores importantes como la Anisotropía onda S, cambio de amplitud de la señal y espectro de frecuencias.

14. Generar matrices y por ende tomogramas acústicos donde estén en función de la Onda P y Onda S al mismo tiempo, como relación velocidad S respecto Velocidad Onda P, de esta manera se puede discretizar de mejor forma las anomalías que presente el medio estudiado.

15. Complementar la validación con la técnica de Tomografía Acústica Computacional (TAC), la cual por medio de haces de rayos X detectan anomalías al interior de los materiales.

16. Crear una interfaz interactiva con todas las rutinas creadas en Matlab® con el fin de tener todos los procesos de generación de tomografía acústica ordenados de la siguiente manera: Generación roca virtual 3.5 D, lectura de matrices (datos de laboratorio), generación de tomografía acústica 2.5 D, generación tomografía acústica 3.5 D y cuantificación de densidad de microfracturas.

## BIBLIOGRAFÍA

ALONSO, F. Velocidad de propagación de ondas en rocas carbonatadas. Universidad de Oviedo. 1985.

ASS'AD , Jamal M ; TATHAM, Robert H, & McDONALD, John A. A physical model study of microcrack-induced anisotropy. TEXACO INC. Houston 1992.

BARTMAN, Bob. Las diversas facetas de los datos sísmicos de componentes múltiples. Oilfield Review SLB. Otoño 2004.

BLANCO, Maria José. Tomografía Lineal con Residuos temporales del manto bajo de la península Iberica. Universidad Complutense de Madrid. 1995

BRATTON, Tom. La naturaleza de los Yacimientos Naturalmente Fracturados. Oilfield Review. SLB. 2006.

CEES W, Passchier. RUDOLPH, A. J. Microtectonics. 2nd, Revised and Enlarged Edition. Springer. 2005.

CHUN, Liu. QUINGXIN Guo. Characteristics and origin of microfracture in Lower Cretaceous tight sandstone from Kuga foreland basin, NW China. IPTC. 2013.

CUETO, N. Influencia de la anisotropía en las propiedades hídricas de rocas. Universidad de Alicante. 2006.

DENNIS, J.G. International Tectonic Dictionary American Association of Petroleum Geology. 1967.

GALLEJOS J.A. Errores conceptuales en geología: Los conceptos isotropía - anisotropía y propiedad escalar - propiedad vectorial. Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Granada. 1992.

GALVIS CASTRILLON, Jorge. Tesis de Grado: Generador electrónico de voltaje para su aplicación en pruebas dinámicas sobre medios porosos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2006.

HALDORSEN, Jakob B.U. Acústica de pozo. Oilfield Review. Houston 2006.

HUDSON, J.A. Overall properties of a cracked solid. Cambridge University. 1980.

MACBETH, C.; and LYNN, H. Applied Seismic Anisotropy: Theory, Background, and Field Studies. SEG. 2000.

MUELLER, Michael C. Case Studies of Multicomponent Seismic Data for Fracture Characterization: Austin Chalk. Amoco EPTG. Houston, Texas.

Nelson A, R.: "Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs". Second Edition, Boston, Gulf Professional Publishing. 2001.

NIETO SAMANIEGO, Ángel Francisco. Estimación de densidades, distribuciones de longitud y longitud de fracturas; un caso de estudio en la falla de los planes, La Paz, B.C.S. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. UNAM 2003.

PACHANO PELÁEZ, Karen Linnete. Metodología para caracterizar un sistema de fracturas utilizando inversión de datos de ondas P y S. Universidad Industrial de Santander. 2008.

POP, Julian. SULLIVAN GLASER, Karen. Las presiones de las operaciones de perforación y de production. Oilfield Review SLB. Invierno 2005/2006.

RANALLI, G. & A.D. GALE. Lectures on the rheology of the earth, part basic Concepts. Carleton University. Department of Geology. 1976.

RICHARD, Snyder. CRAFT, Milton. EVALUATION OF AUSTIN AND BUDA FORMATIONS FROM CORE AND FRACTURE ANALYSIS. Gulfcoast association of geological societies. 1977.

RUEDA MARTINEZ, Jenny. Tesis de Grado: Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótopos: aplicación a la formación mirador del campo cupiagua, piedemonte llanero. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2006.

SCHOENBERG, Michael & SAYERS, Colin M. Seismic anisotropy of fractured rock. Schlumberger Cambridge Research. Cambridge 1995.

SOMOZA GRATEROL, Ana Victoria. Tesis de Maestría: Efectos de los parámetros de anisotropía en la generación de imágenes a partir de datos VSP y WALKAWAY VSP. Universidad Industrial de Santander 2008.

STACEY, Robert. Electrical Impedance Tomography. Stanford University. 2006.

THOMSEN, Leon. Understanding seismic anisotropy in exploration and explotation. SEG. Distinguished instructor series, N°5. 2002.

WEI, JianXin & DI, BangRang. A physical model study of effect fracture aperture on seismic wave. China University of Petroleum. Beijing 2008.

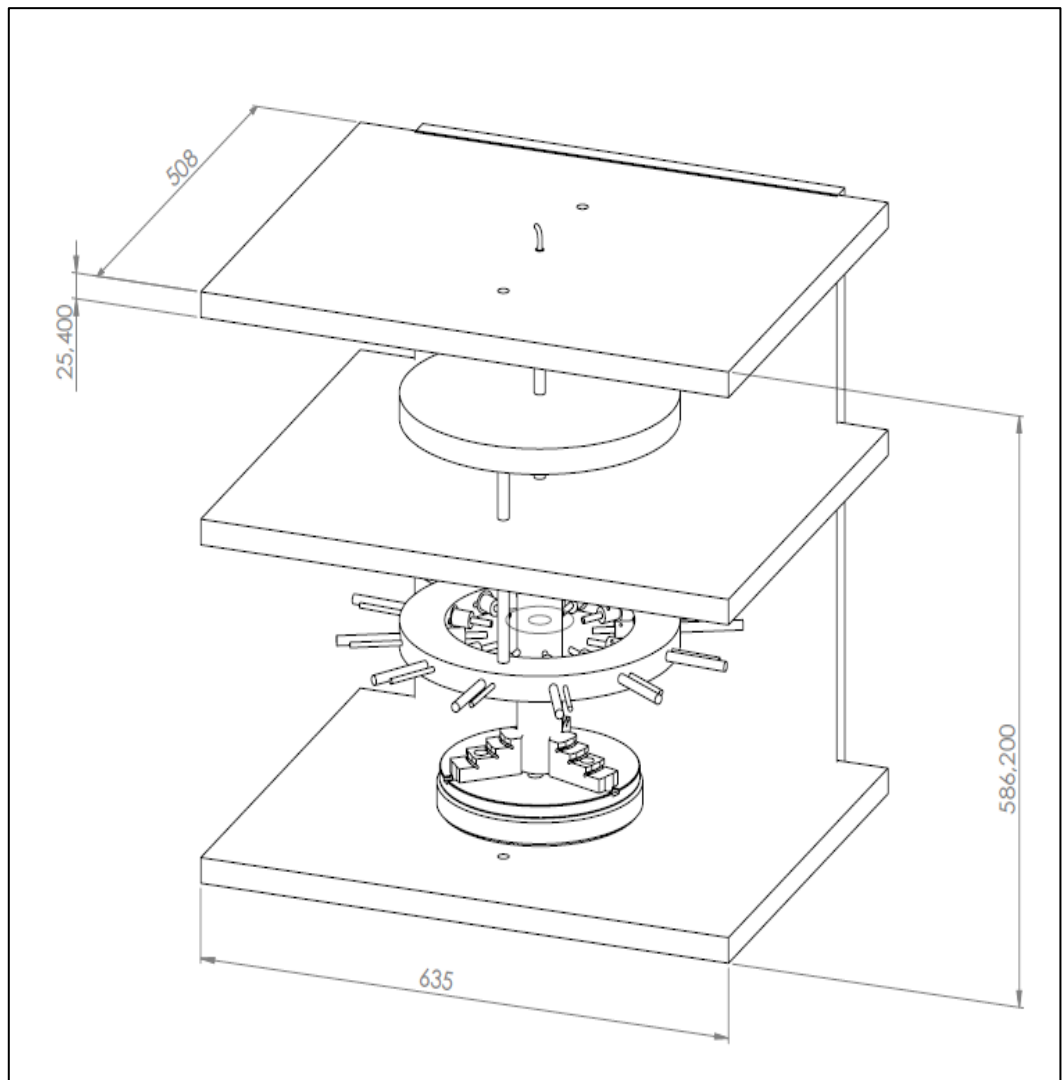
WHITMAN, G.B. & WILEY, Jhon. Linear and non-linear waves. 1974.

WOLF, Kevin. Laboratory measurements and reservoir monitoring of Bitumen sand reservoirs. Stanford University. 2010.

## ANEXOS

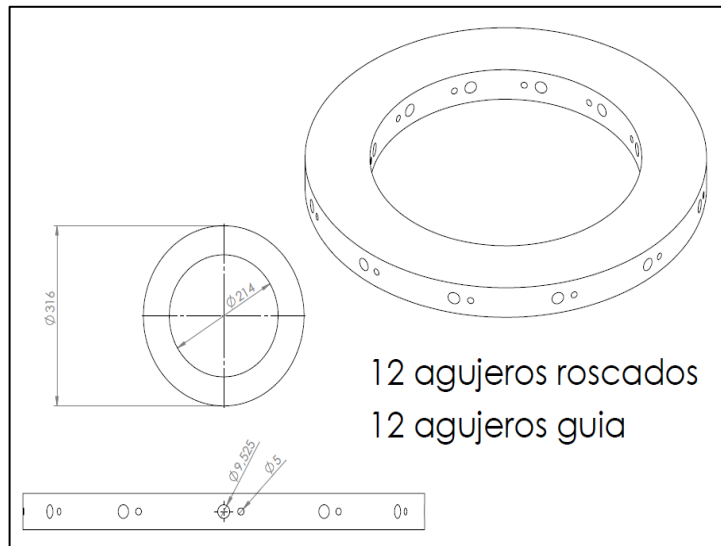
### ANEXO A: PLANOS DEL DISPOSITIVO DE BARRIDO DE SEÑALES EN LA ROCA (DBSR)

Figura A1: Montaje General del DBSR – Todas las medidas en mm.



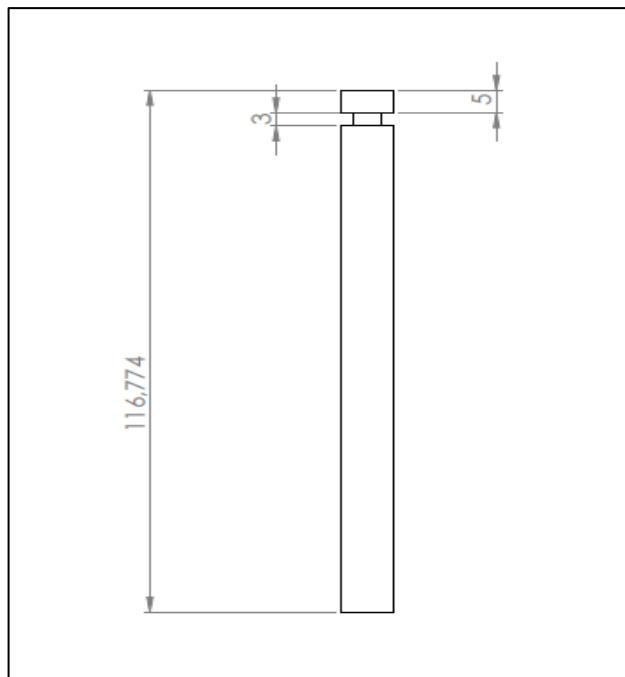
Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

Figura A2: Anillo de Ajuste



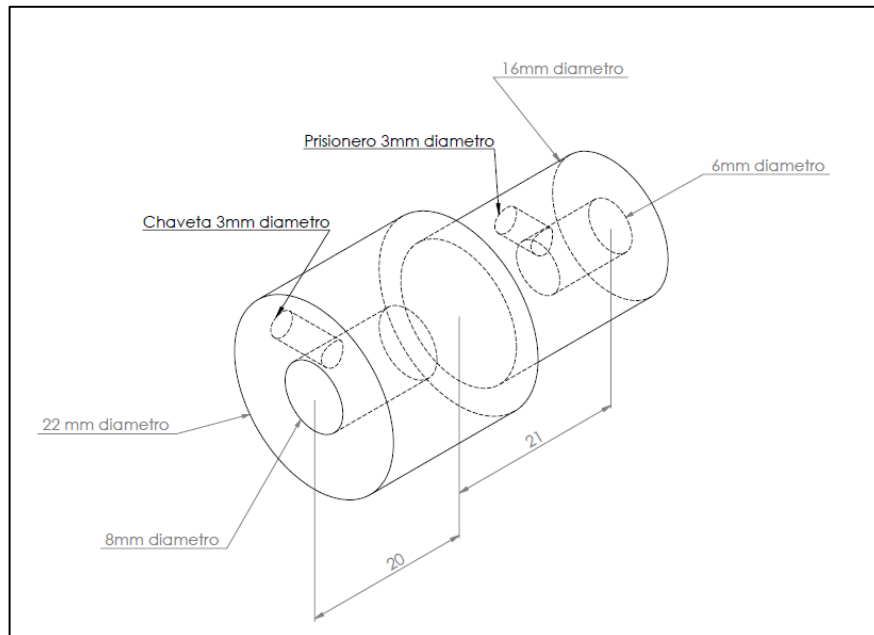
Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

Figura A3: Tornillo de Ajuste



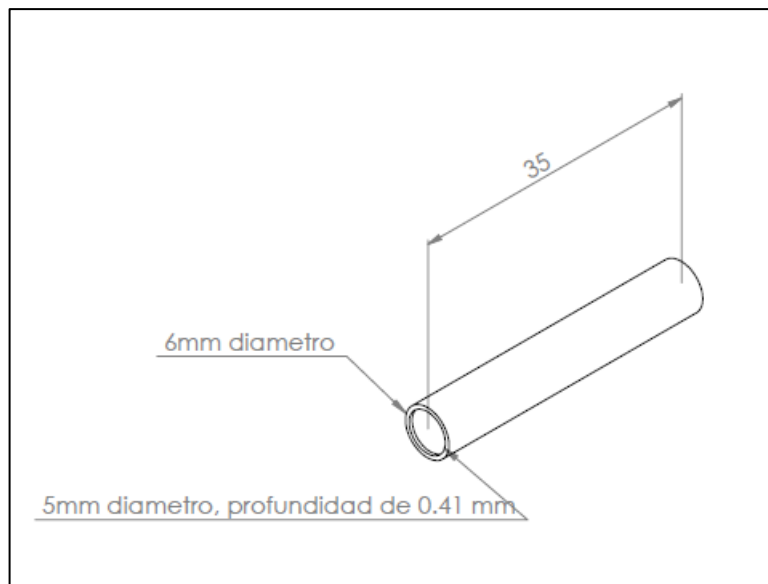
Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

Figura A4: Rotula Portacrystal



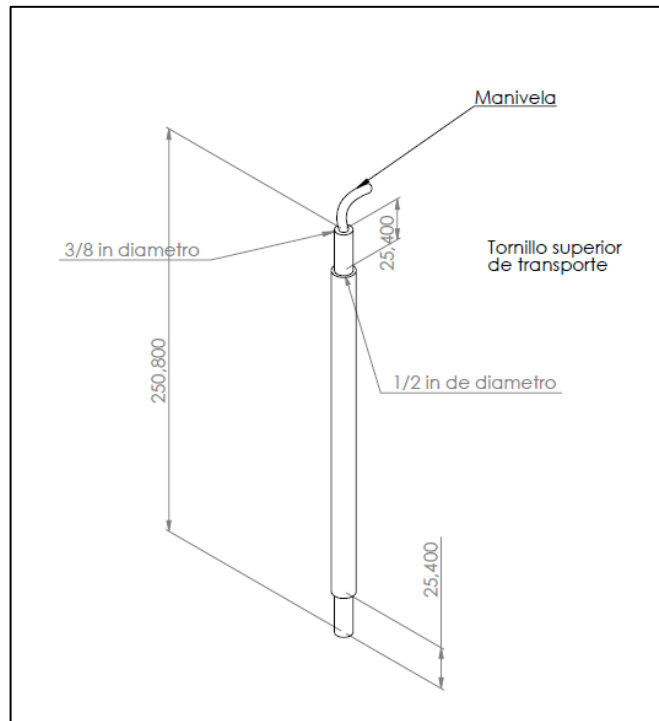
Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

Figura A5: Portacrystal



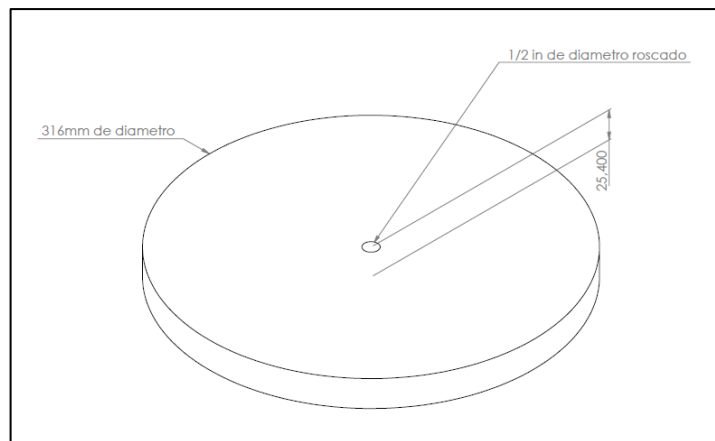
Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

Figura A6: Tornillo principal para el movimiento vertical



Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013

Figura A6: Disco de Movimiento



Fuente: GÓMEZ, Luis. Estimación de la Densidad de Microfractura de la Roca a partir de Ondas de Compresión y de Corte. GIEP-LMR ICP. 2013