

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA PRUEBAS
DE CORTE DIRECTO INCLINADO EN MUESTRAS DE ROCA DE
GEOMETRÍA NO CONVENCIONAL PARA EL LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS DEL INSTITUTO COLOMBIANO DEL
PETRÓLEO**

**HERNÁN DARÍO MANTILLA HERNÁNDEZ
JAVIER ENRIQUE REYES TARAZONA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2009

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA PRUEBAS
DE CORTE DIRECTO INCLINADO EN MUESTRAS DE ROCA DE
GEOMETRÍA NO CONVENCIONAL PARA EL LABORATORIO DE
MECÁNICA DE ROCAS DEL INSTITUTO COLOMBIANO DEL
PETRÓLEO**

**HERNÁN DARÍO MANTILLA HERNÁNDEZ
JAVIER ENRIQUE REYES TARAZONA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Mecánico**

Director

M.Sc. PEDRO JOSÉ DÍAZ GUERRERO

Ingeniero Mecánico

Codirector

JENNY MABEL CARVAJAL JIMENEZ

Ingeniera de Petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2009

DEDICATORIA

*A mis padres José Manuel y Esperanza, mi hermana
Laura Cristina, por su amor incondicional, su apoyo y
compañía a lo largo de esta etapa académica que culminó
con este trabajo de grado. Los quiero mucho. Gracias.*

Hernán Darío Mantilla Hernández

DEDICATORIA

A Dios que me guardó e iluminó todo este tiempo.

A mi papá Enrique y mi mamá Flor Alba por todo su apoyo, motivación, paciencia y mucho amor durante toda esta etapa.

A mis hermanos Mauricio y Camilo que de muchos modos me alentaron siempre.

Javier Reyes Tarazona

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación Estabilidad de Pozo, adscrito al convenio 002-2003 entre la Universidad Industrial de Santander y el Instituto Colombiano del Petróleo, por la confianza, el respaldo técnico y financiero que hizo posible este proyecto.

A la líder del laboratorio de mecánica de rocas del ICP, Ingeniera Jenny Carvajal por su apoyo y excelente disposición, también al Ingeniero Jorge Galvis y a Eric Cifuentes por toda su ayuda en el desarrollo de las pruebas.

Al profesor Pedro Díaz por ser pionero en la dirección de nuevos proyectos de investigación interdisciplinarios como éste y orientarnos pensando siempre en un resultado de alta calidad, que aporta a la relación industria-academia y a nuestra formación como excelentes ingenieros.

A todos nuestros amigos, compañeros y familiares que de una u otra forma nos brindaron ánimo, confianza y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO.....	4
1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	4
1.1.1 Objetivo general	4
1.1.2 Objetivos específicos.....	4
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.2.1 Identificación del problema	6
1.2.2 Justificación para solucionar el problema.....	7
2. MODELO FÍSICO EXPERIMENTAL Y MATEMÁTICO DEL DISPOSITIVO	9
2.1 PRELIMINARES.....	9
2.2 ENSAYO NORMALIZADO DE RESISTENCIA AL CORTE DIRECTO EN ROCAS	9
2.3 MODELO MATEMÁTICO DEL DCDI.....	12
2.3.1 Características del modelo	12
2.3.2 Metodología para la simulación y validación del modelo matemático	13
2.4 MODELO FÍSICO EXPERIMENTAL DEL DCDI.....	19
2.4.1 Metodología para simular el modelo físico del DCDI.....	24
2.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DEL DCDI	30
2.6 DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO ÓPTIMO PARA EL DCDI	31
3. DISEÑO MECÁNICO DEL DCDI.....	37
3.1 PRELIMINARES.....	37
3.2 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	37

3.2.1 Dimensionamiento geométrico	38
3.2.2 Selección del material	45
3.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	48
4. DISEÑO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL Y PROTOCOLOS DE ENSAYO.....	51
4.1 PRELIMINARES.....	51
4.2 DISEÑO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL	52
4.2.1 Preparación de muestras.....	52
4.2.2 Procedimiento para el montaje y desmontaje experimental del DCDI	61
4.3 PROTOCOLO DE ENSAYO	77
4.3.1 Protocolo de ensayo TCDI 50°	78
4.3.2. Protocolo de ensayo TCDI 90°	82
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	86
5.1 PRELIMINARES.....	86
5.2 PRUEBAS DEL DISPOSITIVO PROTOTIPO 50°.....	86
5.2.1 Ensayo CDI en la muestra Tambor 51a 01.....	86
5.2.2 Ensayo CDI en la muestra Tambor 51a 02.....	88
5.2.3 Ensayo CDI en la muestra Tambor 51a 03.....	89
5.2.4 Ensayo CDI en la muestra Tambor 08V	90
5.2.5 Ensayo CDI en la muestra Tambor 08II	92
5.2.6 Ensayo CDI en la muestra Tambor 08VI.....	93
5.2.7 Ensayo CDI en la muestra Tambor 08 I	94
5.2.8 Ensayo CDI en la muestra Berea B1	95
5.2.9 Ensayo CDI en la muestra Berea B3	96
5.2.10 Ensayo CDI en la muestra Berea B2	97
5.3 PRUEBAS DEL DISPOSITIVO PROTOTIPO 90°.....	98
5.3.1 Ensayo CCS CDI en la muestra Tambor 51a04.....	99

5.3.2 Ensayo CCS CDI en la muestra Tambor 51b05.....	102
5.3.3 Ensayo CCS CDI en la muestra Tambor 51b06.....	105
5.3.4 Ensayo CCS CDI en la muestra Tambor 08 III.....	110
5.4 RELACION ENTRE EL ENSAYO EXPERIMENTAL DE CORTE DIRECTO INCLINADO Y LOS ENSAYOS CONVENCIONALES.....	113
5.4.1 Precisión del ensayo de CDI utilizando el DCDI.	113
5.4.2 Exactitud del ensayo CDI utilizando el DCDI.....	120
CONCLUSIONES.....	131
RECOMENDACIONES.....	133
BIBLIOGRAFIA	134
ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Montaje esquemático del equipo de corte directo	10
Figura 2. Relación esfuerzo de corte contra desplazamiento.....	11
Figura 3. Recta intrínseca que relaciona el esfuerzo normal y cortante.	12
Figura 4. Metodología para la simulación y validación del modelo	14
Figura 5. Porcentaje de error formación Tambor 45.....	16
Figura 6. Porcentaje de error formación La Paz.....	16
Figura 7. Porcentaje de error formación Cagui.....	17
Figura 8. Porcentaje de error formación Tambor MS2A.....	17
Figura 9. Porcentaje de error formación Apiay.....	18
Figura 10. Modelo físico del ensayo de corte directo.....	19
Figura 11a. Cargas en la muestra de roca.	20
Figura 11b. Esfuerzos en la muestra de roca.....	20
Figura 12a. Modelo físico DCDI vista lateral.	21
Figura 12b. Modelo físico DCDI vista isométrica.....	22
Figura 13a. Fuerzas aplicadas a la muestra de roca.	23
Figura 13b. Esfuerzos generados en la muestra de roca.....	23
Figura 14. Modelo físico con ángulo de 90°.....	24
Figura 15. Metodología de simulación del DCDI.....	25
Figura 16. Distribución de cargas en la muestra de roca.....	29
Figura 18a. Simulación del DCDI con 15° de inclinación	31
Figura 18b. Simulación del DCDI con 25° de inclinación.....	32
Figura 18c. Simulación del DCDI con 35° de inclinación	32
Figura 19a. Simulación del DCDI con 40° de inclinación.....	33
Figura 19b. Simulación del DCDI con 45° de inclinación.....	33
Figura 20a. Simulación del DCDI con 50° de inclinación.	34

Figura 20b. Simulación del DCDI con 55° de inclinación.....	34
Figura 21. Simulación del DCDI con 90° de inclinación.....	35
Figura 22. Requerimientos de diseño de los endcap.....	38
Figura 23. Vista frontal del montaje roca y endcap para el DCDI de 50°.....	39
Figura 24a. Montaje del DCDI de 50°, vista isométrica y vista lateral.....	40
Figura 24b. Montaje del DCDI de 90°, vista isométrica y vista lateral.	41
Figura 25a. Dimensionamiento geométrico del endcap de 50° vista lateral....	42
Figura 25b. Montaje del DCDI vista lateral.	42
Figura 26a. Dimensionamiento endcap 90° vista lateral.....	43
Figura 26b. Dimensionamiento endcap 90° vista frontal.....	44
Figura 26c. Montaje DCDI para 90°.	44
Figura 27. Vista frontal y lateral del endcap de 50°	49
Figura 28. Disposición del montaje a 50°	49
Figura 29. Vista frontal y lateral del endcap de 90°.....	50
Figura 30. Disposición del montaje de 90°	50
Figura 31. Equipo de extracción de muestras Core Test, Área de corte ICP ...	53
Figura 32. Base en V del Core Test, Área de corte del ICP.....	54
Figura 33. Diseño de broca hueca diamantada para extracción de probetas ..	55
Figura 34. Planos de la broca diamantada de 22mm	55
Figura 35. Broca diamantada de 22mm de diámetro interno.	56
Figura 36. Extracciones de prueba 1, 2 y 3.....	57
Figura 37. Cortadora de disco de Rubí DU-200 L.....	58
Figura 38. Adaptación para corte de las probetas de 22mm.....	59
Figura 39. Pulidora.....	60
Figura 40. Comparador de caras Mitutoyo	60
Figura 41. Comparador de carátula y montaje del DCDI.	62
Figura 42. Medida del diámetro de la muestra en los 3 diferentes puntos.....	64
Figura 43. Vista de perfil y lateral de la chaqueta termoencogible.	65

Figura 44. Disposición del endcap superior con la muestra de roca	66
Figura 45. Montaje de los dos endcap	66
Figura 46. Reducción de la chaqueta termoencogible ajustando el montaje. ...	67
Figura 47. Probeta montada en la mesa del equipo MTS	68
Figura 48. Disposición del montaje para retirar la chaqueta termoencogible. ...	69
Figura 49. Carga manual sobre el montaje	70
Figura 50. Ubicación de los endcap para su separación.	70
Figura 51. Remoción de material de la muestra	71
Figura 52. Chaquetas termoencogibles con reducción de diámetro	72
Figura 53. Disposición del endcap inferior con la muestra de roca	73
Figura 54. Montaje estable y alineado con la primera chaqueta	74
Figura 55. Cierre de la segunda chaqueta termoencogible	75
Figura 56. Ubicación de los sellos de alambre en el montaje.	75
Figura 57. Sellos de silicona sobre el montaje	76
Figura 58. Ubicación del montaje en el MTS	77
Figura 59. Gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento	80
Figura 60. Gráfica de esfuerzo cortante máximo contra esfuerzo normal	81
Figura 61. Muestra de roca fallada	87
Figura 62. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 03	87
Figura 63. Muestra de roca fallada	88
Figura 64. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI05	88
Figura 65. Muestra de roca fallada	89
Figura 66. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI06	90
Figura 67. Muestra de roca fallada	91
Figura 68. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 09	91
Figura 69. Muestra de roca fallada	92
Figura 70. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 10	92
Figura 71. Muestra de roca fallada	93

Figura 72. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 11	93
Figura 73. Muestra de roca fallada	94
Figura 74. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 12	94
Figura 75. Muestra de roca fallada	95
Figura 76. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 07	96
Figura 77. Muestra de roca fallada	97
Figura 78 Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 08	97
Figura 79. Muestra de roca fallada	98
Figura 80 Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 15	98
Figura 81. Muestra de roca fallada	100
Figura 82. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte en CCS CDI 01	100
Figura 83. Esfuerzo de corte Vs tiempo de corte en CCS CDI 01	101
Figura 84. Presión de confinamiento Vs tiempo en CCS CDI 01	101
Figura 85a. Falla de la chaqueta termoencogible	102
Figura 85b. Endcap con la muestra de roca saturada	103
Figura 85c. Muecas en la muestra de roca	103
Figura 86. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte en CCS CDI 02	104
Figura 87. Esfuerzo de corte Vs tiempo de corte en CCS CDI 02	104
Figura 88. Presión de confinamiento Vs tiempo en CCS CDI 02	105
Figura 89. Montaje de la probeta	106
Figura 90. Muestra de roca fallada por cizalla.	107
Figura 91. Montaje después de la prueba	108
Figura 92. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte en CCS CDI 03	108
Figura 93. Esfuerzo de corte Vs tiempo de corte en CCS CDI 03	109
Figura 94. Presión de confinamiento Vs tiempo en CCS CDI 03	109
Figura 95. Muestra de roca fallada	110
Figura 96. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte en CCS CDI 04	111
Figura 97. Esfuerzo de corte Vs tiempo de corte en CCS CDI 04	111

Figura 98. Presión de confinamiento Vs tiempo en CCS CDI 04.....	112
Figura 99. Precisión para los ensayos en la formación Tambor 51	115
Figura 100. Precisión para los ensayos en la formación Tambor 08	117
Figura 101. Precisión para los ensayos en la formación Tambor AC	118
Figura 102. Precisión para los ensayos en la formación Berea	120
Figura 103. Envolvente de falla y puntos de falla hallados con el DCDI.....	123
Figura 104. Porcentaje de error envolvente baja formación Tambor 51.....	123
Figura 105. Porcentaje de error envolvente alta formación Tambor 51.	124
Figura 106. Envolvente de falla y puntos de falla hallados con el DCDI.....	125
Figura 107. Porcentaje de error envolvente baja formación Tambor 08.....	126
Figura 108. Porcentaje de error envolvente alta formación Tambor 08.	126
Figura 109 Envolvente de falla y puntos de falla hallados con el DCDI.....	128
Figura 110. Porcentaje de error envolvente baja formación Berea.	128
Figura 111. Porcentaje de error envolvente alta formación Berea.....	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del modelo matemático	13
Tabla 2. Características de solución para el modelo matemático.....	13
Tabla 3. Tabla de cálculo módulo de Young y relación de Poisson.....	15
Tabla 4. Tabla de datos de la prueba de laboratorio	25
Tabla 5. Tabla de datos modelo DCDI	26
Tabla 7. Propiedades mecánicas y composición química acero AISI 304.	47
Tabla 8. Resultados de la prueba de la broca diamantada	57
Tabla 10. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor 51.....	114
Tabla 11. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor 08.....	116
Tabla 12. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor AC.....	117
Tabla 13. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor AC.....	119
Tabla 14. Ingreso de datos y cálculo de esfuerzos formación Tambor 51.....	122
Tabla 15. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor 51.....	122
Tabla 16. Precisión promedio	129
Tabla 17. Exactitud promedio.....	130

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PLANO DE PROTOTIPOS DISPOSITIVOS DE CORTE DIRECTO INCLINADO.....	137
ANEXO B. FORMATO PARA EL REPORTE DE RESULTADOS EN PRUEBAS DE CORTE DIRECTO INCLINADO CON EL DCDI 50°	138
ANEXO C. FORMATO PARA EL REPORTE DE RESULTADOS EN PRUEBAS DE CORTE DIRECTO INCLINADO CON EL DCDI 90°	141
ANEXO D. PLANO DE BROCA PARA EXTRACCION DE MUESTRAS DE ROCA.....	145

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA PRUEBAS DE CORTE DIRECTO INCLINADO EN MUESTRAS DE ROCA DE GEOMETRÍA NO CONVENCIONAL PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO*

AUTORES:

HERNÁN DARÍO MANTILLA

JAVIER ENRIQUE REYES TARAZONA**

PALABRAS CLAVES

Corte, directo, ensayo, no convencional, diseño

DESCRIPCIÓN

Este proyecto tiene como finalidad el diseño y construcción de un dispositivo para pruebas de corte directo inclinado en geometría no convencional que permitan medir la resistencia al corte de muestras de roca tipo disco y así evaluar el ángulo de fricción interna y la cohesión.

El dispositivo de corte directo tiene la particularidad de ser inclinado debido a que se adapta al equipo MTS 815 que ejerce una carga axial que se descompone en normal y de corte en la roca en proporción del ángulo de inclinación del montaje del dispositivo. El ángulo del dispositivo se determinó en 50° después de simulaciones en ANSYS, también se construyó otro a 90° para controlar independientemente la aplicación de las cargas. El montaje consta de dos endcap que alojan y transmiten la carga a la roca de geometría no convencional de 22mm de diámetro y 8mm de altura. La técnica de corte directo en geometría no convencional es experimental y requirió del diseño del dispositivo y los protocolos de ensayo para su implementación en el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo. El protocolo de la prueba se normalizó para tipo de roca arenisca.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, M.Sc. Pedro José Díaz R.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A INCLINED DIRECT SHEAR TESTS DEVICE OF SAMPLES ROCK OF NON-CONVENTIONAL GEOMETRY FOR THE LABORATORY OF ROCK MECHANICS OF THE COLOMBIAN OIL INSTITUTE*

AUTHOR:

HERNÁN DARÍO MANTILLA HERNÁNDEZ
JAVIER ENRIQUE REYES TARAZONA **

KEY WORDS:

Direct share, non-conventional geometry

DESCRIPTION

This project aims at designing and building a cutting device for direct tilted geometry for non-destructive testing for measuring cut resistance of samples of rock types and evaluate the disc angle of internal friction and cohesion.

The device of direct cut has the particularity of being inclined due to the fact that one adapts to the equipment MTS 815 that there exercises an axial load that decomposes in normally and of cut in the rock in proportion of the angle of inclination of the assembly of the device. The angle of the device decided in 50 ° after simulations in ANSYS, also other one was constructed 90 ° to control independently the application of the loads. The assembly is clear of two endcap that they lodge and transmit the load to the rock of not conventional geometry of 22mm of diameter and 8mm of height.

The technique of cutting direct unconventional geometry is required and experimental design of the device and the test protocols for its implementation in the laboratory of rock mechanics of the Colombian Institute of Petroleum. The details of the test was standardized for each type of sandstone

* Undergraduated thesis

** Faculty of Physiomechanical Engineerings , School of Mechanical Engineering . M.Sc. Pedro José Díaz

INTRODUCCIÓN

La dificultad para hacer pruebas de caracterización mecánica en formaciones geológicas sensibles por presentar laminación en las muestras durante la extracción de los núcleos, entre otros daños que imposibilitan la obtención de muestras de geometría convencional para pruebas de laboratorio, enfocadas en obtener sus propiedades mecánicas, genera la necesidad de desarrollar una herramienta y una metodología propia de ésta, que permita conocer el comportamiento mecánico a partir de muestras de roca de geometría no convencional.

El Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo brinda la oportunidad de estudiar el comportamiento de la roca a través de una propuesta de diseño y construcción de un dispositivo, que permita medir la resistencia mecánica de muestras de roca con la particularidad de tener una geometría no convencional, el tamaño de las muestras debe ser de un par de centímetros cúbicos y con la forma de disco, además tener la posibilidad de ser obtenidos a partir de fragmentos desprendidos de la cara del pozo (cavings) o de núcleos fragmentados.

El proyecto tiene como objetivo el diseño y construcción de un dispositivo experimental que permita caracterizar mecánicamente formaciones geológicas, para posteriormente, incorporarlo al laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo, mediante una prueba de corte directo inclinado, que utilice al equipo de mecánica de rocas MTS 815. Cabe recalcar que el aporte principal del dispositivo y la prueba experimental, es el uso de geometría no convencional en la muestra de roca, para aumentar la

posibilidad de estudio del comportamiento de la roca en búsqueda de propiedades mecánicas como la resistencia máxima al corte, que finalmente permitan calibrar modelos geomecánicos.

Este documento se encuentra dividido en cinco capítulos. El enfoque de cada uno de ellos se explica a continuación:

El primer capítulo enmarca el proyecto, se identifica el problema y se justifica su solución, de igual manera se plantean los objetivos y la metodología para la realización del diseño y construcción del dispositivo.

En el segundo capítulo, se presenta el modelo físico y matemático realizado para el dispositivo de corte directo inclinado, para lo que se estudió la norma ASTM D5607 - 08 para pruebas de corte directo en rocas y se empleó el software ANSYS para modelar matemáticamente el comportamiento del dispositivo y la roca, obteniendo el ángulo de inclinación adecuado del dispositivo.

El tercer capítulo expone el diseño mecánico del dispositivo, basado en los requerimientos establecidos, como son: la carga soportada, el ambiente de la prueba y la adaptación del dispositivo a el equipo MTS 815.

El cuarto capítulo contiene el montaje experimental y los protocolos de ensayo. Se establecen y se realizan los procedimientos para la preparación de las muestras y adecuación del montaje. También se determinan el control y la configuración en el equipo MTS 815 para las pruebas.

El quinto y último capítulo, describe las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos. También calcula una la relación entre los resultados de

las pruebas convencionales y la experimental, para conocer el ajuste entre las mismas.

Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones por parte de los autores, una vez finalizado el proyecto.

1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1.1 Objetivo general

Continuar con la misión de la Universidad de formar personas de alta calidad ética, política y profesional; generar y adecuar conocimientos mediante el diseño y construcción de un dispositivo para realizar pruebas de corte directo en muestras de roca de geometría no convencional adaptable al sistema de mecánica de rocas MTS 815 que permita caracterizar mecánicamente formaciones geológicas de las cuales no es posible obtener muestras de roca con geometría convencional.

1.1.2 Objetivos específicos

Evaluar la influencia del ángulo de aplicación de carga en pruebas de corte directo inclinado, en muestras de roca de geometría no convencional mediante el planteamiento y evaluación de un modelo físico, matemático y numérico que permita conocer el ángulo adecuado para producir corte directo en la muestra de roca.

Diseñar el montaje experimental para ensayos de corte directo inclinado en muestras de roca de geometría no convencional, el cual deberá atender las restricciones geométricas determinadas por el ángulo de aplicación de la carga, restricciones mecánicas de carga y de los elementos de medición utilizados.

Diseñar el dispositivo para pruebas de corte directo inclinado adaptable al sistema de mecánica de rocas MTS 815 atendiendo los requerimientos de diseño generados en el proceso de obtención del ángulo adecuado de corte y del diseño experimental.

Definir los protocolos de ensayo requeridos para pruebas de corte directo en muestras de roca de geometría no convencional identificando las propiedades que se evaluarán en la roca, aplicando normatividad de ensayos convencionales de corte directo y teniendo en cuenta los manuales de operación de los equipos utilizados en la prueba.

Valorar la correlación entre los ensayos convencionales y el ensayo no convencional propuesto, desarrollando pruebas en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP con el equipo MTS 815 y el dispositivo construido.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Identificación del problema

El laboratorio de mecánica de rocas del *Instituto Colombiano del Petróleo* ayuda a la comprensión del comportamiento geomecánico de las formaciones geológicas colombianas, realizando ensayos de caracterización geomecánica como: ensayos uniaxiales, triaxiales, acústicos, de indentación, tensión indirecta, desplazamiento de fluidos en medios porosos y de interacción químico - mecánica entre otros; para esto desarrolla e implementa nuevas técnicas y tecnologías de laboratorio en caracterización geomecánica, buscando facilitar el estudio geomecánico de las formaciones con el fin de reducir los costos de explotación de hidrocarburos y mejorar la productividad de yacimientos.

De la observación realizada en el laboratorio de mecánica de rocas se identifica una debilidad en el proceso productivo del mismo, el laboratorio no cuenta con ensayos que permitan la caracterización de formaciones geológicas sensibles como shales y arcillolitas, ésto debido a que la naturaleza de las formaciones, no permite una extracción de las mismas en los tamaños requeridos para hacer ensayos convencionales; sin embargo, estas rocas permiten extraer muestras de menor tamaño *-no convencionales-* para ensayarlas y posteriormente caracterizarlas. De lo anterior, se puede identificar el problema a resolver así; *se requiere conocer el comportamiento geomecánico en formaciones geológicas donde no se puedan extraer muestras para ensayos convencionales, ya sea porque no se dispone de roca suficiente o porque no es posible realizar los cortes con la geometría requerida.*

1.2.2 Justificación para solucionar el problema

Con el objetivo de contribuir con la misión de la *Universidad Industrial de Santander*: generar y adecuar conocimientos orientados por el trabajo interdisciplinario y la relación con el mundo externo, el presente trabajo de grado pretende fortalecer la relación entre la academia y la industria, generar nuevos conocimientos a partir de la investigación, el diseño de dispositivos y técnicas de ensayos no convencionales, que permitan solucionar problemas de caracterización geomecánica y mejorar la productividad en la explotación de hidrocarburos.

El trabajo de grado de tipo investigativo contribuye en su totalidad y directamente en la solución del problema definido, plantea una solución viable y posible de realizar.

Dentro de las líneas de investigación propuestas por la escuela de ingeniería mecánica para el desarrollo de trabajos de grado en la modalidad de investigación, se encuentra el "*Diseño y control de procesos*". Este integra como subtema el "*desarrollo de ensayos normalizados*". Este trabajo de grado se encuentra dentro de estos dos lineamientos de investigación, plantea el diseño y construcción de un dispositivo para realizar ensayos normalizados no convencionales, así como una nueva técnica de ensayos, que permite controlar procesos productivos en lo que a ensayos de laboratorio se refiere.

Para la consecución del trabajo de grado se cuenta con los recursos económicos necesarios; *el grupo de estabilidad de pozo y el laboratorio de mecánica de rocas del ICP* financian el trabajo de grado.

Según Younane Abousleiman y otros¹ existe una técnica de ensayo no convencional que soluciona el problema definido. El trabajo de grado toma este artículo y se estructura de tal forma que permitirá como resultado final obtener un dispositivo y una prueba no convencional que solucione las deficiencias encontradas en los procesos productivos del laboratorio de mecánica de rocas del ICP.

Los beneficiarios de este trabajo de grado son; el *ICP* y el *Grupo de Estabilidad de Pozo*, quienes contarán con un dispositivo mecánico y una técnica para ensayos no convencionales que soluciona las falencias presentes en el laboratorio de mecánica de rocas, mejorando la productividad del mismo. La *Escuela de Ingeniería Mecánica* obtendrá producción científica y tecnológica mediante la publicación de un artículo, al participar y contribuir en la investigación de nuevas técnicas de ensayos no convencionales

¹ Artículo SPE 110120. "Geomechanics Field and Laboratory Characterization of Woodford Shale: The Next Gas Play"

2. MODELO FÍSICO EXPERIMENTAL Y MATEMÁTICO DEL DISPOSITIVO

2.1 PRELIMINARES

Este capítulo describe el ensayo de corte directo normalizado en rocas y su modelo físico, siendo éste el punto de partida conceptual del DCDI. De igual forma expone cómo a partir del modelo físico del ensayo convencional de corte directo, se plantea un modelo matemático que se identifique con este tipo de medio, un material poroso que esté sometido a carga estática, es de esta manera que habiendo definido el comportamiento del material, se procede a calibrar el modelo numérico, a través de un modelo físico experimental del DCDI, con el objeto de determinar la influencia del ángulo de inclinación en el DCDI.

2.2 ENSAYO NORMALIZADO DE RESISTENCIA AL CORTE DIRECTO EN ROCAS

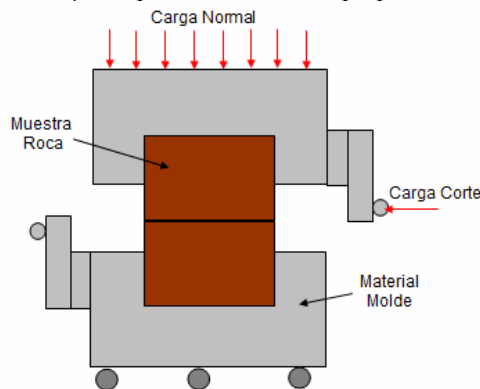
El ensayo de corte directo en rocas es el punto de partida para el diseño del *Dispositivo de Corte Directo Inclinado*², se apropian los conceptos y fundamentos del mismo para aplicarlos en el DCDI. A continuación se describe el ensayo, con el único objeto de tener claridad en el desarrollo de la prueba y con ello plantear el comportamiento del modelo en el DCDI.

² De ahora en adelante DCDI (*Dispositivo de Corte Directo Inclinado*)

La finalidad del ensayo de corte directo es determinar la resistencia de una roca, sometida a cargas que simulen las que existen o existirán en un terreno o subsuelo, produciendo éstas, un esfuerzo de corte máximo, esfuerzo normal de compresión mínimo.

Para determinar la resistencia al corte máximo, se usa en el laboratorio un equipo de corte directo, normalizado por la ASTM en su norma D5607-08³ el cual consta de una caja de sección circular, dividida horizontalmente en dos mitades, como se observa en la figura 1. Dentro de ella va ubicado el espécimen de roca, se aplica sobre éste una carga vertical de confinamiento, al tiempo otra carga horizontal creciente que produce el desplazamiento de la mitad móvil de la caja, causando el corte de la muestra.

Figura 1. Montaje esquemático del equipo de corte directo



Fuente: ASTM D5607-08 "Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force" patina 3

Las cargas aplicadas en la muestra ocasionan una falla a través del plano horizontal de separación entre las cajas portadoras de la muestra. Sobre este plano de falla actúan dos esfuerzos: el esfuerzo normal σ_n aplicado

³ ASTM D5607-08. "Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force"

externamente debido a la carga vertical y el esfuerzo cortante τ debido a la aplicación de la carga horizontal.

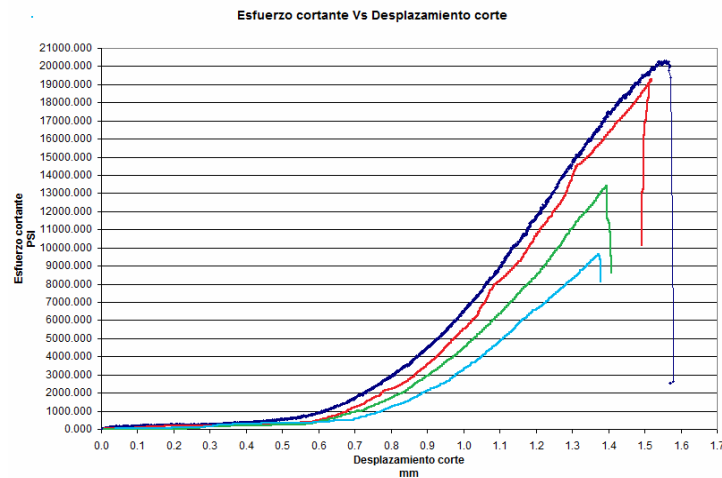
Estos esfuerzos se calculan dividiendo las fuerzas aplicadas a la caja, por las respectivas áreas de la muestra y de esta manera deberían satisfacer la *ecuación de Coulomb*. (ASTM D5607-08)

$$\tau = c + \sigma_n * \tan(\phi) \quad (1)$$

Según la ecuación (1) la resistencia al corte, depende de la *cohesión* C y la *fricción interna de la roca* ϕ .

Al aplicar la fuerza horizontal, se mide el desplazamiento y con estos valores es posible graficar la tensión de corte τ en función del desplazamiento en el plano de la tensión de corte. De la gráfica de tensión de corte contra desplazamiento (*Figura 2*) es posible tomar el punto máximo de tensión de corte como la resistencia al corte de la roca.

Figura 2. Relación esfuerzo de corte contra desplazamiento



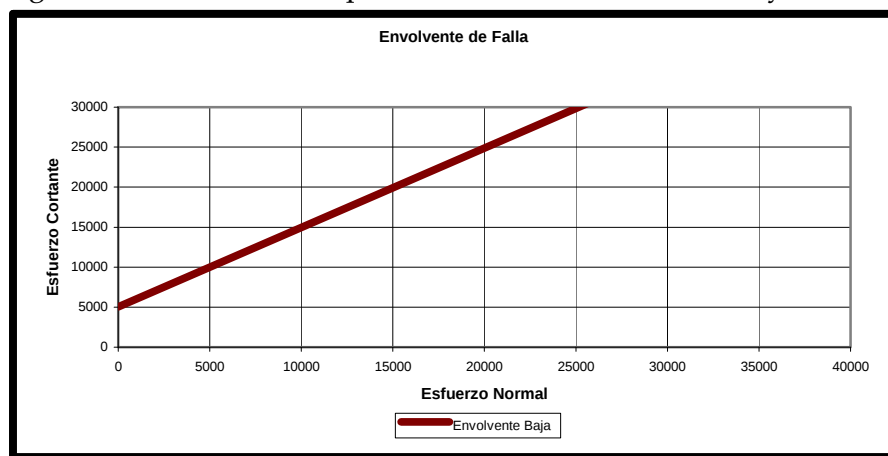
Fuente: ASTM D5607-08 "Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force" página 7

Los valores de τ se llevan a un gráfico (*Figura 3*) en función del esfuerzo normal, obteniendo la recta intrínseca, donde τ va como ordenada y σ_n

como abscisa. El ángulo que forma esta recta con el eje horizontal es el ángulo de fricción interna ϕ y el intercepto con el eje τ la *cohesión* C .

Es de esta manera como el ensayo de corte directo permite conocer la resistencia máxima al corte, relacionar este esfuerzo máximo de corte con el esfuerzo normal aplicado en la prueba y aplicando la relación de Coulomb determinar la *Cohesión* C de la roca y su *ángulo de fricción interna* ϕ

Figura 3. Recta intrínseca que relaciona el esfuerzo normal y cortante.



Fuente: ASTM D5607-08 "Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force" página 7

2.3 MODELO MATEMÁTICO DEL DCDI

Hasta el momento se ha hecho explícito el ensayo de corte directo convencional en rocas, teniendo esto presente, se propone un modelo matemático que aproxime el comportamiento de la roca bajo unas determinadas condiciones de carga.

2.3.1 Características del modelo

Para este modelo propuesto, se asume que el comportamiento de la roca es elástico lineal e isótropo donde todas las propiedades son idénticas en cualquier dirección y la falla de la roca ocurrirá según el criterio de falla de

Mohr-Coulomb. Se utilizó el software *ANSYS* para realizar el modelado y el tipo de elemento utilizado es el *SOLID45*, un elemento 3D utilizado para el modelado estructural, definido por 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo, permitiendo movimientos de translación en las 3 direcciones. Dicho elemento tiene capacidades elásticas, plásticas, creep, swelling, rigidización, como el manejo de las grandes deflexiones y deformaciones. Se plantea de manera inicial, realizar un modelo de compresión uniaxial sobre la roca, con el objeto de determinar la veracidad de las correlaciones en las propiedades de la roca.

Es de esta manera que se plantea un modelo con la siguientes características.

Tabla 1. Características del modelo matemático

Número máximo de nodos	1274
Número máximo de grados de libertad por nodo	2
Número máximo de elementos	1200
Tipo de análisis	0

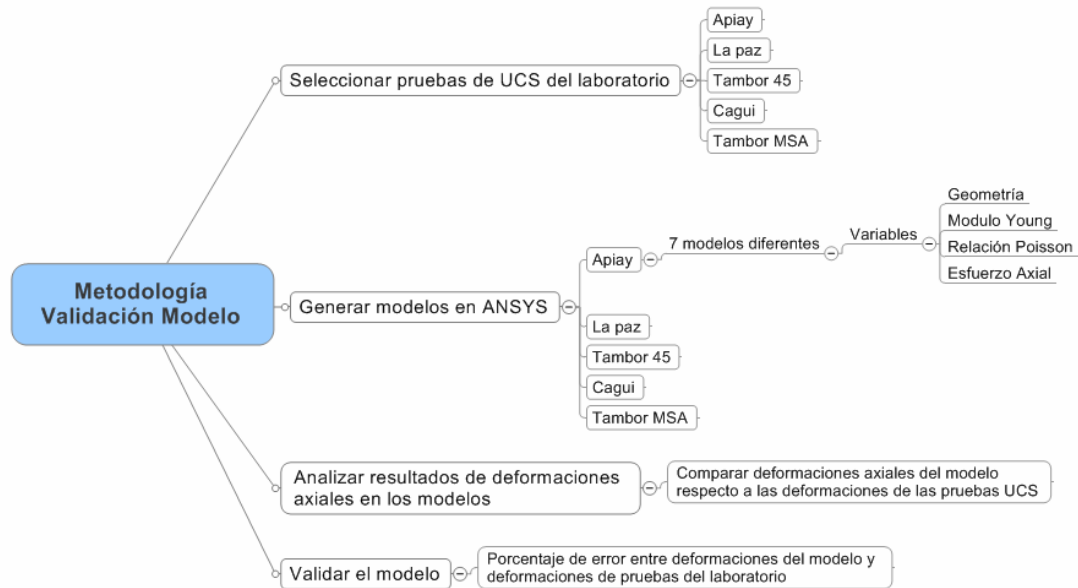
Tabla 2. Características de solución para el modelo matemático

Número de nodos activos	1274
Número de ecuaciones	2548
Número de términos en las ecuaciones	24296
Numero de grados de libertar activos	2496

2.3.2 Metodología para la simulación y validación del modelo matemático

La metodología planteada para llevar a cabo el desarrollo del modelo se puede observar en la y consta de los siguientes pasos:

Figura 4. Metodología para la simulación y validación del modelo



Fuente: los autores

1. Seleccionar pruebas de UCS del laboratorio:

Se recopilan registros de pruebas de resistencia a la compresión no confinada realizadas en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP tomando 5 conjuntos de datos de diferentes formaciones geológicas, se tienen: Apiay, La Paz, Tambor 45, Cagui y Tambor MSA.

2. Generar modelos en ANSYS:

En cada uno de los conjuntos se seleccionan 7 puntos de carga diferentes, donde se conocen las diferentes variables del ensayo. Conocido el esfuerzo axial aplicado en cada punto de carga y la deformación axial del material se calcula el módulo de Young para los puntos específicos de carga. Se realiza un procedimiento similar para calcular la relación de Poisson en estos puntos de carga dividiendo la deformación circunferencial sobre la deformación

axial. Se observa en la tabla 3 el cálculo del módulo de Young y relación de Poisson.

Tabla 3. Tabla de cálculo módulo de Young y relación de Poisson

Deformación Axial	Deformación Circunferencial	Deformación Volumétrica	Axial Displacement m	Esfuerzo Axial	Modulo Young PSI	Modulo Young Pa	Poisson
5.52E-03	-0.000585032	4.35E-03	3.20E-04	2.440E+03	4.42E+05	3.05E+09	1.06E-01
7.63E-03	-0.000895942	5.84E-03	4.42E-04	4.421E+03	5.79E+05	3.99E+09	1.17E-01
8.36E-03	-0.00103507	6.29E-03	4.86E-04	5.260E+03	6.29E+05	4.34E+09	1.24E-01
9.33E-03	-0.001241786	6.85E-03	5.46E-04	6.477E+03	6.94E+05	4.79E+09	1.33E-01
1.04E-02	-0.001521528	7.40E-03	0.61660522	7978.0228	7.64E+05	5.27E+09	1.46E-01
1.11E-02	-0.001717926	7.69E-03	6.55E-04	8.983E+03	8.07E+05	5.56E+09	1.54E-01

Con el módulo de Young, la relación de Poisson y el esfuerzo axial determinados a partir de los datos de las pruebas de laboratorio se asignan estos valores a la simulación del modelo en el software.

3. Análisis de resultados obtenidos en la simulación.

Posterior a la simulación del modelo en ANSYS, se analizan los resultados obtenidos: deformación, desplazamiento, esfuerzos en el eje z y esfuerzos principales. Para validar el modelo se compara la deformación axial simulada contra la de pruebas reales, calculando la desviación estándar el promedio y el porcentaje de error entre los datos simulados y los reales.

Realizadas 35 diferentes simulaciones, en formaciones geológicas con distintas propiedades mecánicas y físicas, se observa en las gráficas 5, 6, 7, 8, 9 la curva de porcentaje de error, las deformaciones reales y las simuladas para las 5 formaciones analizadas.

Figura 5. Porcentaje de error formación Tambor 45

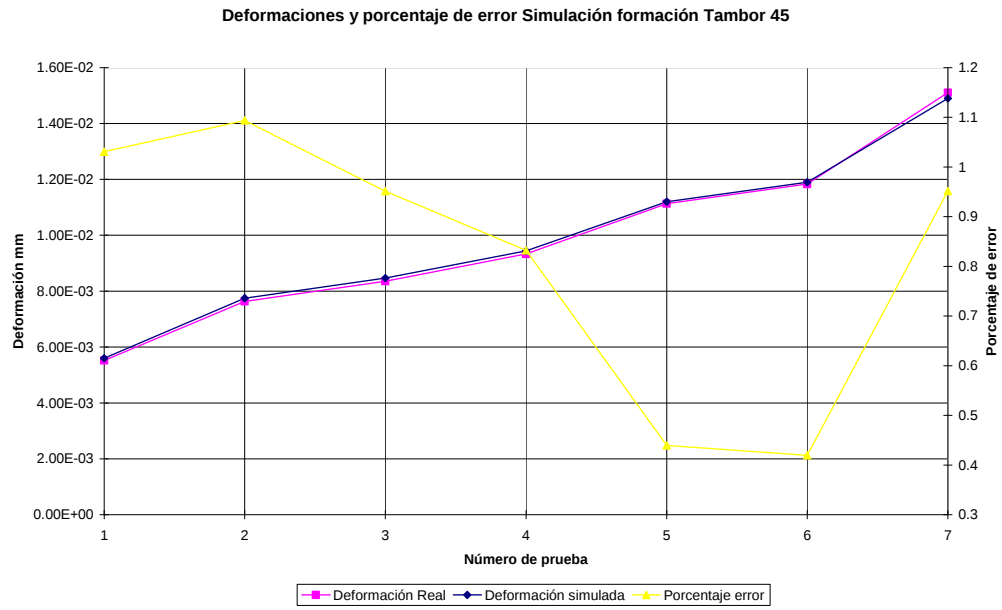


Figura 6. Porcentaje de error formación La Paz

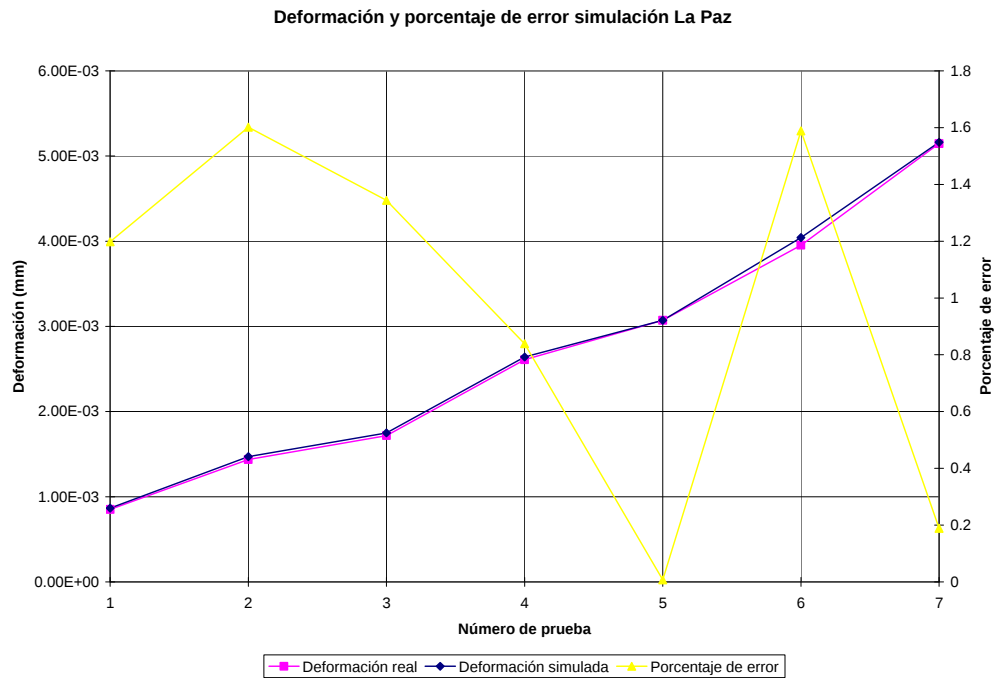
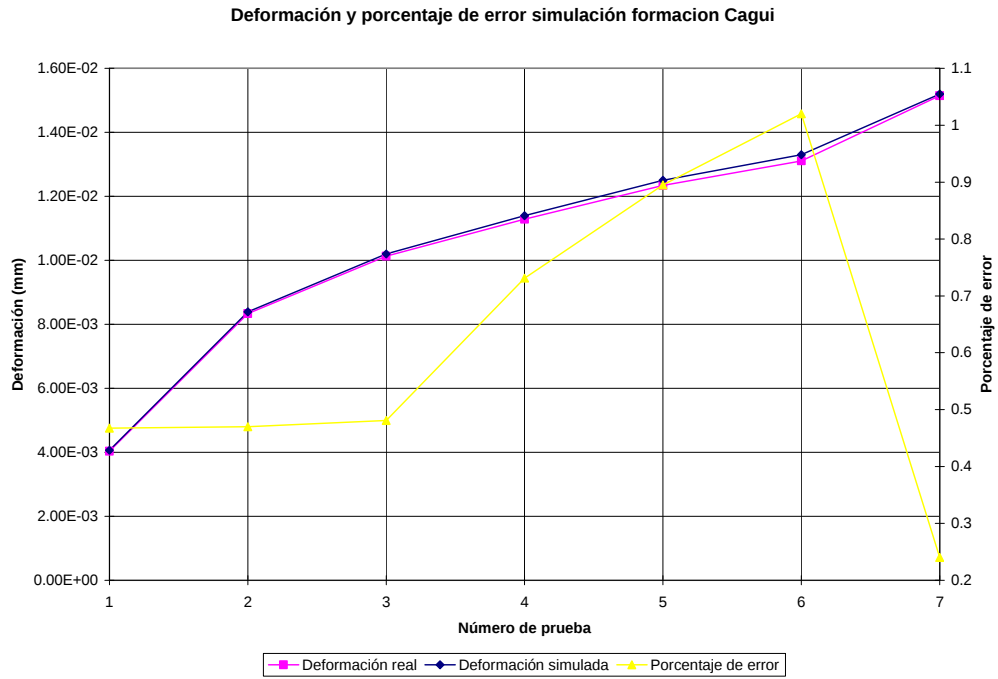
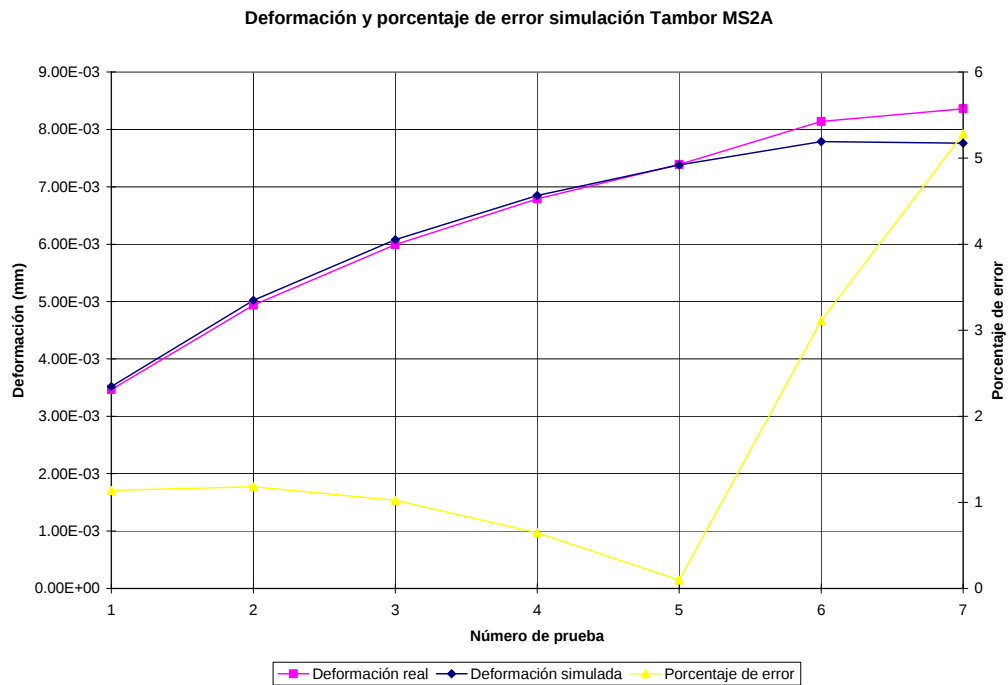


Figura 7. Porcentaje de error formación Cagui



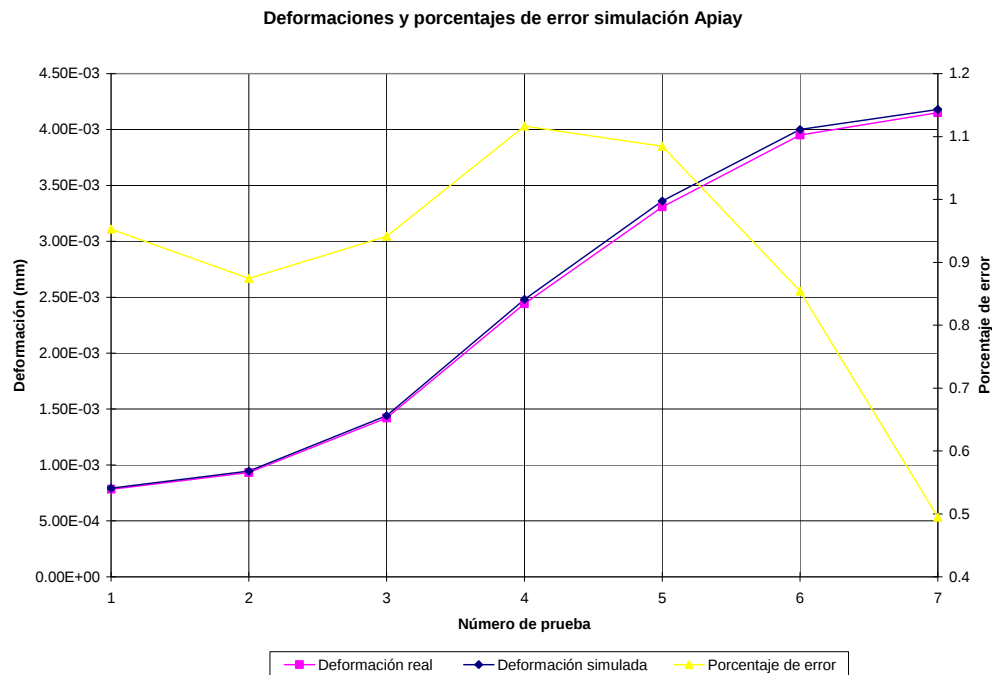
Fuente: los autores

Figura 8. Porcentaje de error formación Tambor MS2A



Fuente: los autores

Figura 9. Porcentaje de error formación Apiay



Fuente: los autores

4. Validar el modelo:

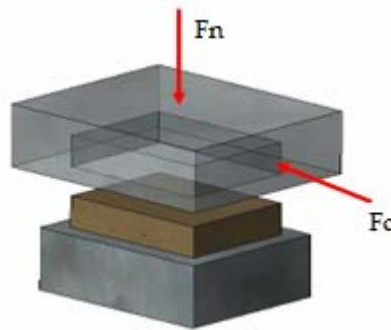
Teniendo en cuenta el modelo matemático planteado y aplicado para el análisis del comportamiento de rocas y observados los resultados de porcentaje de error obtenidos en la simulación, donde el mayor porcentaje de error es 5%, se concluye que éstos se encuentran por debajo de un error admisible para validar el modelo desarrollado, por tanto el modelo matemático planteado para describir el comportamiento de la roca desarrollado con la herramienta software *ANSYS* es válido para las simulaciones futuras de este material.

2.4 MODELO FÍSICO EXPERIMENTAL DEL DCDI

La solución al problema del proyecto, radica en el diseño del DCDI. Se requiere entonces determinar la geometría que permita obtener el corte directo en una muestra de roca de geometría no convencional. Es así como a partir del modelo físico de la prueba normalizada de corte directo, se define el modelo físico experimental del DCDI como una construcción teórica o un montaje con objetos reales que trata de reproducir el comportamiento de algunos aspectos de un sistema físico o mecánico más complejo.

El modelo físico del ensayo de corte directo convencional normalizado por ASTM D5607-08 se observa en la figura 10:

Figura 10. Modelo físico del ensayo de corte directo.



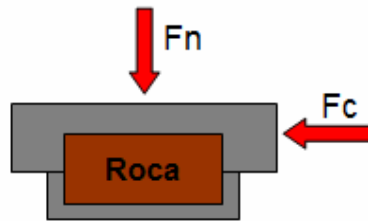
Fuente: los autores

En el ensayo se somete una muestra de roca, de geometría rectangular o circular, a cargas de compresión y corte directo, mediante un par de cajas portadoras, produciendo en la roca un plano determinado de corte. Estas cargas aplicadas a la muestra de roca, generan esfuerzos de compresión y corte, originando una falla por corte directo. Es importante anotar que en el desarrollo de la prueba, la carga normal aplicada en la muestra es constante durante todo el ensayo, es decir, inicialmente se aplica la carga normal y se

mantiene constante para posteriormente aplicar progresivamente la carga de corte.

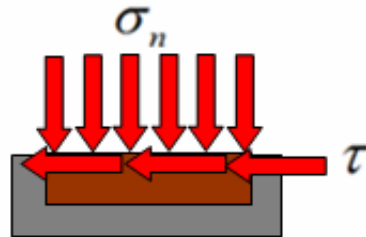
En la figura 11a y 11b se observa la distribución de cargas y esfuerzos en la muestra de roca.

Figura 11a. Cargas en la muestra de roca.



Fuente: los autores

Figura 11b. Esfuerzos en la muestra de roca.



Fuente: los autores

Esta falla por corte directo permite conocer la resistencia máxima o esfuerzo máximo de corte en la muestra de roca.

Para definir el modelo físico del DCDI se desea conservar el concepto de la prueba de corte directo normalizado, generar una falla por corte directo en un plano determinado. También se tiene en cuenta la forma como se aplicarán las cargas en la muestra de roca, la disposición de las mismas y el equipo utilizado para tal efecto.

Para la aplicación de la carga se utilizará el sistema de mecánica de rocas MTS 815 ubicado en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP. El equipo aplica carga axial mediante el desplazamiento de un cilindro hidráulico, a lo largo

del eje longitudinal del mismo. La geometría de la muestra de roca, se define a partir de la necesidad inherente al problema a solucionar, caracterizar formaciones geológicas de las cuales no se puedan extraer muestras de roca con geometría convencional (geometría convencional según ASTM D4543⁴). Haciendo un promedio de las dimensiones obtenidas en rocas de formaciones sensibles, tales como shales y areniscas, se definió una geometría para la muestra de roca a utilizar en el DCDI de 22mm de diámetro y 8mm de alto. Con los requerimientos establecidos para definir el modelo físico del DCDI se muestra en la figura 12a y 12b el modelo físico experimental para el DCDI.

Figura 12a. Modelo físico DCDI vista lateral.



Fuente: los autores

⁴ASTM D 4543. *Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances.*

Figura 12b. Modelo físico DCDI vista isométrica



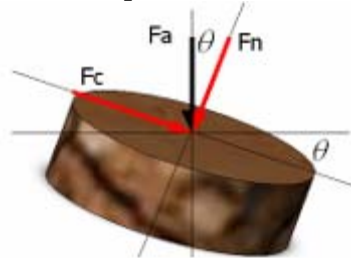
Fuente: los autores

El modelo consta de dos endcap o dispositivos para aplicar carga, estos permiten transmitir a la roca la fuerza axial ejercida por el equipo MTS. La disposición geométrica inclinada y la cavidad para alojar la muestra de roca permiten descomponer la fuerza axial en dos componentes, fuerza normal y fuerza de corte. De igual forma, la fuerza de corte produce un esfuerzo cortante y la fuerza normal un esfuerzo normal.

La fuerza axial se aplica progresivamente, de tal forma que los valores de esfuerzos no son constantes y varían conforme lo hace la fuerza axial aplicada. Es por esto que el ángulo de inclinación del DCDI se convierte en el factor determinante para la definición del modelo físico adecuado que produzca corte directo y mantener así el concepto de la prueba normalizada. En la figura 13a y 13b se observan estas fuerzas y esfuerzos, respectivamente

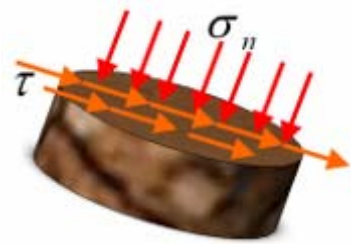
sobre la muestra de roca, donde F_a =Fuerza Axial, F_n =Fuerza normal, F_c =Fuerza cortante, σ_n =Esfuerzo Normal y τ =Esfuerzo cortante.

Figura 13a. Fuerzas aplicadas a la muestra de roca.



Fuente: los autores

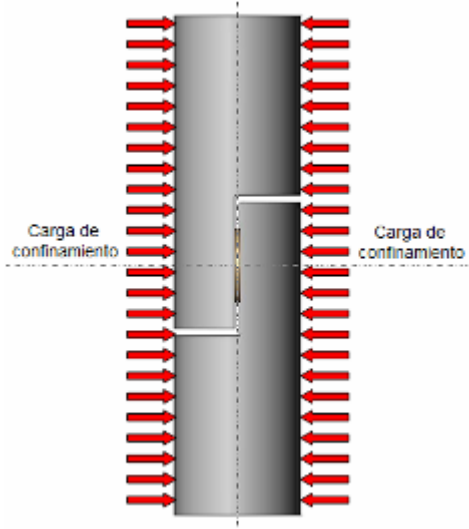
Figura 13b. Esfuerzos generados en la muestra de roca



Fuente: los autores

Cuando el ángulo del dispositivo es igual a 0° o 90° , la fuerza de corte o la fuerza normal se hacen cero respectivamente. Para el caso concreto del modelo físico con un ángulo de 90° , la fuerza normal se hace cero y la fuerza axial se convierte totalmente en la fuerza de corte, por tanto se debe aplicar la fuerza normal mediante otro mecanismo diferente a la fuerza axial ejercida por el MTS. En este caso la carga normal se aplica al confinar los endcap en la cámara del equipo MTS dispuesta para tal fin y así producir la fuerza normal sobre la muestra de roca mediante la presión ejercida por el fluido de confinamiento.

Figura 14. Modelo físico con ángulo de 90°.



Fuente: los autores

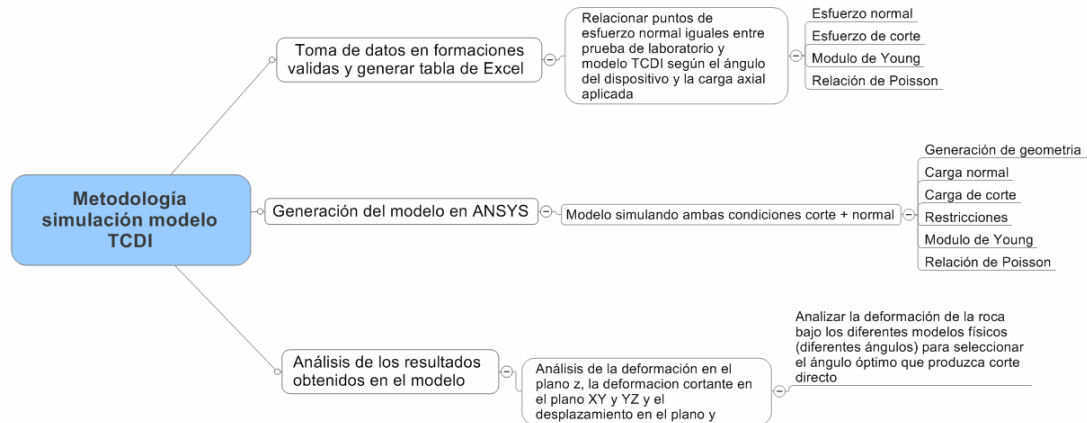
El modelo físico del DCDI conserva el concepto de la prueba normalizada de corte directo, una fuerza normal y una fuerza de corte perpendiculares entre sí, aplicadas a la muestra de roca produciendo en ella un corte directo.

2.4.1 Metodología para simular el modelo físico del DCDI

Conocido el modelo físico del DCDI y su disposición de cargas, se simula para conocer el comportamiento de la muestra de roca sometida a las cargas normales y de corte producidas por el DCDI. En esta ocasión se simularán diferentes ángulos del DCDI, manteniendo el modelo físico experimental y su distribución de cargas en función del ángulo de inclinación. Con esto se busca encontrar el ángulo adecuado para el dispositivo donde la relación esfuerzo normal y de corte, sea tal, que produzca un corte directo en la muestra de roca.

La metodología planteada se puede observar en la figura 15 y consta de los siguientes pasos:

Figura 15. Metodología de simulación del DCDI



Fuente: los autores

1. Toma de datos en formaciones válidas y crear tabla de Excel para manejo de datos.

Se crean diferentes tablas de datos para el manejo de los mismos; se tiene entonces: Tabla de datos de la prueba de laboratorio.

Tabla 4. Tabla de datos de la prueba de laboratorio

Tambor 45				
Modulo Young Pa	Poisson	Esfuerzo Axial Pa	Deformación Axial	
3.05E+09	1.06E-01	1.68E+07	5.52E-03	1
3.99E+09	1.17E-01	3.05E+07	7.63E-03	2
4.34E+09	1.24E-01	3.63E+07	8.36E-03	3
4.79E+09	1.33E-01	4.47E+07	9.33E-03	4
5.56E+09	1.54E-01	6.19E+07	1.11E-02	5
5.83E+09	1.69E-01	6.90E+07	1.18E-02	6
6.03E+09	1.85E-01	7.49E+07	1.24E-02	8
6.10E+09	1.91E-01	7.72E+07	1.27E-02	9
6.24E+09	2.11E-01	8.22E+07	1.32E-02	10
6.42E+09	2.57E-01	9.01E+07	1.40E-02	11
6.44E+09	3.03E-01	9.38E+07	1.46E-02	12
6.39E+09	3.74E-01	9.65E+07	1.51E-02	7

En esta tabla se encuentran el módulo de Young, relación de Poisson, esfuerzo axial y deformación axial, obtenidos de la prueba UCS del laboratorio. Cuenta con 12 puntos de carga diferentes y seleccionados aleatoriamente a lo largo del conjunto de datos totales de la prueba de

laboratorio. Cada punto de carga, con su conjunto de datos respectivos, contiene un número de referencia del 1 al 12 para facilitar la ubicación y relación con otras tablas. Esta tabla organiza los datos a ingresar en el software de simulación; el módulo de Young y la relación de *Poisson*. Los otros dos datos de la tabla, esfuerzo axial y deformación axial, permiten comparar y relacionar los esfuerzos aplicados a la roca en determinado momento de la prueba para seleccionar los mismos puntos de carga axial a aplicarse en la simulación con ANSYS del modelo físico del DCDI.

Tabla de datos modelo DCDI.

Tabla 5. Tabla de datos modelo DCDI

Fa (KN)	Teta (°)	Fn (KN)	Fc (KN)	Esfuerzo n (Pa)	Esfuerzo T (Pa)	Axial Convencional
6.5	15	6.279	1.6823	1.65E+07	4.43E+06	5.519E-03
12	15	11.59	3.1058	3.05E+07	8.17E+06	7.631E-03
14.5	15	14.01	3.7529	3.68E+07	9.87E+06	8.357E-03

Solo axial disco Deform Z	Solo axial disco Desplazamiento Z	Completo axial	Completo corte	Completo corte plano XY	Desplazamiento en Y
5.62E-03	4.48E-05	5.21E-03	7.22E-04	1.11E-03	9.91E-06
7.85E-03	6.26E-05	7.38E-03	1.01E-03	1.58E-03	1.26E-05
8.59E-03	6.85E-05	8.20E-03	1.17E-03	1.77E-03	1.45E-05

Esta tabla permite ingresar y operar matemáticamente los datos relacionados con el modelo físico del DCDI, también permite ingresar los datos obtenidos en las simulaciones con ANSYS para su posterior análisis. Los datos ingresados en la tabla son: Fa (expresada en KN) fuerza axial aplicada por el equipo MTS sobre los endcap del dispositivo.

Presión Conf. (expresado en PSI) es la presión de confinamiento generada en la cámara del equipo MTS que permite generar un esfuerzo normal sobre la muestra de roca en el DCDI de 90° de inclinación.

Teta, (expresado en grados) es el ángulo de inclinación respecto a la horizontal del endcap. Se ingresan los diferentes valores de ángulo para conocer el efecto del mismo sobre las cargas aplicadas con el DCDI.

F_n (expresada en KN) fuerza normal aplicada a la muestra de roca, producto de la descomposición de la fuerza axial en función del ángulo de inclinación del endcap, se tiene la siguiente expresión para F_n :

$$F_n = F_a * \cos \theta \quad (7)$$

F_c (expresada en KN) fuerza de corte aplicada a la muestra de roca, producto de la descomposición de la fuerza axial en función del ángulo de inclinación del endcap, se tiene la siguiente expresión para F_c :

$$F_c = F_a * \sin \theta \quad (8)$$

Esfuerzo n (expresado en pascales) esfuerzo normal aplicado a la muestra función de la fuerza normal, se tiene la siguiente expresión para Esfuerzo n :

$$\sigma_n = F_n / A \quad (9)$$

Donde σ_n es el esfuerzo normal y A el área transversal de la muestra de roca.

Esfuerzo T (expresado en pascales) esfuerzo cortante aplicado a la muestra función de la fuerza cortante, se tiene la siguiente expresión para Esfuerzo T

$$\tau = F_c / A \quad (10)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante y A el área transversal de la muestra de roca. Deformación axial convencional (expresada en metros) es la deformación axial sufrida por la muestra de roca en la prueba de laboratorio.

Solo axial disco defor Z (expresada en metros) en esa casilla se encuentra el valor de la deformación axial, entregado por ANSYS en la simulación de una prueba uniaxial con la geometría no convencional de roca para el DCDI.

Solo axial disco Despla Z (expresada en metros) valor del desplazamiento axial, entregado por ANSYS en la simulación de una prueba uniaxial con la geometría no convencional de roca para el DCDI.

Completo axial (expresada en metros) valor de la deformación en el eje axial, resultado de la simulación del modelo físico del DCDI (deformación por efecto de esfuerzo normal en el modelo físico del DCDI).

Completo corte (expresada en metros) valor de la deformación en el eje de corte (perpendicular al eje axial), resultado de la simulación del modelo físico del DCDI (deformación por efecto del esfuerzo cortante en el modelo físico del DCDI).

Completo corte plano XY (expresada en metros) valor de la deformación en el plano XY, plano que en la simulación corresponde al plano de corte generado por el DCDI (deformación por efecto del esfuerzo normal y el esfuerzo de corte combinados).

Desplazamiento en Y (expresada en metros) valor del desplazamiento de una de las caras de la muestra de roca sobre el eje y, corresponde al eje paralelo al plano de corte, este dato es entregado por la simulación y permite conocer la magnitud del desplazamiento debido a la fuerza de corte.

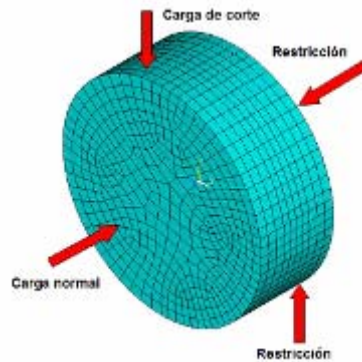
Con las tablas elaboradas se procede a seleccionar 7 puntos de carga y 7 ángulos de inclinación del endcap diferentes. Se selecciona una fuerza axial que ejerza un esfuerzo normal igual al generado en las pruebas UCS de laboratorio, para así, ingresar en la simulación un dato válido de módulo de

Young y relación de Poisson. Con esto se obtienen 7 puntos con los datos necesarios para ingresar en el simulador y conocer el comportamiento de la roca bajo la acción de cargas producidas por el DCDI.

2. Generación del modelo en ANSYS

Conocido el modelo físico del DCDI y la distribución de cargas sobre la muestra de roca se elabora el modelo en el software de simulación ANSYS. Se tienen en cuenta para la simulación los siguientes aspectos y de igual forma se van ingresando en el software: seleccionar las diferentes características y propiedades de ANSYS para la simulación, mencionadas anteriormente, tales como: tipo de elemento, constante de material, tipo de enmallado, análisis elástico lineal isótropo. Posteriormente, se ingresan los datos propios de cada simulación: geometría de la muestra (22mm de diámetro por 8mm de alto), módulo de Young, relación de Poisson, valor de carga normal aplicada en la cara normal de la muestra, valor de carga de corte aplicada en el área media periférica de la muestra, restricción en la cara normal de la muestra opuesta a la cara donde se aplica la carga normal, restricción en la periferia opuesta a donde se aplica la carga de corte. La distribución de cargas y restricciones se pueden observar en las siguientes figuras.

Figura 16. Distribución de cargas en la muestra de roca.



Fuente: los autores

3. Análisis de los resultados obtenidos de la simulación.

En la tabla 5 “modelo DCDI” se ingresan los datos obtenidos de la simulación. Con estos datos es posible analizar los comportamientos de cada uno de los modelos del DCDI simulados, correspondientes a diferentes ángulos de inclinación de los endcap, que para el caso de las simulaciones realizadas se tienen ángulos de 15°, 25°, 35°, 40°, 45° y 50° respectivamente según la tabla 5.

2.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DEL DCDI

La simulación del DCDI, permite conocer el comportamiento de la roca, bajo el efecto de las cargas originadas en el modelo físico del DCDI y de esta manera, analizar la relación del ángulo del DCDI con los esfuerzos generados y encontrar así el ángulo más adecuado que produzca el efecto de corte directo sobre la muestra de roca. Para el análisis del efecto causado por el ángulo de inclinación del endcap se tienen en cuenta algunos aspectos como: el esfuerzo normal, el esfuerzo cortante, la deformación sufrida por efecto del esfuerzo normal y la deformación sufrida por efecto del esfuerzo de corte. Estos factores permiten determinar cuál es el ángulo de inclinación adecuado para el DCDI. De la simulación se observa y concluye que la relación esfuerzo normal contra esfuerzo de corte está directamente relacionada con el ángulo de inclinación del dispositivo, observando que, cuanto menor sea el ángulo de inclinación (15°) la relación esfuerzo normal contra esfuerzo de corte es mayor (3.73), por tanto la tendencia del dispositivo es a producir mayor compresión que corte y cuanto mayor es el ángulo de inclinación (40°) la relación es más baja (1.19). Nótese que para un ángulo de 45° la relación es 1.0 debido a que los esfuerzos son iguales. La relación esfuerzo normal contra

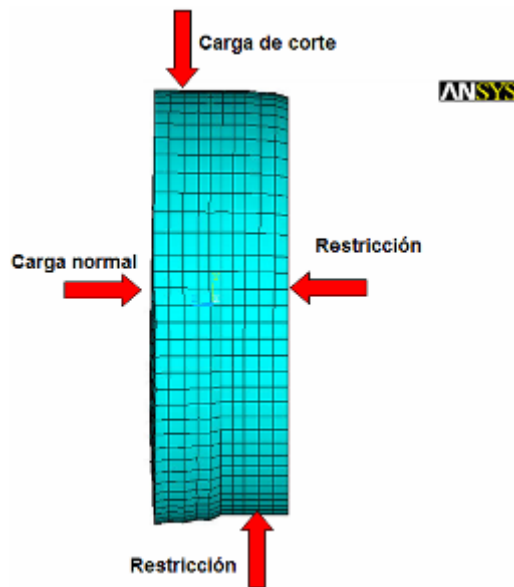
esfuerzo de corte debe ser tal que el esfuerzo normal y el cortante, actuando mutuamente sobre la roca, produzcan un corte directo sobre un plano determinado de la muestra de roca.

2.6 DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO ÓPTIMO PARA EL DCDI

A partir de la simulación realizada en *ANSYS* del DCDI y analizando el comportamiento de la muestra de roca bajo las cargas producidas por el mismo, se puede concluir que:

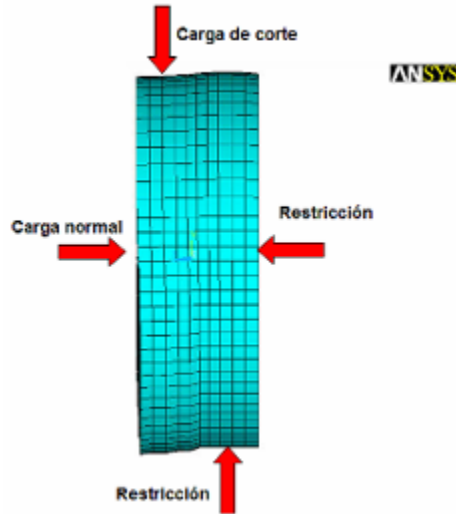
Para ángulos donde $0 < \theta < 35$, la disposición de las cargas tienden a producir una falla por compresión y no por corte directo como se desea en la prueba, este fenómeno no deseado es producto del alto valor (5.67) de la relación esfuerzo normal contra esfuerzo de corte. En las figuras 18a, 18b y 18c se puede observar la tendencia del comportamiento de la muestra de roca para ángulos de 15° , 25° y 35° , donde se observa mas compresión que corte.

Figura 18a. Simulación del DCDI con 15° de inclinación



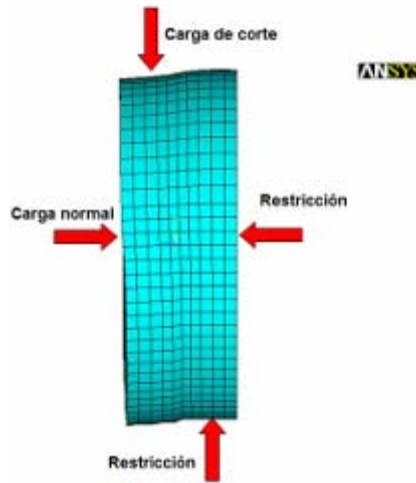
Fuente: Los Autores.

Figura 18b. Simulación del DCDI con 25° de inclinación



Fuente: Los Autores.

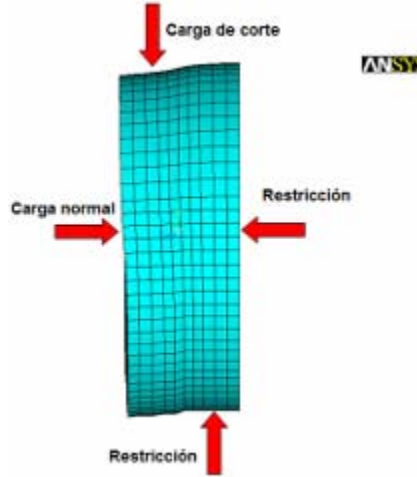
Figura 18c. Simulación del DCDI con 35° de inclinación



Fuente: Los Autores.

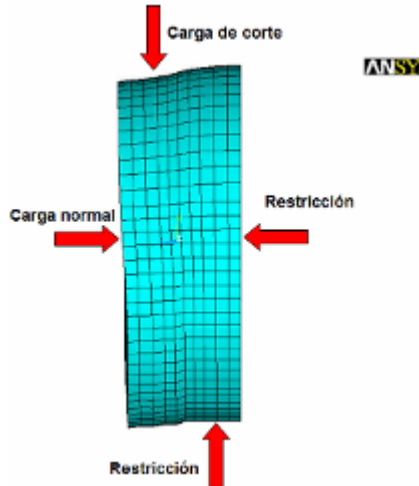
Para ángulos donde $36 < \theta < 45$, la disposición de las cargas tienden a producir falla por corte directo como se desea en la prueba, teniendo como caso particular un ángulo de 45° , donde la relación de esfuerzos es 1 y se esperaría un comportamiento ideal de corte. En las figuras 19a y 19b se puede observar la tendencia del comportamiento de la muestra de roca para ángulos de 40° y 45° .

Figura 19a. Simulación del DCDI con 40° de inclinación



Fuente: Los Autores.

Figura 19b. Simulación del DCDI con 45° de inclinación.

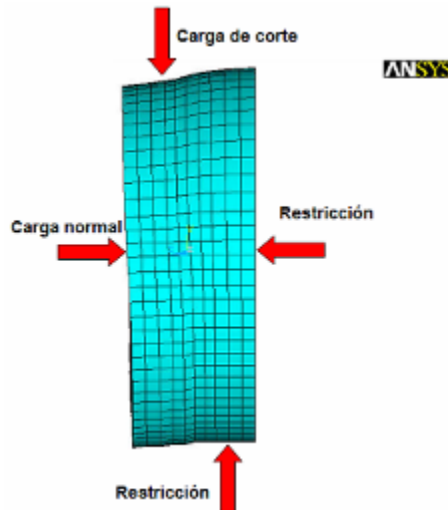


Fuente: Los Autores.

Para ángulos donde $46 < \theta < 89$, la disposición de cargas producen en la muestra, tendencia a corte directo debido a una relación de esfuerzos por debajo de 1, donde el esfuerzo de corte es mayor que el esfuerzo normal. Se descarta la selección de ángulos mayores a 55° , donde la tendencia es netamente a fallar por corte, debido a que la relación esfuerzo normal contra esfuerzo de corte es muy baja (0.18) y por tanto el efecto de la carga normal se

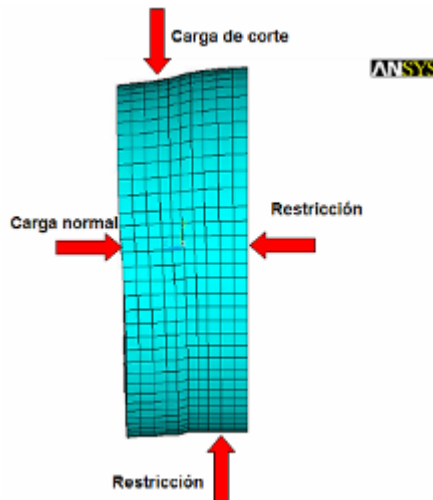
hace nulo, fenómeno no deseado en la prueba. En las figuras 20a y 20b se puede observar la tendencia del comportamiento de la muestra de roca para ángulos de 50° y 55° .

Figura 20a. Simulación del DCDI con 50° de inclinación.



Fuente: Los Autores.

Figura 20b. Simulación del DCDI con 55° de inclinación

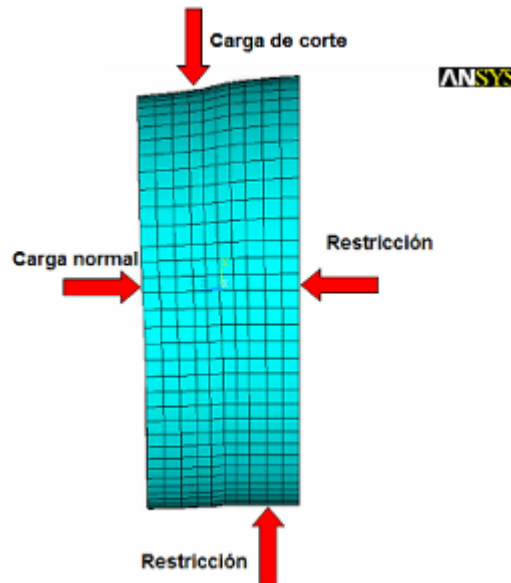


Fuente: Los Autores.

Para el caso particular de 90° , se tiene un comportamiento netamente de corte, donde la carga normal se aplica mediante el confinamiento de los endcap y en función de la magnitud de carga normal aplicada a la muestra de roca, se

obtiene mayor o menor tendencia a falla por corte directo. Con bajos esfuerzos normales (menores a $1e5\text{Pa}$), producto del confinamiento, se obtienen tendencias a falla por corte, pero con un comportamiento torsional en la muestra, debido a la poca resistencia que se tiene por los bajos valores de carga normal. Este fenómeno torsional debe evitarse en la prueba ya que causa alteraciones en los registros y resultados erróneos en las pruebas de corte directo. Si se aplican altos esfuerzos normales (mayores a $1e8\text{Pa}$), se obtiene tendencia a falla por compresión y no por corte directo, fenómeno que se desea evitar. En la figura 21 se puede observar la tendencia del comportamiento de la muestra de roca para el ángulo de 90° .

Figura 21. Simulación del DCDI con 90° de inclinación



Fuente: Los Autores.

No existe un ángulo ideal o concreto, entre 0° y 89° , tal que se obtenga un comportamiento netamente de corte directo. Pero sí existe un rango de ángulos donde se presenta una tendencia de corte directo.

A continuación se puede observar en la tabla 6, en resumen, los valores de desplazamiento para los diferentes ángulos del modelamiento, reflejando estos valores la tendencia del comportamiento de la muestra sometida a las diferentes opciones de ángulo.

Tabla 6. Relación de ángulo de inclinación contra desplazamientos

Ángulo de inclinación (°)	Desplazamiento eje normal (mm)	Desplazamiento eje de corte (mm)
15	0.0115	0.0042
25	0.0124	0.0035
35	0.0110	0.0041
40	0.0100	0.0048
45	0.0085	0.0055
50	0.0075	0.0063
55	0.0088	0.0072
90	0.0073	0.0059

A partir de las conclusiones anteriores, se determinaron dos prototipos de DCDI con ángulos diferentes. El primero con un ángulo de 50°, el cual cumple con los requerimientos de la prueba de corte directo normalizado, produce una falla por corte directo y asegura que el esfuerzo de corte sea mayor al esfuerzo de confinamiento.

Para el segundo prototipo se dispuso un ángulo de 90°, el cual también genera corte directo en la muestra de roca, además este ángulo permite controlar la magnitud del esfuerzo normal aplicado a la muestra y mantenerlo constante durante la prueba. Esta característica se convierte en una ventaja sobre el primer prototipo, ya que al mantener la carga normal constante se conserva el concepto de la prueba de corte directo convencional. Con los ángulos definidos para los dos prototipos del DCDI propuestos, se continúa con el proceso de diseño y dimensionamiento del dispositivo, a partir del modelo físico del mismo y los demás requerimientos de diseño involucrados con el DCDI.

3. DISEÑO MECÁNICO DEL DCDI

3.1 PRELIMINARES

El diseño parte de establecer las condiciones de operación con las cuales va a funcionar y los parámetros bajo los que se va a regir, para de este modo obtener los requerimientos específicos que delimiten los factores de diseño, como se verá en este capítulo.

Definidos los ángulos de inclinación en 50° y 90° , para propiciar el corte directo en la muestra, se estableció el parámetro geométrico principal del diseño del DCDI.

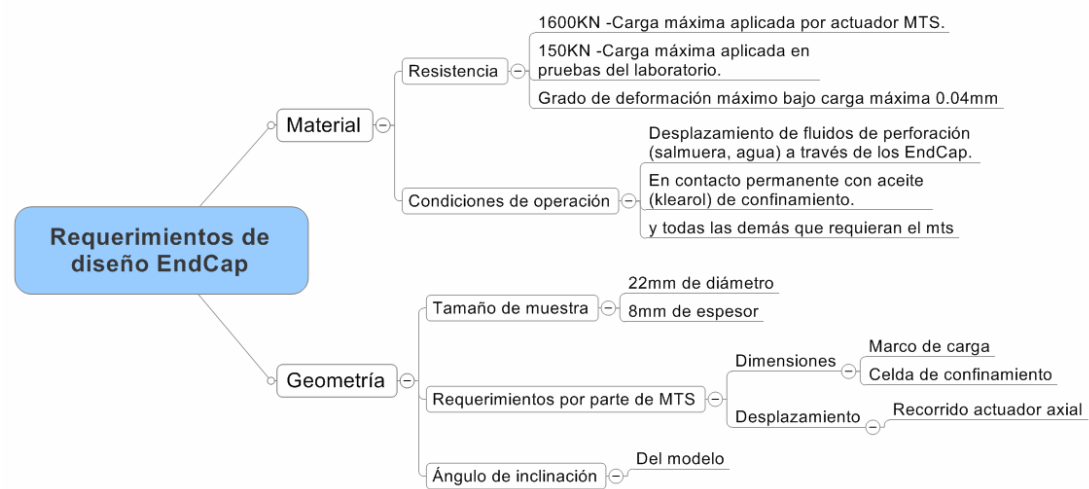
En el diseño del dispositivo se analizaron los factores concernientes la geometría del montaje y al material de los endcap ajustados para las condiciones de operación de la prueba de corte directo en el equipo MTS 815 entre los que se encuentran las cargas y desplazamientos del equipo, la carga y desplazamiento máximo en una roca, el fluído de confinamiento y las dimensiones de la celda de carga.

3.2 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Para el diseño de los dispositivos, se clasifican los requerimientos en dos grandes grupos: respecto al material a utilizar y referentes a la geometría de los dispositivos. Para la selección del material se tienen en cuenta aspectos de resistencia mecánica y condiciones de operación del dispositivo. La geometría encierra necesidades como el tamaño de la muestra a ensayar, requerimientos geométricos del equipo MTS donde se ubicará el dispositivo y el ángulo de

inclinación del dispositivo. A continuación se observa en la figura 22 un cuadro con los detalles de los requerimientos de diseño.

Figura 22. Requerimientos de diseño de los endcap.



Fuente: Los Autores.

3.2.1 Dimensionamiento geométrico

Para el dimensionamiento se tienen tres factores claves: el tamaño de la muestra, los requerimientos de espacio de la celda de la MTS y los ángulos de inclinación.

La geometría de la muestra de roca ya fue establecida como una probeta tipo disco con diámetro de 22mm y una altura de 8mm, cada endcap debe tener una cavidad para alojar la muestra de modo que su eje transversal se conserve paralelo a la inclinación respectiva en los montajes y que por el plano entre los endcap se presente el corte, la forma es cilíndrica y se dimensiona con un diámetro normalizado de 38.1mm (1.5 pulgadas) obteniendo una área de contacto menor a la mitad del área total del endcap y con esto buena distribución de esfuerzos. En la figura 23 se puede observar la

disposición de la muestra de roca respecto al endcap y cómo la cara plana de la muestra debe mantenerse paralela a la cara inclinada del endcap.

Figura 23. Vista frontal del montaje roca y endcap para el DCDI de 50°.



Fuente: Los Autores.

El equipo MTS posee un marco de carga con recorrido de 100mm y una celda de confinamiento para montajes de dimensiones entre 1 y 2 pulgadas de diámetro (tipo normalizado). El rango de altura de los montajes normalizados usados en el equipo para pruebas convencionales oscilan entre 150mm y 210mm, se decidió tomar la menor altura normalizada de 150mm para el DCDI para así tener menos posibilidad de desalineación del montaje que produzca efectos torsionales que afecten el comportamiento de la prueba.

A partir del modelamiento se seleccionaron dos ángulos de inclinación para el diseño del DCDI, 50° y 90° para cada ángulo y modelo físico se realizarán el par de endcap con su configuración respectiva, con la particularidad que tienen igual diámetro exterior e igual altura del montaje completo.

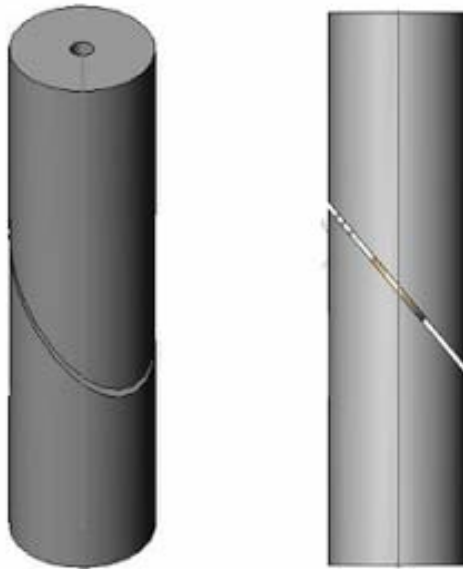
La celda del equipo MTS tiene como accesorios pines de centrado de 6.35mm de diámetro con la posibilidad de ubicarse en la parte superior e inferior, por lo que se diseñó un agujero guía de centrado, pero solo en los endcap inferiores permitiendo la movilidad para efecto de corte por parte de los

endcap superiores, ya que el accionamiento de la carga axial está dado por la parte inferior de la celda. Con el uso del pin inferior se busca ayudar a dar uniformidad y estabilidad en la aplicación de la carga axial.

El diseño se realizó para pares gemelos de endcap que ubicarán la muestra de roca centrada en el eje longitudinal del montaje, paralela a la inclinación y a la mitad de la altura total del montaje. Se definió una separación de 1.5mm entre las caras planas de los endcap para permitir la compactación de la muestra antes de la falla por corte, esto conociendo que el promedio de la máxima deformación obtenida en los ensayos es de 1 mm.

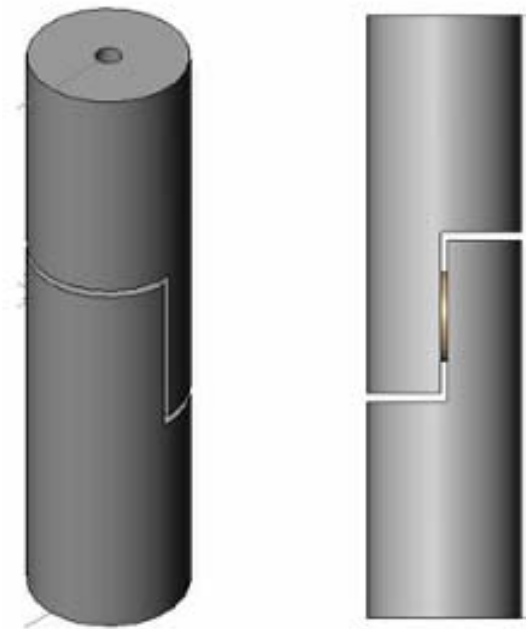
En la figura 24a y 24b se pueden observar los dos montajes del DCDI generados con todas las características establecidas, el de 50° y el de 90° respectivamente.

Figura 24a. Montaje del DCDI de 50°, vista isométrica y vista lateral.



Fuente: Los Autores.

Figura 24b. Montaje del DCDI de 90°, vista isométrica y vista lateral.

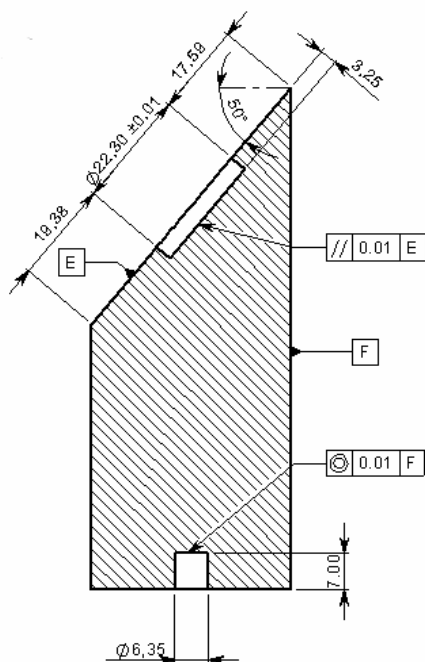


Fuente: Los Autores.

Endcap a 50°

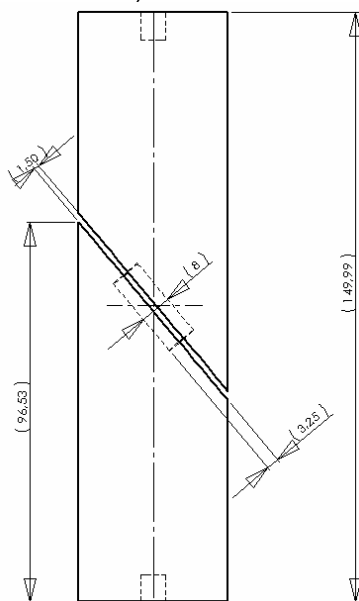
El dimensionamiento del endcap de 50° de inclinación parte de una altura total de 150mm sumando los dos endcap y la separación de 1.5mm entre caras inclinadas. Como resultado de la resta de 0.75mm en la mitad de la altura completa del montaje se encuentra el punto por donde pasará el plano inclinado a 50°, construyendo dicho plano se dimensiona la altura del endcap que queda definida en 96.53 mm. La cavidad para alojar la muestra tiene una profundidad de 3.25 para completar la altura total de 8mm de la muestra con la suma de las dos cavidades y el espaciado entre los endcap, y el centro de la cavidad debe estar en el eje longitudinal del endcap. Se puede observar en la figura 25a las medidas del endcap de 50° y en la figura 25b la disposición del montaje.

Figura 25a. Dimensionamiento geométrico del endcap de 50° vista lateral



Fuente: Los Autores.

Figura 25b. Montaje del DCDI vista lateral.

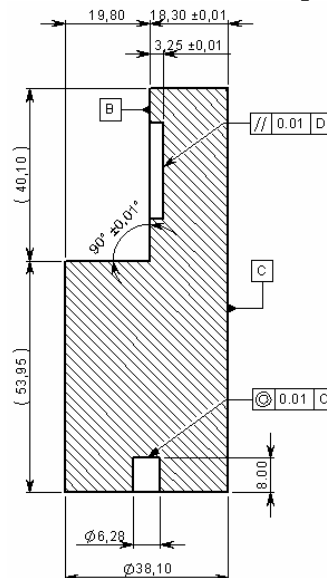


Fuente: Los Autores.

Endcap a 90°.

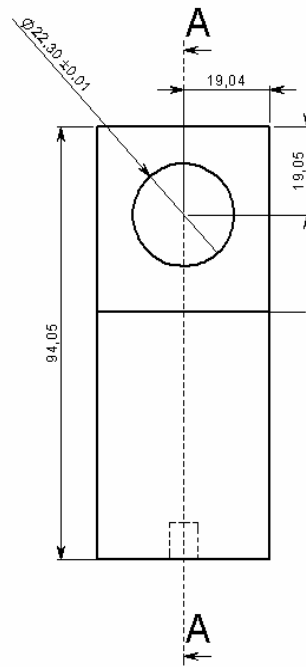
De igual manera que en el par de Endcap de 50°, la posición de la muestra determina las alturas para el dimensionamiento del endcap de 90°. Para este montaje se determinan distancias diferentes de espaciamiento de corte y compresión, el diseño lo permite por tener un plano para cada efecto. La distancia de espaciamiento entre las caras de los endcap en el montaje por efecto de compresión se mantiene en 1.5mm y la de corte aumenta a 2mm debido que el endcap pareja hace de tope de recorrido. Con estas condiciones establecidas se calcula la altura total del endcap en 94.05 mm. La cavidad de la muestra se ubica de tal modo que la cota entre el centro de la misma y el diámetro exterior sea equidistante. El espesor del endcap en la parte de contacto con la roca es de 18.3mm luego de descontar la distancia de separación para la compresión. En la figura 26a se puede observar la vista lateral del endcap de 90°, en la figura 26b se observa la vista frontal y finalmente en la figura 26c el montaje del DCDI para ángulo de 90°.

Figura 26a. Dimensionamiento endcap 90° vista lateral.



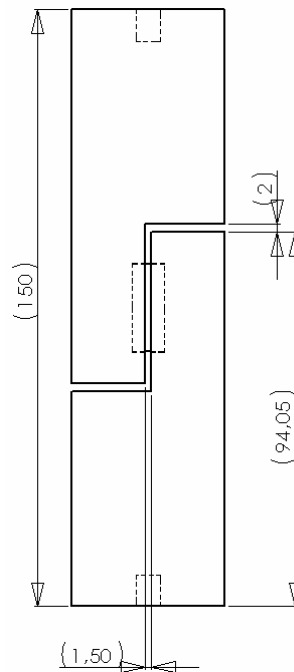
Fuente: Los Autores.

Figura 26b. Dimensionamiento endcap 90° vista frontal.



Fuente: Los Autores.

Figura 26c. Montaje DCDI para 90°.



Fuente: Los Autores.

Los planos generales correspondientes al dimensionamiento geométrico de los dos pares de endcap para el DCDI de 90° y 50° se pueden ver en el anexo A.

3.2.2 Selección del material

Los factores principales para la selección del material son la resistencia mecánica a la carga aplicada por el MTS y el ambiente de operación del dispositivo.

El material debe tener alta resistencia mecánica para cumplir la transferencia total de las cargas a la muestra de roca sin presentar deformación mayor al 1% de la deformación de la roca, de tal manera que las lecturas de desplazamiento del montaje sean las mismas de la muestra. También debe resistir el ambiente corrosivo del aceite mineral el cual estará en permanente contacto con los endcap.

Para determinar el valor de resistencia mecánica se utilizó la máxima carga empleada en pruebas en el laboratorio de mecánica de rocas, 150 KN, para aplicación de esfuerzos del orden de los 19000psi con un endcap normalizado. La carga límite que el equipo MTS 815 puede ejercer es 1600KN pero ninguna prueba á requerido sobrepasar el 10% de ésta. Como resultado del modelamiento del DCDI de 50°, se espera alcanzar la falla de la roca alrededor de los 65KN, siendo esta carga menor a la seleccionada para el diseño mecánico y selección del material.

Los endcap tienen un diámetro normalizado de 1.5 pulgadas ya estipulado por el dimensionamiento geométrico, con el cual se calculó el área en 0.001140 metros cuadrados.

Teniendo en cuenta que las formaciones a caracterizar bajo la técnica de corte directo no presentan muy alta resistencia mecánica el factor de seguridad (N) para los cálculos es de 2.

El análisis se hace solo por resistencia mecánica desestimando pandeo del montaje, debido a las características propias del mismo, el cual hace que la roca reciba toda la carga transmitida por los endcap hasta fallar.

Cálculo de los esfuerzos en el montaje

Con la ecuación fundamental de esfuerzos se calcula el esfuerzo máximo a soportar el montaje.

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{150000}{1,140E-3} = 131,6MPa \quad (11)$$

Donde P es la carga en KN y A es el área en m²

Conociendo el esfuerzo crítico de trabajo y el factor de seguridad igual a 2, se calcula el esfuerzo S_y del material a seleccionarse.

$$S_y = \sigma \times N = 263,2MPa = 38173psi \quad (12)$$

A partir del ambiente presente en las pruebas se definen las propiedades químicas del material. El contacto con fluídos induce corrosión y como el confinamiento se realiza con *klearol* que es un aceite mineral, se debe optar por un material inoxidable. Además el material inoxidable asegura condiciones de interacción química nula entre el material y la muestra de roca a ensayar.

Conocidas las condiciones de carga y tipo de material, se selecciona el acero inoxidable AISI 304 el cual cumple con los requerimientos de carga y de operación en el ambiente determinado. Se observa en la tabla 7, propiedades mecánicas y la composición química del acero AISI 304.

Tabla 7. Propiedades mecánicas y composición química acero AISI 304.

304			
Propiedades Mecánicas		Propiedades Físicas	
Resistencia a la tensión:	87.000 psi	Densidad:	290 lb / in ³
Límite elástico:	39.000 psi	Resistencia eléctrica:	433 ohm - CMF
Alargamiento:	56 %	Temp. de trabajo:	870°C
Reducción de áreas:	70%	Coef. de exp.:	0-200°F 9.6 x 10 ⁻⁶
Dureza Brinell:	135	Coef. de exp.:	0-1.000°F 11.8 x 10 ⁻⁶
Resistencia de impacto:	85 ft - lb	Conducción térmica:	200°F 9.40
Límite de endurecimiento:	35.000 psi	Conducción térmica:	500°F 12.40
Composición química:		Btu. en °F / pie cuadrado / hora	
Ni 9.25	Cr 19.00	Metal fundente para soldadura	
C 0.08 max		Varillas: E 308	
Mn 2.00 max	Si 1.00 max	Mig / Tig: ER 308	
P 0.045 max S 0.030 max			

Fuente: Catálogo comercial Compañía General de Aceros.

En conclusión el DCDI tendrá unas dimensiones de 150mm de altura, 38.1mm de diámetro, inclinación de 50° y 90° en el plano de corte en sus respectivos montajes, una muestra de roca de 22mm de diámetro y 8mm de altura ubicada en el centro geométrico del montaje y paralela al plano de corte. Empleando *SolidWorks* se generaron los planos con las tolerancias establecidas en centésimas de milímetro para las superficies principales de contacto, las referencias de orientación (planitud y perpendicularidad en las

caras de contacto con la probeta y en las bases de contacto con el equipo) y de posición de la cavidad de la muestra para tener la información completa y construir los endcap.

3.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Finalizado el diseño se procede a la construcción, para la cual se hace necesario utilizar máquinas-herramientas de gran precisión que en este caso es un aspecto fundamental debido al pequeño tamaño de las muestras. El mecanizado se realizó mediante un equipo de control numérico computarizado (CNC) el cual se programó por lo establecido en los planos entregados.

Como resultado se obtuvieron piezas con las siguientes dimensiones finales: cavidades de 22.4mm de diámetro y profundidad de 3.15mm, las alturas generales de los endcap no presentan variación con las estipuladas en los planos. Por la diferencia de 0.1mm en la profundidad de la cavidad se deberá disminuir la altura en igual proporción de manera que se mantenga alineado el montaje. La planitud y perpendicularidad requeridas corresponden a lo acordado. Para constatar la alineación y planitud del montaje completo se prepararon muestras en madera con las dimensiones propias del diseño, al final se aceptaron las piezas construidas y se pusieron a disposición para realizar las pruebas preliminares.

Los endcap construidos y la disposición de los montajes se aprecian en las figuras a continuación.

Figura 27. Vista frontal y lateral del endcap de 50° .



Fuente: Los Autores.

Figura 28. Disposición del montaje a 50°



Fuente: Los Autores.

Figura 29. Vista frontal y lateral del endcap de 90°.



Fuente: Los Autores.

Figura 30. Disposición del montaje de 90°



Fuente: Los Autores.

4. DISEÑO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL Y PROTOCOLOS DE ENSAYO

4.1 PRELIMINARES

Dentro de los objetivos de esta tesis de grado se encuentra el diseño del montaje experimental para la técnica de corte directo inclinado y la definición de los protocolos de ensayo de la misma. El cumplimiento de estos dos objetivos permitirá contar con una técnica de ensayo experimental y así emplear el DCDI diseñado y construido para finalmente cumplir el objetivo de esta tesis, caracterizar formaciones geológicas sensibles mediante una técnica de ensayo no convencional.

El diseño del montaje experimental incluye, la preparación de las muestras de geometría no convencional, la extracción, el corte y el pulido de la muestra, el procedimiento necesario para configurar el DCDI de manera tal que permita realizar pruebas de corte directo inclinado, la selección y ubicación de los instrumentos de medición necesarios para el registro de las variables presentes en el ensayo.

Una vez conocido el montaje experimental, es de vital importancia contar con un procedimiento para efectuar la prueba de corte directo inclinado, por eso se define el protocolo de la prueba, el cual incluye todos los pasos y parámetros necesarios para desarrollar la prueba tales como: el tipo de control ejercido por el equipo MTS 815 y la configuración del mismo para controlar la prueba, el registro de los parámetros medibles dentro del ensayo y el posterior análisis a los datos obtenidos en la prueba.

4.2 DISEÑO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Un montaje experimental o *setup* se define como un conjunto de elementos, la forma como éstos se ubican y la función que cumplen para dar lugar a un aparato o equipo diseñado para un propósito específico. Es así como en este capítulo se muestra el diseño del montaje experimental para la Técnica de Corte Directo Inclínada (TCDI). El montaje experimental incluye todos los aspectos necesarios para describir la preparación de las muestras a ensayar, el procedimiento de armado y desarme del DCDI, la disposición de elementos externos al DCDI, entre otros.

4.2.1 Preparación de muestras

El montaje experimental inicia en la preparación de las muestras de roca a ser evaluadas, para lo cual se dispone un procedimiento que cubra de manera estándar todos los factores relacionados permitiendo obtener muestras con las características geométricas requeridas en los ensayos.

La preparación de la muestra se puede enmarcar en tres operaciones básicas: la extracción, el corte y el pulido.

Extracción

Para la extracción se cuenta con el apoyo del área de corte del Instituto Colombiano del Petróleo donde mediante equipos y procedimientos especializados se hace la extracción de los plug o probetas de corazones o muestras de gran tamaño de formaciones perforadas. Para los ensayos del DCDI se determinó que el equipo de mejor disposición para el corte de las muestras es el Core Test, el cual es una adaptación de un sistema neumático de avance de perforación en una fresadora industrial; el sistema neumático provee un buen control de avance que permite que se minimicen marcas o rayones en la superficie de la roca.

Figura 31. Equipo de extracción de muestras Core Test, Área de corte ICP



Fuente: Los Autores.

El equipo tiene un control de velocidades de giro del eje de la broca hasta 3600rpm, una potencia de 1.5KW, un sistema para refrigeración y lubricación del corte que puede utilizar agua, aceite o nitrógeno líquido según el caso.

El equipo está provisto de una base en forma de V para realizar la extracción en corazones de roca (cilindros de roca de 3.5 pulgadas de diámetro y altura aproximada de 30 pulgadas), la sujeción de los cilindros también es neumática mediante pistones que encajan en ranuras de la base de la mesa de la fresadora. Para cumplir el objetivo de extraer probetas en muestras de tamaño inferior a los corazones normales se cuenta con una prensa de tornillo manual que sujeta muestras más pequeñas que los corazones y de otras geometrías, pero el procedimiento no cambia.

Figura 32. Base en V del Core Test, Área de corte del ICP



Fuente: Los Autores.

Las probetas se extraen con brocas diamantadas huecas de diámetro interno igual al diámetro final de la muestra a estudiar, para el DCDI se requiere una broca diamantada de 22mm de diámetro interno. Para la selección o diseño de la broca de extracción se contemplaron varias empresas fabricantes de este tipo de herramientas, entre otras tenemos, Diamont Cuts, CoreTest Systems y PRODIAMCO. Se revisaron los diferentes catálogos de las empresas y ninguna cuenta con brocas de 22mm de diámetro. Por tanto se debe realizar el diseño de la broca para su posterior fabricación. El diseño solo pasa por el dimensionamiento geométrico ya que el material debe ser el mismo que el usado en las otras brocas para perforación de roca. Se tomaron como referencia las dimensiones de las brocas del área de corte con las que se realizan extracciones de tamaño normalizado, para mantener la forma y características de este tipo de brocas, como se aprecia en la figura 33.

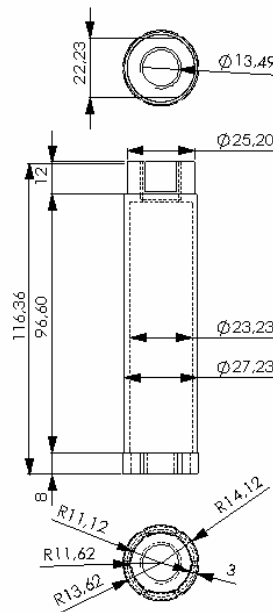
Figura 33. Diseño de broca hueca diamantada para extracción de probetas



Fuente: Los Autores.

La sección roscada de acople con el adaptador de la fresadora debe conservar las mismas características y dimensiones de área de contacto, es una rosca de 11 hilos por pulgada ordinaria y diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada. El diseño se hizo con un diámetro interno de la sección diamantada de 22mm con espesor de 3mm y la profundidad máxima de corte de 5 pulgadas (como se observa en la figura 34), con lo cual se obtendrían probetas de 4.5 pulgadas de altura máxima. El plano del diseño se puede ver en el anexo D.

Figura 34. Planos de la broca diamantada de 22mm



Fuente: Los Autores.

El diámetro de la probeta extraída debe tener una tolerancia de 0.3mm respecto del diámetro de la cavidad del endcap para que el área de contacto entre las secciones laterales de la roca y las cavidades se ajuste como lo establecido en el modelo físico generado en el proyecto.

Construida la broca (Figura 35) se confirmaron todas las dimensiones respecto del diseño establecido y se determina el desarrollo de pruebas para corroborar la alineación, calidad del corte y diámetro final del corte. Las pruebas se realizarían bajo los procedimientos técnicos establecidos en el área de corte.

Figura 35. Broca diamantada de 22mm de diámetro interno.



Fuente: Los Autores.

La muestra de prueba de la broca era de la formación Tambor pero sin ninguna referencia petrofísica. La muestra tenía 8 pulgadas de longitud y 2.5 pulgadas de diámetro, para una máxima perforación transversal de $2 \frac{3}{8}$. La prueba inicia verificando el acople al eje y la alineación para no comprometer la integridad del equipo. Se realizaron tres cortes (Figura 36) a diferentes condiciones de velocidad de giro y velocidad de penetración; en la

refrigeración y lubricación se utilizó salmuera, los resultados se observan en la tabla 8 a continuación.

Figura 36. Extracciones de prueba 1, 2 y 3



Fuente: Los Autores.

Tabla 8. Resultados de la prueba de la broca diamantada

Extracción	Velocidad de giro (rpm)	Velocidad de penetración (pulgadas/s)	Diámetro de probeta (mm)
1	1800	0.011	21.58
2	2020	0.052	21.67
3	2800	0.018	21.63

Fuente: Los Autores.

Como conclusión se establece una velocidad de giro de 2020rpm y una velocidad de penetración de 0.05 pulgadas/s para la extracción de las probetas de prueba de la formación Tambor por el buen acabado superficial y diámetro acorde a lo esperado. Las velocidades cambian según la granulometría de la roca para garantizar un corte óptimo. Conociendo el diámetro de las cavidades construidas y el diámetro de la muestra extraída se calcula la holgura total del montaje de la roca en 0.73mm, superando en 0.2 el máximo esperado, lo que conlleva a hacer más riguroso el montaje de la prueba para coincidir con el modelo establecido.

Corte

Luego de hacer la perforación y obtenido la probeta, se lleva la probeta al laboratorio de mecánica de rocas para ajustarla a la altura indicada. El corte de la probeta se hace transversalmente para obtener una altura cercana a la final que se desea, pero no es la operación final debido a que la sierra no da un buen acabado superficial, ni la planitud adecuadas y es indispensable tener superficies planas en la roca para garantizar la distribución de esfuerzos requerida en la prueba. El equipo empleado es una cortadora de disco de rubí (Figura 37) que gira a 2750rpm, la lubricación puede ser con agua o aceite según la muestra y se opera manualmente, el corte se realiza bajo lo estipulado en el procedimiento técnico de operación del laboratorio de mecánica de rocas.

Figura 37. Cortadora de disco de Rubí DU-200 L



Fuente: Los Autores.

Por la geometría de las probetas se propone una adaptación con un cilindro metálico de 1 pulgada para aumentar el largo y obtener los discos para las pruebas, tal como se ve en la figura 38, empleando una chaqueta termoencogible para unir los dos elementos.

Figura 38. Adaptación para corte de las probetas de 22mm



Fuente: Los Autores.

El corte se realizó a baja velocidad de desplazamiento del disco de corte para tener superficies de poca irregularidad y para cortes de 9mm aproximadamente.

Pulido

La última operación es el pulido de las caras del disco, con el que se busca dar un buen acabado superficial y garantizar la planitud de las caras inferior y superior de las muestras. Para el pulido se utiliza el equipo CoreTest EFG-450, que posee un disco de desbaste para acabado superficial que gira a 1800 rpm y permite ajustar probetas de diámetros entre 1 y 2.5 pulgadas, por lo cual se debe hacer una adaptación para el pulido de los discos de 22mm. Debido a este paso adicional en el procedimiento en la preparación de muestras se determinó hacer los cortes de tal manera que la altura fuera

cercana a los 8mm finales y hacer el pulido manualmente con lija de grano fino

Figura 39. Pulidora



Fuente: Los Autores.

El pulido se hace hasta $7.8 \pm 0.05\text{mm}$ y planitud $\pm 0.05\text{mm}$, para la medición de la planitud se utiliza un comparador de caras tipo reloj marca Mitutoyo (Figura 40) que hace registros en centésimas de milímetro

Figura 40. Comparador de caras Mitutoyo



Fuente: Los Autores.

Preparadas las muestras tipo disco con las especificaciones geométricas respectivas, se catalogan con nombre de la formación, referencia propia de la muestra, medidas del diámetro y altura promedio en el formato del laboratorio.

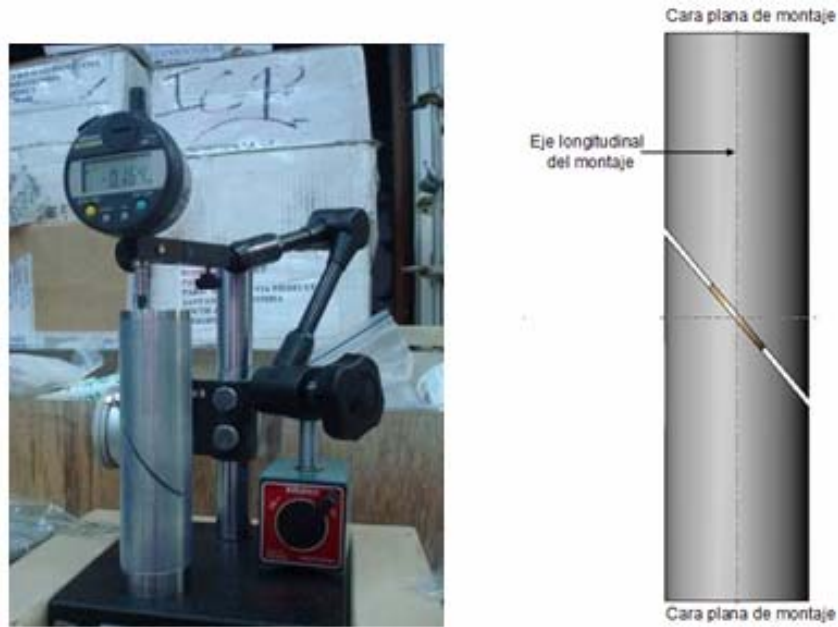
4.2.2 Procedimiento para el montaje y desmontaje experimental del DCDI

Una vez conocido el procedimiento para obtener muestras no convencionales y contar con las mismas, se procede a armar el conjunto del DCDI para realizar pruebas. Este conjunto de elementos incluyen los dos endcap propios del dispositivo, la muestra a ensayar y una chaqueta o manga de plástico termoencogible (*Heat shrink tubing*) que recubre el montaje para brindarle ajuste y mantener la alineación.

El conjunto de elementos debe armarse cumpliendo los siguientes requisitos para obtener resultados confiables en la prueba, se tienen entonces:

Los dos endcap en conjunto deben mantener una alineación sobre el eje longitudinal del montaje tal que el desfase de paralelismo entre las caras planas de los mismos no sea mayor a 0.05mm, ésto asegura una distribución correcta de las cargas sobre la muestra. Para medir el paralelismo, se utiliza un comparador de carátula ubicado sobre una superficie completamente plana. En la figura 41 se observa el eje longitudinal del montaje y las caras planas del mismo.

Figura 41. Comparador de carátula y montaje del DCDI.



Fuente: Los Autores.

Las caras planas de la muestra de roca deben quedar coincidiendo en pleno contacto y paralelas a las superficies planas de las cavidades de los endcap. Esto, al igual que en el requerimiento anterior, asegura una correcta descomposición y distribución de cargas sobre la muestra de roca. Para verificar este requerimiento, se mide de igual forma el paralelismo entre caras del montaje de los endcap.

Procedimiento para el montaje y desmontaje experimental del DCDI 50°

Se debe hacer claridad en la diferencia entre el protocolo de la prueba de corte directo inclinado y el procedimiento para el montaje y desmontaje experimental del DCDI. El primero hace referencia a la secuencia de pasos a desarrollar durante la prueba, mientras el segundo hace referencia a la secuencia de pasos necesarios para adecuar el DCDI antes de iniciar la prueba.

A continuación se muestra el procedimiento a seguir para el montaje del DCDI de 50° antes de iniciar la prueba.

1. Registro de la muestra de roca: después de extraer, cortar y pulir la muestra de roca a ensayar, se hace un registro de la misma. En la tabla 9 se observan los parámetros característicos de la roca a registrar.

Tabla 9. Formato para el registro de muestras

	#	mm		#	mm
Altura	1	7	Diametro	1	21.55
	2	7		2	21.55
	3	7.05		3	21.56
	4	7.06			21.5533
	5	7.05			
	6	7.05			
		7.035			
	#	mm		#	mm
Planitud muestra	1	0.04	Planitud montaje	1	0.015
	2	-0.02		2	0.016
	3	-0.01		3	0.016
	4	-0.01		4	0.016
				5	0.024
				6	0.027
				7	0.029
				8	0.027

Fuente: Los Autores.

Se mide la altura de la muestra en 6 puntos diferentes, ubicados cada uno a 60°. Esta medida se realiza con un calibrador registrando cada una de las lecturas en las casillas correspondientes de la tabla. . La altura promedio de la muestra debe tener una tolerancia de $\pm 0.025\text{mm}$ entre diferentes muestras a ensayar. Similar a la lectura de la altura se realiza la medición del

diámetro, difieren porque la medida del diámetro se efectúa solo en 3 puntos, separados entre ellos 60°. La tolerancia de diámetro promedio entre muestras es de $\pm 0.025\text{mm}$. Se puede observar en la figura 42 cómo se mide el diámetro de la muestra con el calibrador.

Figura 42. Medida del diámetro de la muestra en los 3 diferentes puntos



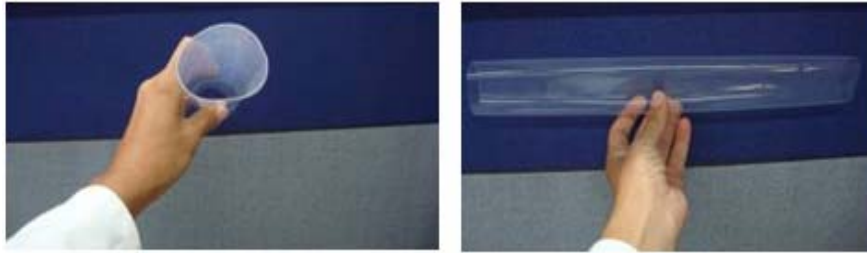
Fuente: Los Autores.

Por último se mide el paralelismo entre caras. Esta medida se realiza con un micrómetro y un comparador de carátula. En la figura 40 se puede observar la disposición de los elementos para realizar la medida. El valor máximo permisible para asegurar un paralelismo entre caras es de 0.05mm según la norma internacional ASTM D4543 aplicada en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP.

2. Reducción de chaqueta termoencogible: para cumplir con los requerimientos de montaje del DCDI, alineación entre los elementos del mismo, se utiliza una chaqueta plástica de forma cilíndrica la cual reduce su diámetro al aplicarle una corriente de aire caliente de 150° centígrados aproximadamente. La chaqueta termoencogible tiene un diámetro inicial de

2", antes de aplicarle calor para reducir su diámetro y una longitud de 2m. En la figura 43 se observa la chaqueta termoencogible antes de reducir su diámetro.

Figura 43. Vista de perfil y lateral de la chaqueta termoencogible.



Fuente: Los Autores.

Se cortan 11cm de largo de la chaqueta e introducen en un tubo de diámetro mayor a 38.1mm, aplicando un flujo de aire caliente a lo largo de la misma, se reduce su diámetro hasta 38.1mm para permitir posteriormente ingresarla en el montaje de los endcap y la muestra de roca.

3. Ubicación de la muestra de roca: para ubicar la muestra de roca en los endcap se debe inicialmente ubicar el endcap superior (endcap que no posee agujero en la cara plana y que se ubica en la parte superior del montaje del DCDI) de forma vertical, apoyado sobre su cara plana, posteriormente, colocar la muestra de roca en la cavidad del endcap asegurando un contacto pleno entre la cara plana de la muestra y la cara plana de la cavidad. En la figura 44 se puede observar el endcap superior con la muestra de roca.

Figura 44. Disposición del endcap superior con la muestra de roca



Fuente: Los Autores.

En seguida, se sitúa el endcap inferior sobre la muestra, cuidando que la cavidad del mismo, coincida con la muestra y exista contacto pleno entre caras. Para ajustar el montaje y lograr alineación del mismo, se sujeta con la mano la parte central del montaje aplicando carga para ajustarlo, al tiempo se aplica carga manualmente en la parte superior del montaje. En la figura 45 se observa el montaje de los dos endcap con la muestra en las respectivas cavidades, las flechas indican la carga manual que se debe aplicar para estabilizar el montaje.

Figura 45. Montaje de los dos endcap



Fuente: Los Autores.

4. Consolidación del montaje: una vez ubicada la muestra en los endcap se procede a estabilizar el montaje con la chaqueta termoencogible, cuyo diámetro previamente ha sido reducido. Se introduce la chaqueta por la parte superior del montaje de los endcap, ubicándola equidistante a lo largo del mismo, mientras se mantiene la carga vertical para garantizar alineación del mismo. Posteriormente se aplica flujo de aire caliente sobre la chaqueta para reducir su diámetro hasta ajustar el montaje en todo su perímetro. Esto se logra aplicando aire caliente (150°) de forma pareja alrededor y de abajo hacia arriba del montaje durante 5 minutos con una pistola de aire caliente cerciorándose que el cierre o reducción de diámetro de la chaqueta sea uniforme y no afecte la alineación del montaje. En la figura 46 se observa la consolidación del montaje gracias a la reducción de la chaqueta termoencogible.

Figura 46. Reducción de la chaqueta termoencogible ajustando el montaje.



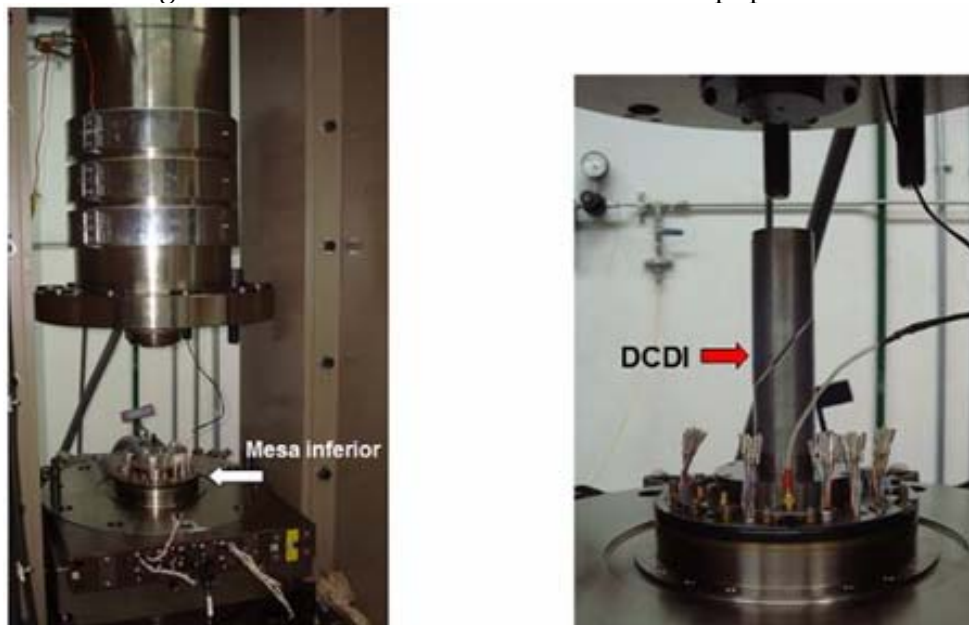
Fuente: Los Autores.

5. Verificar paralelismo del montaje del DCDI: de igual forma que el procedimiento realizado con la muestra de roca en el ítem “Registro de la

muestra de roca” se hace el registro de paralelismo del montaje e ingresan los datos en la tabla 9.

6. Ubicación del montaje en el equipo de mecánica de rocas MTS 815: con el montaje del DCDI listo, se procede a ubicarlo sobre la mesa inferior del MTS. Se debe alinear el pin situado en el centro de la mesa inferior con el agujero debajo del endcap inferior y disponer el montaje de tal forma que se observe el plano de corte del dispositivo. En la figura 47 se observan la mesa inferior del equipo MTS y la disposición final del DCDI.

Figura 47. Probeta montada en la mesa del equipo MTS



Fuente: Los Autores.

Después de efectuados los procedimientos mencionados anteriormente, se cuenta con el montaje listo y preparado para iniciar la prueba de corte directo inclinado.

De igual manera como se cuenta con el procedimiento para el montaje experimental del DCDI antes de iniciar una prueba, también se debe tener el proceso inverso, el desmontaje del DCDI una vez finalizada la prueba. A continuación se expone el procedimiento para desmontar el DCDI de 50° después de una prueba de corte directo inclinado.

1. Retirar el montaje del equipo MTS: finalizada la prueba, se dispone a retirar el montaje del DCDI de la mesa del equipo MTS. Este se ubica de forma horizontal en una mesa plana donde se pueda manipular con comodidad.
2. Retirar la chaqueta termoencogible: ubicar el montaje horizontalmente con el plano de corte apuntando hacia arriba. Con la ayuda de una superficie plana, apoyar la cara plana del montaje sobre esta superficie de tal forma que se pueda aplicar carga axial manualmente sobre el montaje para mantener presionada la muestra de roca, de igual forma, aplicar carga manualmente sobre el centro del montaje, presionando la muestra. Con la ayuda de un bisturí, cortar la chaqueta a lo largo del montaje. La figura 48 muestra la disposición del montaje, la aplicación de la carga manual en el centro del mismo y el corte de la chaqueta.

Figura 48. Disposición del montaje para retirar la chaqueta termoencogible



Fuente: Los Autores.

Cortada la chaqueta, aplicar carga manualmente en el centro del montaje y deslizar cuidadosamente la chaqueta sin generar desalineación del montaje. En la figura 49 se observa la forma de aplicar la carga y retirar la chaqueta.

Figura 49. Carga manual sobre el montaje



Fuente: Los Autores.

3. Separar los endcap: levantar un costado del montaje levemente manteniendo su alineación y aplicando carga en el centro del mismo hasta que el plano inclinado del montaje quede horizontalmente. Quitar el endcap superior levantándolo cuidadosamente para mantener la integridad de las mitades de la muestra de roca y procurando que las muestras se mantengan dentro de las cavidades de los endcap. En la figura 50 se observa la forma de ubicar el montaje para separar los endcap y la separación de los mismos.

Figura 50. Ubicación de los endcap para su separación.



Fuente: Los Autores.

4. Remover las secciones de muestra: la sección de muestra ubicada en el endcap superior se remueve aplicando pequeños golpes sobre la cara plana inclinada del endcap, apoyándolo sobre una superficie acolchonada para evitar rayarlo. Esta sección se puede retirar fácilmente, debido a que la carga axial es aplicada en el endcap inferior lo que causa un alojamiento fuerte de la muestra en la cavidad del endcap inferior y un alojamiento suave en la cavidad del endcap superior. Para retirar la sección de muestra del endcap inferior, debido a que queda aprisionada, es necesario remover parte de la muestra para su extracción. Con la ayuda de un punzón metálico, remover material en un costado de la muestra (costado donde no se aplica carga de corte). Esto permitirá que la sección salga fácilmente por gravedad. En la figura 51 se observa la remoción de parte de la muestra para su extracción de la cavidad del endcap inferior.

Figura 51. Remoción de material de la muestra



Fuente: Los Autores.

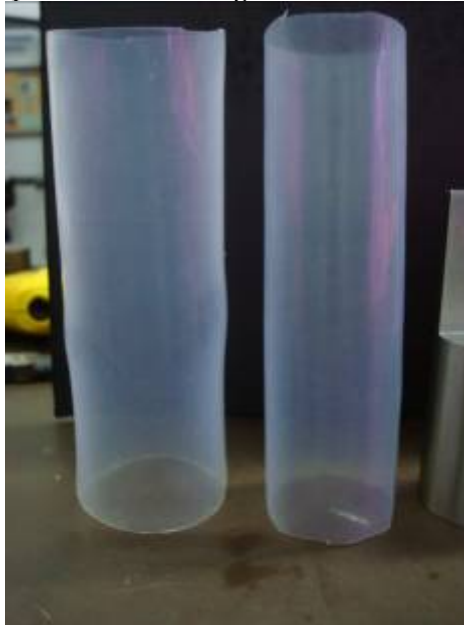
Procedimiento para el montaje y desmontaje experimental del DCDI 90°

De manera similar al montaje y desmontaje del DCDI 50°, se describe a continuación el proceso de montaje para el DCDI de 90°.

1. Registro de la muestra de roca: igual al utilizado para el DCDI de 50° y mencionado en la sección “Procedimiento para el montaje y desmontaje experimental del DCDI 50°”.

2. Corte y reducción de las chaquetas termoencogibles: con el objeto de estabilizar el montaje, se utiliza chaqueta termoencogible de 2” de diámetro igual a la utilizada para estabilizar el montaje del DCDI de 50°. Cortar 2 chaquetas de igual longitud, 14cm para este caso, una de ellas, reducirla a 38.5mm de diámetro con ayuda de la pistola de aire caliente y un tubo de igual diámetro y la otra reducirla a 38.1mm de diámetro. Se cortan dos chaquetas con el objeto que una estabilice inicialmente el montaje, y la segunda sirva de sello para mayor seguridad cuando el montaje se someta a confinamiento. En la figura 52 se observan las chaquetas con los diámetros reducidos.

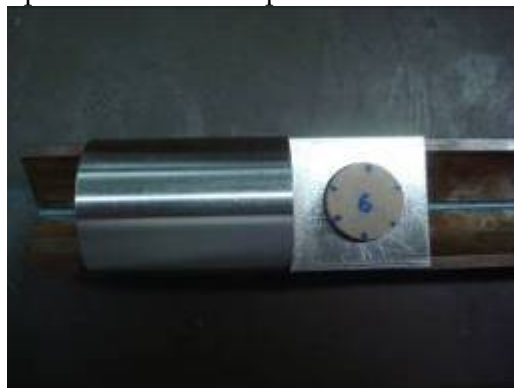
Figura 52. Chaquetas termoencogibles con reducción de diámetro



Fuente: Los Autores.

3. Ubicar los endcap y alojar la muestra de roca: ubicar el endcap inferior sobre una superficie plana colocando la cavidad del mismo hacia arriba. En seguida situar la muestra de roca en la cavidad del endcap, centrada y alineada respecto a la misma, verificando que la cara plana de la muestra quede completamente asentada en la superficie plana de la cavidad. En la figura 53 se observa la disposición del endcap inferior y la muestra de roca antes de colocar el endcap superior en el montaje.

Figura 53. Disposición del endcap inferior con la muestra de roca



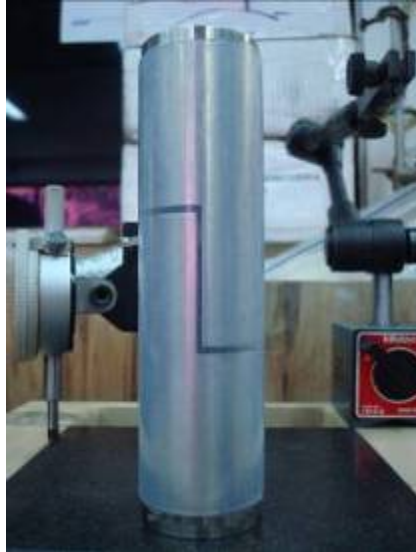
Fuente: Los Autores.

Posteriormente, colocar el endcap superior sobre el montaje anterior, haciendo coincidir la cavidad del mismo con la muestra. Verificar que el contacto entre las superficies planas de la cavidad y muestra sea completo. Manteniendo un apriete manual en el centro del montaje (centro a lo largo, donde se halla la muestra) y revisando que se mantenga la alineación, levantarlo y situarlo verticalmente (apoyado sobre la cara plana del endcap superior).

4. Poner primera chaqueta termoencogible: con el montaje estable, alineado y conteniendo la muestra de roca, colocar la chaqueta termoencogible de 38.1mm de diámetro sobre el montaje, introduciéndola por la parte superior

del mismo. Con ayuda de la pistola de calor, disminuir el diámetro de la chaqueta cerrándola hasta ajustar el montaje y mantener su alineación. En la figura 54 se observa el montaje alineado y con la primera chaqueta ubicada.

Figura 54. Montaje estable y alineado con la primera chaqueta



Fuente: Los Autores.

5. Poner segunda chaqueta termoencogible: ubicar el montaje verticalmente e introducir la segunda chaqueta de diámetro 38.5mm. Disminuir su diámetro con la pistola de calor hasta comprimir y ajustar todo el montaje. En la figura 55 se observa el momento en el cual se empieza a cerrar (disminuir de diámetro) la chaqueta termoencogible y comprime el montaje logrando un sello uniforme en toda su periferia.

Figura 55. Cierre de la segunda chaqueta termoencogible



Fuente: Los Autores.

6. Elaboración de sellos de alambre: para evitar que el fluido de confinamiento ingrese al montaje, se elaboran dos sellos o cierres con alambre dulce sobre la periferia del montaje. Cortar 4 tramos de 30cm de alambre dulce calibre 4mm. Amarrar los alambres, apretándolos simétricamente alrededor del montaje, uno a uno y, ubicándolos a 2cm del final de cada endcap. Verificar que los alambres queden apretados sobre el montaje y la chaqueta, creando éste un apriete y sello para evitar el paso de fluido. En la figura 56 se contemplan los 4 tramos de alambre amarrados sobre el montaje.

Figura 56. Ubicación de los sellos de alambre en el montaje.



Fuente: Los Autores.

7. Aplicar silicona: para evitar que el fluido de confinamiento ingrese por las cavidades del montaje e invada la muestra, se aplican capas de silicona sobre las fisuras de la chaqueta termoencogible, sellos de alambre y separaciones del montaje por donde posiblemente podría filtrarse el fluido. En la figura 57 se observan los cordones de silicona recubriendo los posibles sitios por donde se podría filtrar fluido de confinamiento.

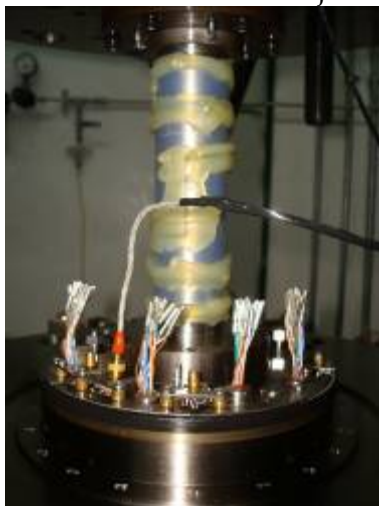
Figura 57. Sellos de silicona sobre el montaje



Fuente: Los Autores.

8. Ubicación del montaje en la MTS: ubicar el montaje del DCDI en la mesa inferior del MTS alineando el mismo con el pin de la mesa. Ubicar el montaje de manera tal que se observe el plano de corte del dispositivo. En la figura 58 se observa el montaje dispuesto en la mesa del MTS.

Figura 58. Ubicación del montaje en el MTS



Fuente: Los Autores.

Al conocer y tener claros los diferentes procedimientos para preparación de muestras y ensamble del dispositivo, es necesario cumplir siempre y rigurosamente estos procedimientos cada vez que se efectúe un ensayo, consiguiendo así una alta repetibilidad y uniformidad en los resultados de los mismos

4.3 PROTOCOLO DE ENSAYO

Un protocolo de ensayo describe la metodología utilizada para realizarlo, muestra el objeto del ensayo y los diferentes procedimientos necesarios para calcular los parámetros a encontrar, a partir de datos obtenidos en el ensayo. Para este caso particular, debido a que la técnica, el montaje y los dispositivos utilizados son todos experimentales, no existe una norma internacional que permita guiar y estandarizar el ensayo y su protocolo.

4.3.1 Protocolo de ensayo TCDI 50°

El protocolo se divide en pasos a seguir de forma ordenada y consecutiva. A continuación se muestra el protocolo para el ensayo de corte directo inclinado con el DCDI de 50°.

1. Objetivo del protocolo.

Este protocolo describe la metodología utilizada para realizar el ensayo de corte directo inclinado en muestras de roca de geometría no convencional utilizando el DCDI de 50°. Tiene por objeto determinar la resistencia al corte directo de una roca para posteriormente calcular la cohesión y ángulo de fricción interna. Este protocolo está basado en los procedimientos técnicos de montaje del DCDI descritos en el capítulo 4.2 y en la norma internacional D5607-08 para efectuar el procedimiento de cálculo y reporte de resultados.

2. Equipos e instrumentación necesarios

Durante el presente ensayo se utilizan los siguientes instrumentos y equipos.

2.1 El equipo utilizado para realizar el ensayo es el Sistema de Mecánica de Rocas MTS 815 en su configuración axial.

2.2 Los registros de carga y desplazamiento son medidos con la celda de carga propia del MTS y un LVDT integrado también al cilindro axial del MTS.

2.3 Cámara fotográfica para registro del ensayo.

3. Procedimiento de ensayo.

3.1 Conectar la celda de carga a la mesa del MTS y verificar la lectura en el sistema.

3.2 Colocar en funcionamiento el sistema MTS en la configuración ensayo corte directo inclinado no confinado.

3.3 Configurar en el software una tasa de desplazamiento de 0.0005mm/s

- 3.4 Elevar el actuador axial hasta que el tope del endcap superior quede a menos de 1mm de la platina de compresión superior.
- 3.5 Tomar fotografías del montaje listo para aplicar carga.
- 3.6 Incrementar la carga axial lentamente hasta alcanzar 0.8KN
- 3.7 Ingresar en el software los datos característicos de la muestra a ensayar, longitud, diámetro, porosidad, permeabilidad y temperatura.
- 3.8 Dar inicio a la prueba en el software de control
- 3.9 Incrementar la carga axial a razón de la tasa programada en el software hasta producir la falla, caída fuerte de la carga.
- 3.10 Registrar los siguientes datos durante todo el transcurso de la prueba: desplazamiento axial, tiempo de prueba y fuerza axial.
- 3.11 Fallada la muestra terminar el ensayo en sistema de control.

4. Procedimiento de cálculo.

4.1 Calcular el área transversal en la muestra de roca ensayada. El área esta determinada por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (13)$$

Donde D = diámetro de la muestra

4.2 Calcular las componentes normal y cortante de la fuerza axial:

$$Fn = Fa * \cos(50) \quad (14)$$

$$Fc = Fa * \sin(50) \quad (15)$$

Donde Fa = fuerza axial aplicada por el MTS

4.3 Calcular los esfuerzos ingenieriles:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} \quad (16)$$

$$\tau = \frac{F_c}{A} \quad (17)$$

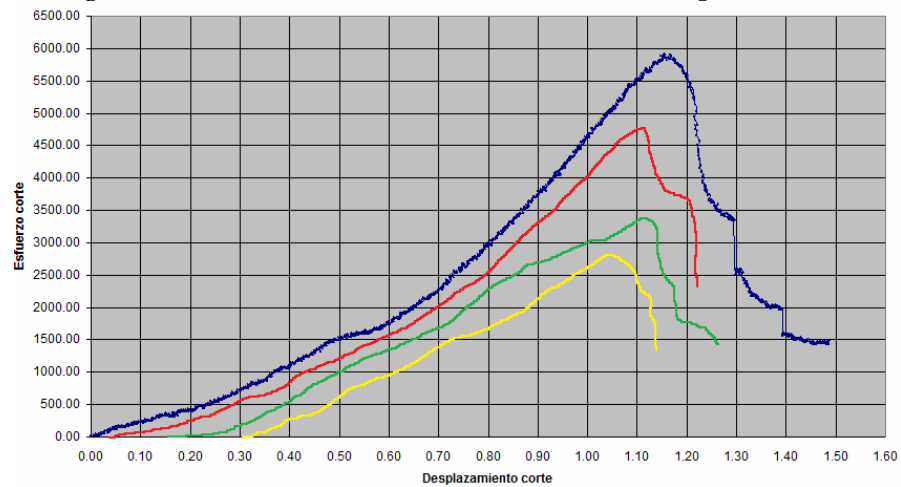
Donde:

F_n = fuerza normal

F_c = fuerza cortante

4.4 Realizar la gráfica de esfuerzo cortante τ contra desplazamiento de corte, donde se registre cada prueba.

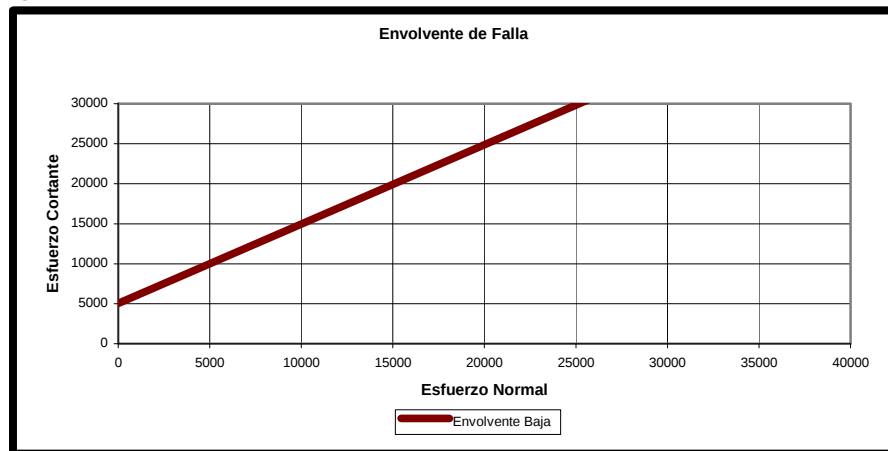
Figura 59. Gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento



Fuente: ASTM D5607-08 "Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force" página 7

4.5 Realizar gráfica de esfuerzo cortante τ máximo contra esfuerzo normal σ_n , para generar la recta del criterio de Morh-Coulomb.

Figura 60. Gráfica de esfuerzo cortante máximo contra esfuerzo normal



Fuente: ASTM D5607-08 "Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force" página 7

5. Reporte de resultados

Generar un documento de Excel con los siguientes datos y resultados de la prueba:

Primera hoja: Responsable del ensayo, nombre de la muestra ensayada, nombre del ensayo realizado, longitud y diámetro de la muestra, espesor de la chaqueta, fecha, gravedad específica, porosidad, permeabilidad, condiciones de saturación, temperatura y breve descripción del ensayo.

Segunda hoja: datos registrados durante el ensayo; tiempo, fuerza axial, desplazamiento axial, fuerza normal, fuerza de corte, esfuerzo de corte, esfuerzo normal y desplazamiento de corte.

Tercera hoja: gráfica de esfuerzo cortante contra desplazamiento de corte, ubicando el punto máximo de resistencia al corte.

Cuarta hoja: observaciones de la prueba

En el anexo B se puede observar el formato para el reporte de ensayos en pruebas con el prototipo DCDI de 50°.

4.3.2. Protocolo de ensayo TCDI 90°

A continuación se muestra el protocolo para el ensayo de corte directo inclinado con el DCDI de 90°.

1. Objetivo del protocolo.

Este protocolo describe la metodología utilizada para realizar el ensayo de corte directo inclinado en muestras de roca de geometría no convencional utilizando el DCDI de 90°. Tiene por objeto determinar la resistencia al corte directo de una roca para posteriormente calcular la cohesión y ángulo de fricción interna. Este protocolo está basado en los procedimientos técnicos de montaje del DCDI descritos en el capítulo 4.2 y en la norma internacional D5607-08 para efectuar el procedimiento de cálculo y reporte de resultados.

2. Equipos e instrumentación necesarios

Durante el presente ensayo se utilizan los siguientes instrumentos y equipos.

2.1 El equipo utilizado para realizar el ensayo es el Sistema de Mecánica de Rocas MTS 815 en su configuración triaxial.

2.2 Los registros de carga, presión y desplazamiento son medidos con una celda de carga propia del MTS, transductores de presión y un LVDT integrado al cilindro axial del MTS.

2.3 Cámara fotográfica para registro del ensayo.

3. Procedimiento de ensayo.

3.1 Conectar la celda de carga a la mesa del MTS y verificar la lectura en el sistema.

3.2 Colocar en funcionamiento el sistema MTS en la configuración ensayo corte directo inclinado confinado.

3.3 Configurar en el software una tasa de desplazamiento de 0.0005mm/s, una tasa de aumento de presión de confinamiento de 50PSI/min y una presión máxima de confinamiento de 200PSI.

3.4 Elevar el actuador axial hasta que el tope del endcap superior quede a menos de 1mm de la platina de compresión superior.

3.5 Incrementar la carga axial lentamente hasta alcanzar 0.8KN

3.6 Tomar fotografías del montaje listo para aplicar carga.

3.7 Descender la campana de confinamiento ajustándola a la mesa inferior del MTS

3.8 Ingresar en el software los datos característicos de la muestra a ensayar, longitud, diámetro, porosidad, permeabilidad y temperatura.

3.9 Dar inicio a la prueba en el software de control

3.10 Llenar la campana de confinamiento con fluido de potencia (klearol) y aumentar la presión hasta 200psi a una tasa de 50psi/min y mantenerla constante durante el ensayo.

3.11 Incrementar la carga axial a razón de la tasa programada en el software hasta producir la falla, caída fuerte de la carga.

3.12 Registrar los siguientes datos durante todo el transcurso de la prueba: desplazamiento axial, tiempo de prueba, fuerza axial, presión de confinamiento y desplazamiento del pistón de confinamiento.

3.13 Fallada la muestra terminar el ensayo en sistema de control.

4. Procedimiento de cálculo.

4.1 Calcular el área transversal en la muestra de roca ensayada. El área esta determinada por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (18)$$

Donde D = diámetro de la muestra

4.2 Calcular el esfuerzo cortante ingenieril:

$$\tau = \frac{F_a}{A} \quad (19)$$

Donde:

Fa= fuerza axial

4.3 Realizar la gráfica de esfuerzo cortante τ contra desplazamiento de corte, donde se registre cada prueba. Ver figura 56

Realizar gráfica de esfuerzo cortante τ máximo contra esfuerzo normal σ_n , para generar la recta del criterio de Morh-Coulomb. Ver figura 59

5. Reporte de resultados

Generar un documento de Excel con los siguientes datos y resultados de la prueba:

Primera hoja: Responsable del ensayo, nombre de la muestra ensayada, nombre del ensayo realizado, longitud y diámetro de la muestra, espesor de la chaqueta, fecha, gravedad específica, porosidad, permeabilidad, condiciones de saturación, temperatura, presión de confinamiento máxima y breve descripción del ensayo.

Segunda hoja: datos registrados durante el ensayo; tiempo, desplazamiento pistón de confinamiento, presión de confinamiento, desplazamiento axial, fuerza axial, fuerza de corte, esfuerzo normal y esfuerzo de corte.

Tercera hoja: gráfica de esfuerzo cortante contra desplazamiento de corte, ubicando el punto máximo de resistencia al corte. Gráfica de esfuerzo de

corte contra tiempo. Gráfica de desplazamiento y presión de confinamiento contra tiempo.

Cuarta hoja: observaciones de la prueba

En el anexo C se puede observar el formato para el reporte de ensayos en pruebas con el prototipo DCDI de 90°.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 PRELIMINARES

Este capítulo describe las pruebas realizadas con los prototipos del DCDI de 50° y 90° a partir de los reportes generados en cada ensayo. Posteriormente se analizan los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, calculando los esfuerzos para compararlos con la envolvente de falla de pruebas convencionales y finalmente encontrar una relación entre los datos experimentales del DCDI y los datos de ensayos convencionales que permitan establecer si el DCDI cumple su objetivo de caracterizar mecánicamente formaciones geológicas mediante muestras de geometría no convencional.

5.2 PRUEBAS DEL DISPOSITIVO PROTOTIPO 50°

A continuación se presentan las pruebas realizadas con el dispositivo prototipo de 50°, los resultados obtenidos y el análisis de los mismos en cada prueba de forma particular.

5.2.1 Ensayo CDI en la muestra Tambor 51a 01

Primer ensayo realizado para ajustar el montaje experimental y el protocolo de la prueba con el DCDI de 50°. El principal objetivo fue verificar la estabilidad de los dos endcap, su alineación y paralelismo entre las caras de montaje. Se obtuvieron resultados satisfactorios, el montaje se mantuvo estable durante la prueba y las cargas se distribuyeron de manera tal que la muestra falló por corte directo, con un plano paralelo al de la superficie inclinada de los endcap. En el transcurso de aplicación de carga, se observó

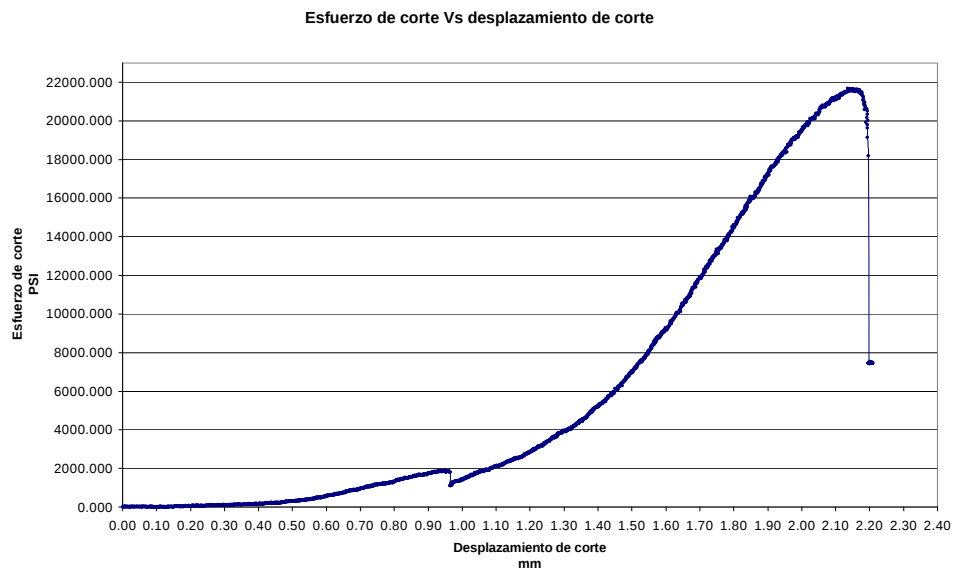
una caída de la misma, causada posiblemente, por un acomodamiento de la muestra de roca en la cavidad de los endcap. El valor de resistencia máxima al corte fue de 21684PSI. A continuación en la imagen 61 se observa la muestra fallada, observando el plano determinado de falla como se simuló en ANSYS y en la imagen 62 la gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento de corte, donde se observa el aumento progresivo de la carga de corte contra el desplazamiento en el plano de corte del dispositivo, siendo éste el comportamiento esperado para una roca.

Figura 61. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 62. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 03



Fuente: Los Autores.

5.2.2 Ensayo CDI en la muestra Tambor 51a 02

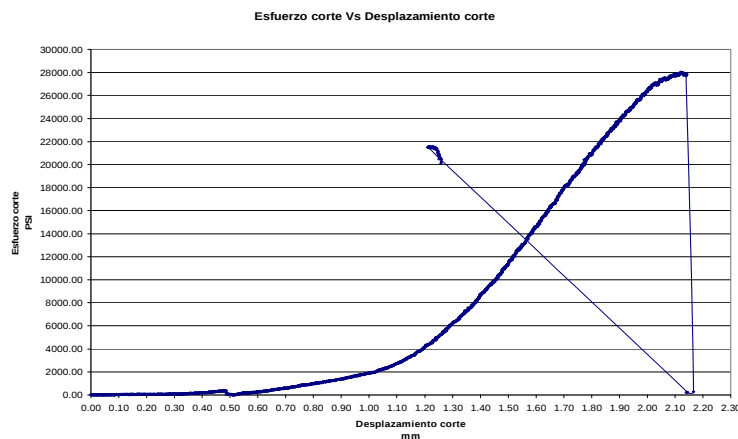
Segundo ensayo realizado en el cual se mantuvieron los pasos del montaje experimental y el protocolo utilizado en la prueba anterior. Se utilizó una muestra de menor longitud respecto a la usada en la primera prueba, esto causó que el montaje no se mantuviera alineado, debido a la disminución de la holgura presente en el montaje. De igual forma que el ensayo CDI Tambor 51a 01, se presentó una caída de la carga al iniciar el ascenso de la misma, evidenciando que esto se presenta debido al acomodamiento de la muestra en la cavidad. El valor de resistencia máxima al corte fue de 28030PSI. A continuación en la imagen 63 se observa la muestra fallada y la imagen 64 muestra la gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento de corte obtenida en el transcurso del ensayo.

Figura 63. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 64. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI05



Fuente: Los Autores.

5.2.3 Ensayo CDI en la muestra Tambor 51a 03

Se mantuvo el procedimiento de montaje y protocolo establecidos para realizar la prueba. La caída de carga al inicio de la prueba se presenta nuevamente como se ha visto en las dos pruebas anteriores, se concluye que ésta es debida a la acomodación de la muestra en la cavidad de los endcap.

La muestra presentó falla por corte directo, resistiendo hasta un esfuerzo de corte de 27451PSI.

Este ensayo junto con el ensayo CDI Tambor 51a02 permiten ubicar los puntos de máxima resistencia al corte en la gráfica de la envolvente de falla de la formación Tambor 51, obtenida a partir de ensayos convencionales y normalizados, y de esta forma poder comparar los datos experimentales con los datos normalizados de resistencia de esta formación.

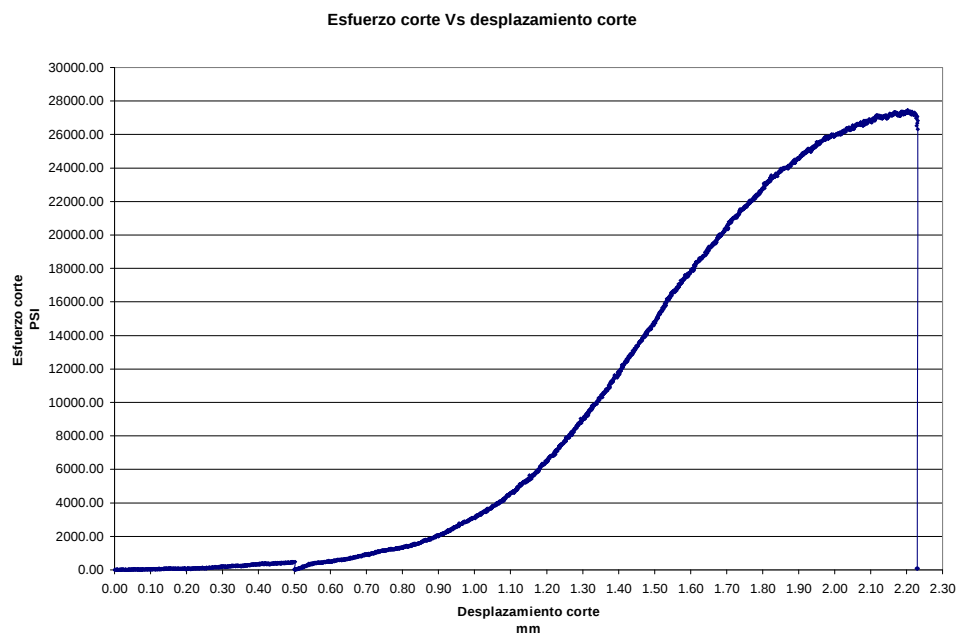
A continuación en la imagen 65 se observa la muestra fallada y en la imagen 66, la gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento de corte.

Figura 65. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 66. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI06



Fuente: Los Autores.

5.2.4 Ensayo CDI en la muestra Tambor 08V

Después de realizadas 3 pruebas, se concluye que el montaje y la disposición de la probeta son aceptables, las pruebas son exitosas, entregan resultados coherentes y cercanos a los datos obtenidos en pruebas convencionales, por tanto se aplica de ahora en adelante en todas las pruebas con el DCDI de 50° el mismo procedimiento y protocolo. Ésta prueba es la primera de 4 a realizar con la misma formación. Las probetas a ensayar son extraídas de un mismo plug de 1 pulgada y media de longitud. Se espera con estas cuatro pruebas ajustar y calibrar el índice de repetibilidad y la exactitud del ensayo, modificando las variables longitud y diámetro de la muestra, para concluir con una tolerancia dimensional que asegure alta repetibilidad y alta exactitud. Se controla inicialmente la longitud de las probetas como primera variable a evaluar, manteniendo la longitud entre 7.17mm y 7.28mm, es decir

un margen de 0.11mm entre longitudes de las probetas a ensayar de la misma formación.

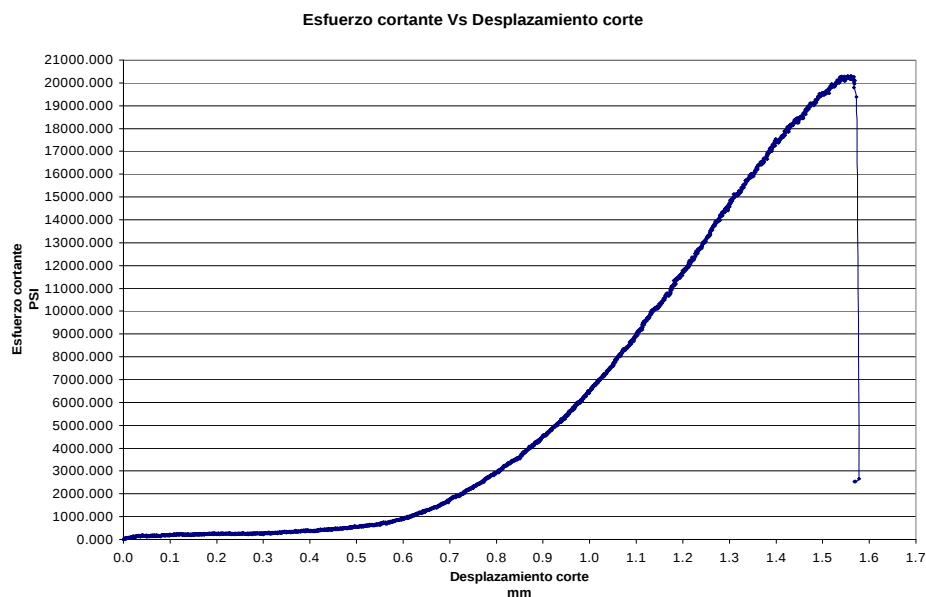
El ensayo no presentó caída de carga al inicio de la aplicación de la misma, la muestra se ajustó a la cavidad de los endcap, permitiendo que la probeta soportara carga al iniciar el desplazamiento del pistón de carga. La resistencia máxima al corte fue de 20314PSI. En la imagen 67 se observa la muestra y el montaje después de la falla. La figura 68 muestra la gráfica de esfuerzo máximo de corte contra desplazamiento de corte, mostrando el valor de resistencia máxima al corte de la muestra.

Figura 67. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 68. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 09



Fuente: Los Autores.

5.2.5 Ensayo CDI en la muestra Tambor 08II

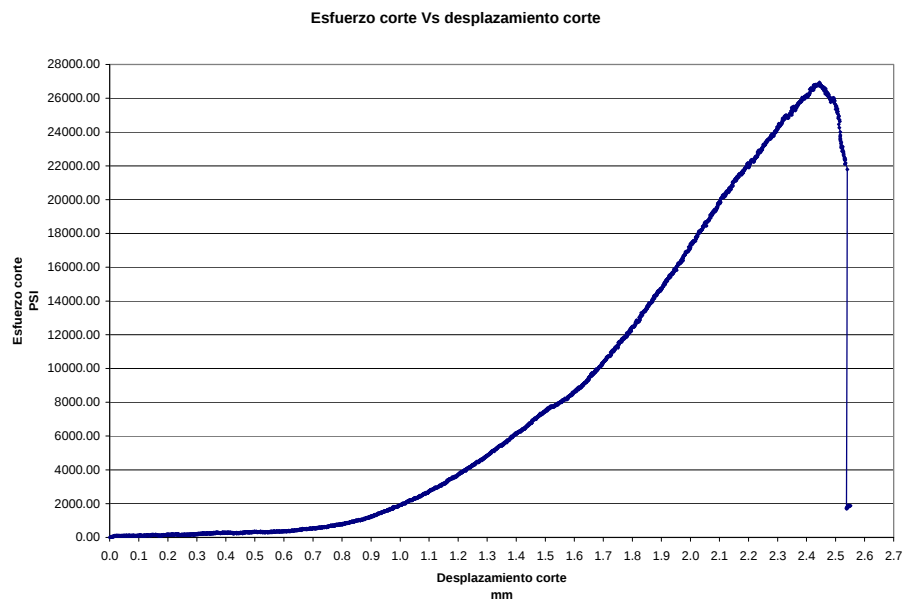
Se mantuvieron los parámetros del ensayo, montaje experimental y protocolos de ensayo. La muestra soportó la carga de forma inmediata sin presentar el fenómeno de acomodamiento en la cavidad. La resistencia máxima obtenida al corte, fue 26932PSI. En la imagen 69 se observa la muestra y el montaje después de la falla. La figura 70 muestra la gráfica de esfuerzo máximo de corte contra desplazamiento de corte, mostrando el valor de resistencia máxima al corte de la muestra.

Figura 69. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 70. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 10



Fuente: Los Autores.

5.2.6 Ensayo CDI en la muestra Tambor 08VI

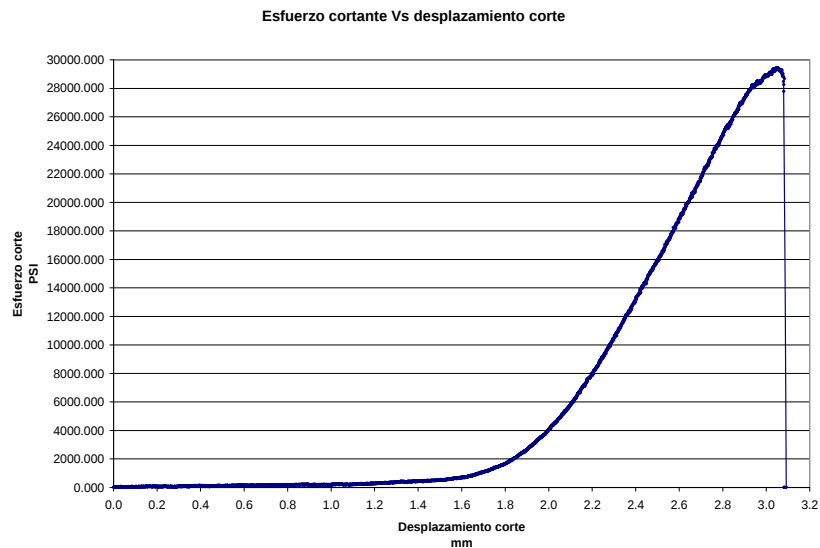
Se mantuvieron los parámetros del ensayo. No se presentó el fenómeno de acomodamiento debido al desgaste del material sobrante del maquinado en la arista inferior de la cavidad, permitiendo un ajuste perfecto entre la periferia de la muestra y la periferia de la cavidad del endcap. La resistencia máxima al corte fue 29465PSI. En la figura 71 se observa la muestra y el montaje después de la falla. La figura 72 muestra la gráfica de esfuerzo máximo de corte contra desplazamiento de corte mostrando el valor de resistencia máxima al corte de la muestra.

Figura 71. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 72. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 11

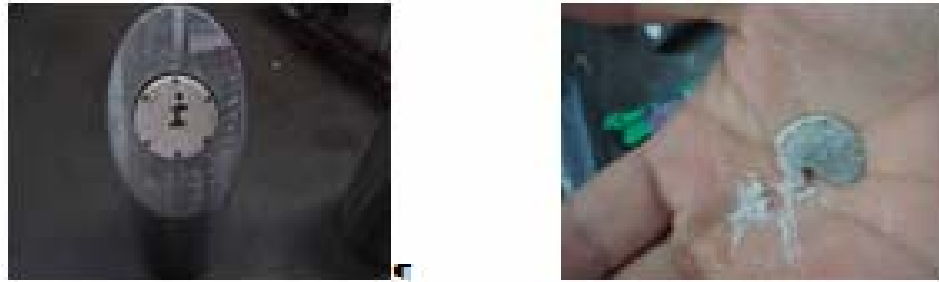


Fuente: Los Autores.

5.2.7 Ensayo CDI en la muestra Tambor 08 I

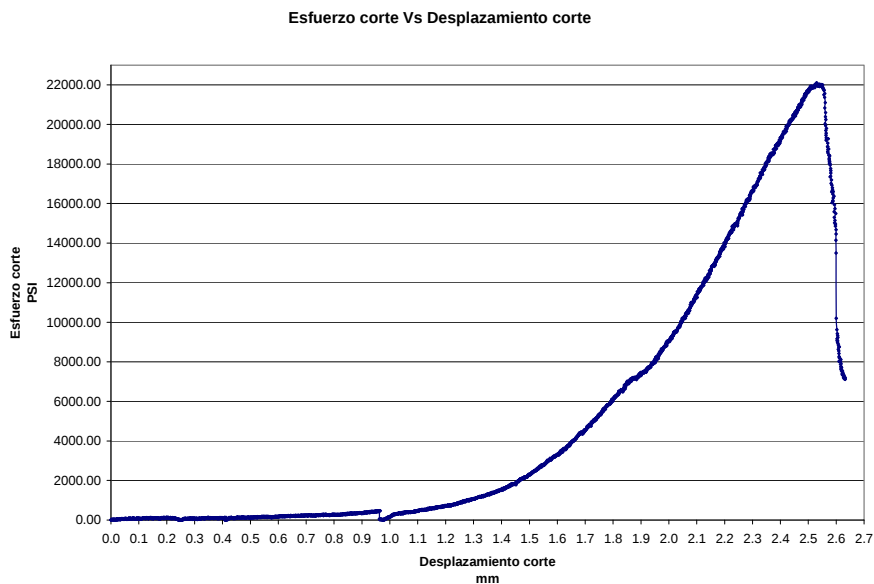
Se mantuvieron los parámetros del ensayo. La muestra soportó la carga de forma inmediata sin presentar el fenómeno de acomodamiento en la cavidad. Cuarta prueba realizada en la formación Tambor 08. La resistencia máxima al corte obtenida fue 22105PSI. En la imagen 73 se observa la muestra y el montaje después de la falla. La figura 74 muestra la gráfica de esfuerzo máximo de corte contra desplazamiento de corte, mostrando el valor de resistencia máxima al corte de la muestra.

Figura 73. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 74. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 12



Fuente: Los Autores.

5.2.8 Ensayo CDI en la muestra Berea B1

Se mantuvo el mismo protocolo de montaje y ensayo con el DCDI. Fue la primera prueba en la formación Berea. Esta formación es mundialmente reconocida y estudiada, es utilizada en la investigación para validar nuevas técnicas de caracterización, debido a la gran información recolectada por todos los centros de investigación mundiales. Por esto se ensaya y caracteriza con el DCDI, para obtener datos que permitan hallar la relación entre el ensayo experimental y los normalizados.

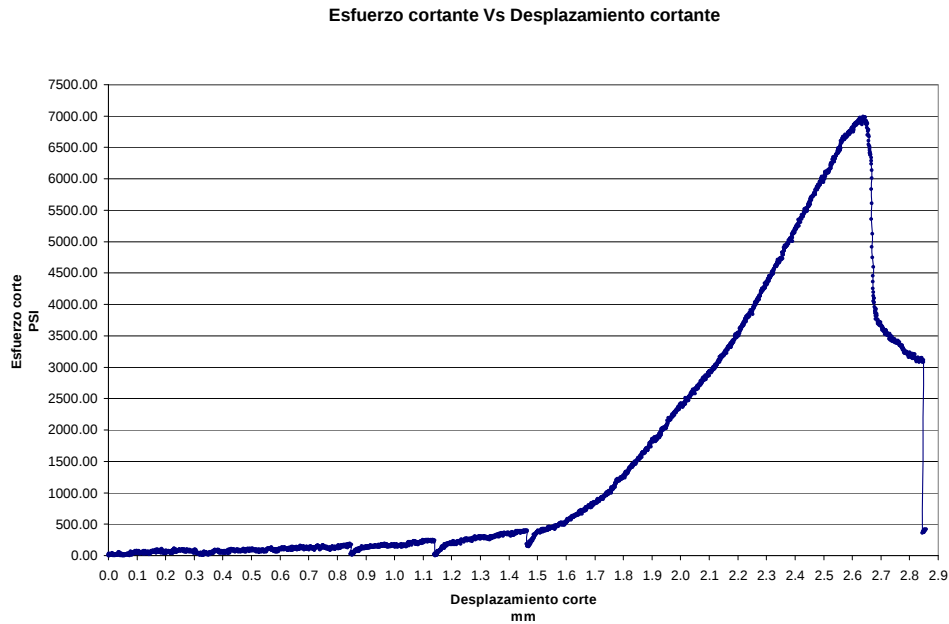
Durante el ensayo, el dispositivo se desplazó 1,5mm antes de iniciar el ascenso de carga, tardando 2400 segundos en este recorrido, ésto se debe al diámetro menor de la muestra (21.4mm) respecto a los diámetros de las muestras anteriores, por tanto los endcap se deben desplazar una distancia mayor antes de aplicar carga a la muestra. En la figura 75 se observa la muestra y el montaje después de la falla. La figura 76 muestra la gráfica de esfuerzo máximo de corte contra desplazamiento de corte, mostrando el valor de resistencia máxima al corte de la muestra.

Figura 75. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 76. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 07



Fuente: Los Autores.

5.2.9 Ensayo CDI en la muestra Berea B3

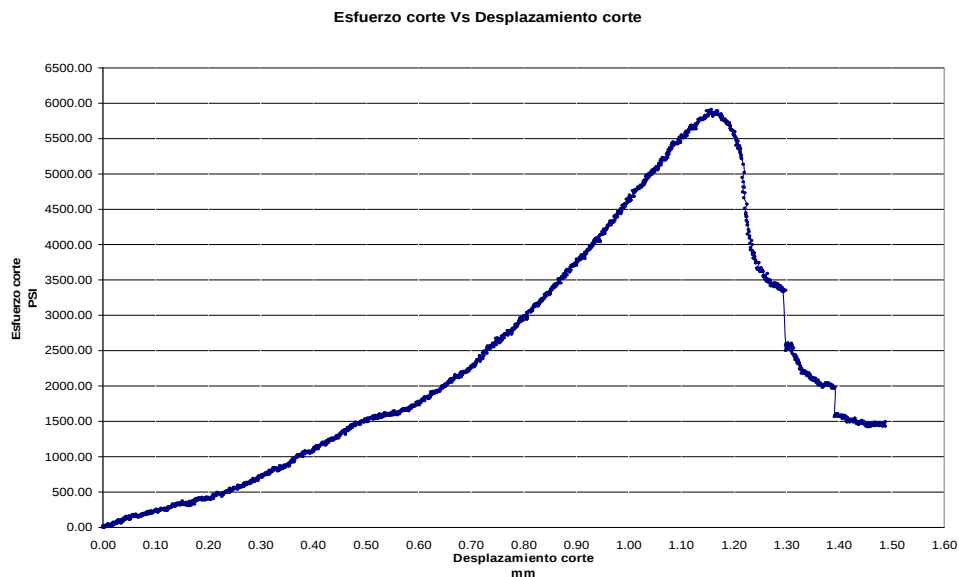
Segundo ensayo en la formación Berea. Se mantienen los protocolos establecidos inicialmente. No se observó caída súbita de carga durante el ascenso de la misma debido a que la muestra se acomodó en las cavidades de los endcap permitiendo aplicar carga inmediatamente sobre la muestra. La muestra falló a un esfuerzo de corte de 5910PSI, posteriormente presentó un comportamiento de resistencia residual, descendiendo la carga a 3500PSI, desplazándose 1.1mm durante 40 segundos. Este ensayo junto con el ensayo CDI Berea B1 y CDI Berea B2 permiten ubicar los puntos de máxima resistencia al corte en la gráfica de la envolvente de falla de la formación berea obtenida a partir de ensayos convencionales y normalizados, de esta forma se puede comparar los datos experimentales con los datos normalizados de resistencia de esta formación. La figura 77 enseña la muestra

de roca después de la falla. La gráfica 78 muestra el resultado del esfuerzo de corte soportado por ésta contra el desplazamiento de corte.

Figura 77. Muestra de roca fallada



Figura 78 Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 08



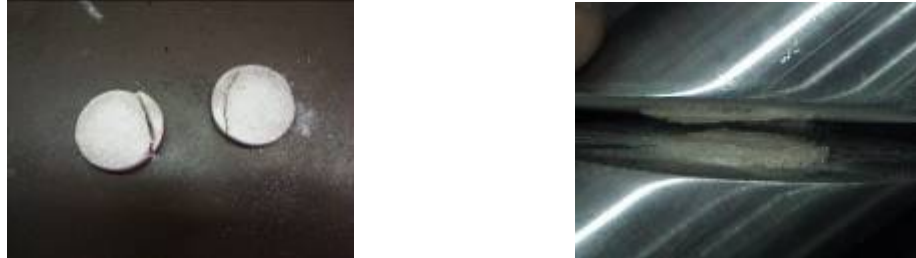
Fuente: Los Autores.

5.2.10 Ensayo CDI en la muestra Berea B2

Tercer ensayo en la formación Berea. Se mantienen los protocolos establecidos inicialmente y la muestra no presentó acomodamiento durante el ascenso de carga. La resistencia máxima al corte fue de 6988PSI. La muestra no presentó resistencia residual después de la falla por corte. En la figura 79 se observa la muestra de roca después de la falla. La gráfica 80 muestra el

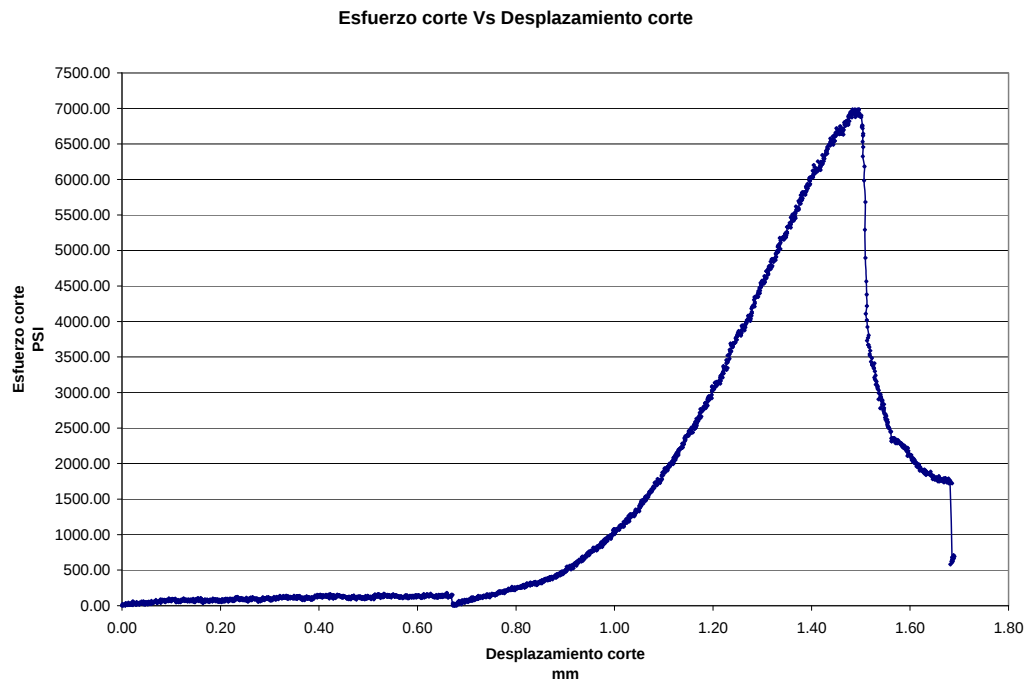
resultado del esfuerzo de corte soportado por la muestra, contra el desplazamiento de corte

Figura 79. Muestra de roca fallada



Fuente: Los Autores.

Figura 80 Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte prueba CDI 15



Fuente: Los Autores.

5.3 PRUEBAS DEL DISPOSITIVO PROTOTIPO 90°

A continuación se describen las pruebas realizadas con el dispositivo prototipo de 90°, los resultados obtenidos y el análisis de los mismos en cada prueba de forma particular.

5.3.1 Ensayo CCS CDI en la muestra Tambor 51a04

Primer ensayo experimental cuyo objetivo es verificar si el montaje experimental del DCDI permite realizar la prueba de manera satisfactoria. Igualmente, se busca calibrar el protocolo de ensayo, experimentando con las variables controlables del mismo. El ensayo se configura para alcanzar una presión de confinamiento máxima de 6000PSI, incrementándola a una tasa de 5PSI/s y manteniéndola constante, posteriormente se inicia la aplicación de la carga axial o de corte, a una tasa de desplazamiento del pistón de carga de 0.0005mm/s.

Transcurridos 16 minutos del ensayo, durante el ascenso de la presión de confinamiento, la cual se encontraba en 5700PSI, se observó un aumento en la carga axial, efecto no esperado ni deseado, la presión de confinamiento no debe influir directamente en la carga axial, por tanto esta última debe mantenerse constante durante el ascenso de la presión de confinamiento, se presume que la chaqueta aislante falló y permitió que el fluido de confinamiento ingresara en el montaje causando un aumento de la carga axial.

Terminada la etapa de confinamiento y con la presión constante en 6000PSI se procedió a incrementar la carga axial o cortante, observándose un aumento máximo de 2200PSI, con un comportamiento fluctuante de carga, donde no se aprecia una caída súbita de la misma que indique falla por corte en la muestra. Esto afirma la presunción que la chaqueta falló y por tanto el fluido de confinamiento dentro del montaje no permite aplicar sobre la muestra carga de corte. Se termina la prueba debido a que la carga axial no aumenta.

Posterior al desmonte del DCDI, se corrobora la falla de la chaqueta de aislamiento. La falla y fuga ocurrió en una de las aristas libre del montaje. La presión de confinamiento de 6000PSI es muy alta para ser resistida por la doble chaqueta protectora y la silicona adicional aplicada al montaje.

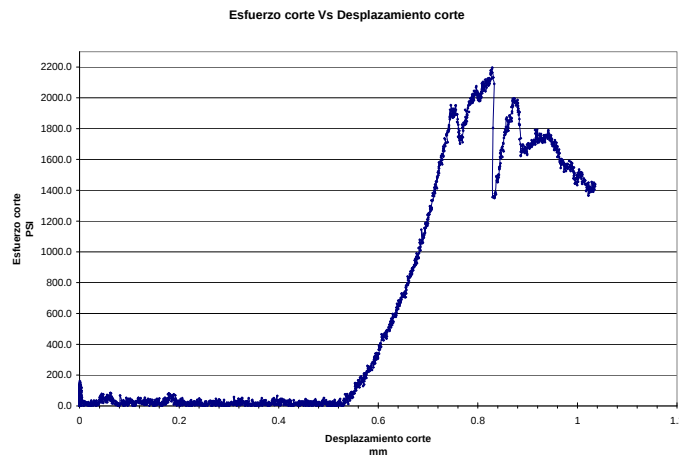
En la figura 81 se observa el montaje invadido por el fluido de confinamiento, la falla y fuga del montaje y la muestra de roca fallada respectivamente. En la figura 82 se observa la gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento de corte, la cual permite conocer la resistencia máxima al corte. En la figura 83 se observa la gráfica de esfuerzo de corte contra tiempo, ésta permite relacionar el comportamiento de carga axial respecto al comportamiento del confinamiento, los dos en función del tiempo. Por último, se observa en la gráfica 84 el comportamiento de la presión de confinamiento y el desplazamiento del pistón de confinamiento contra el tiempo, permitiendo visualizar cualquier variación de la carga durante el ensayo. Estas tres últimas gráficas, permiten analizar el comportamiento del ensayo y concluir sobre el desarrollo del mismo.

Figura 81. Muestra de roca fallada



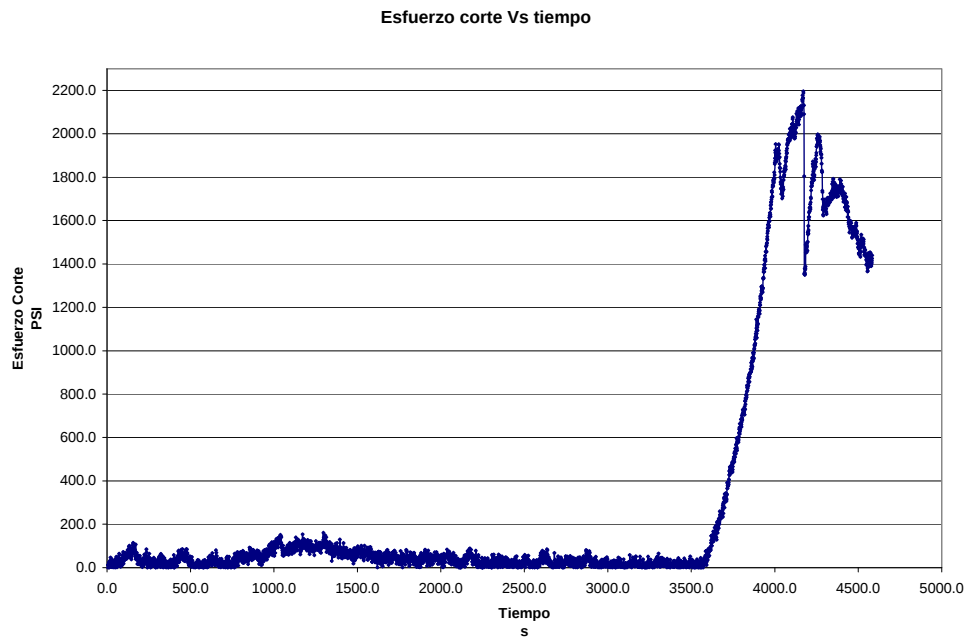
Fuente: Los Autores.

Figura 82. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte en CCS CDI 01



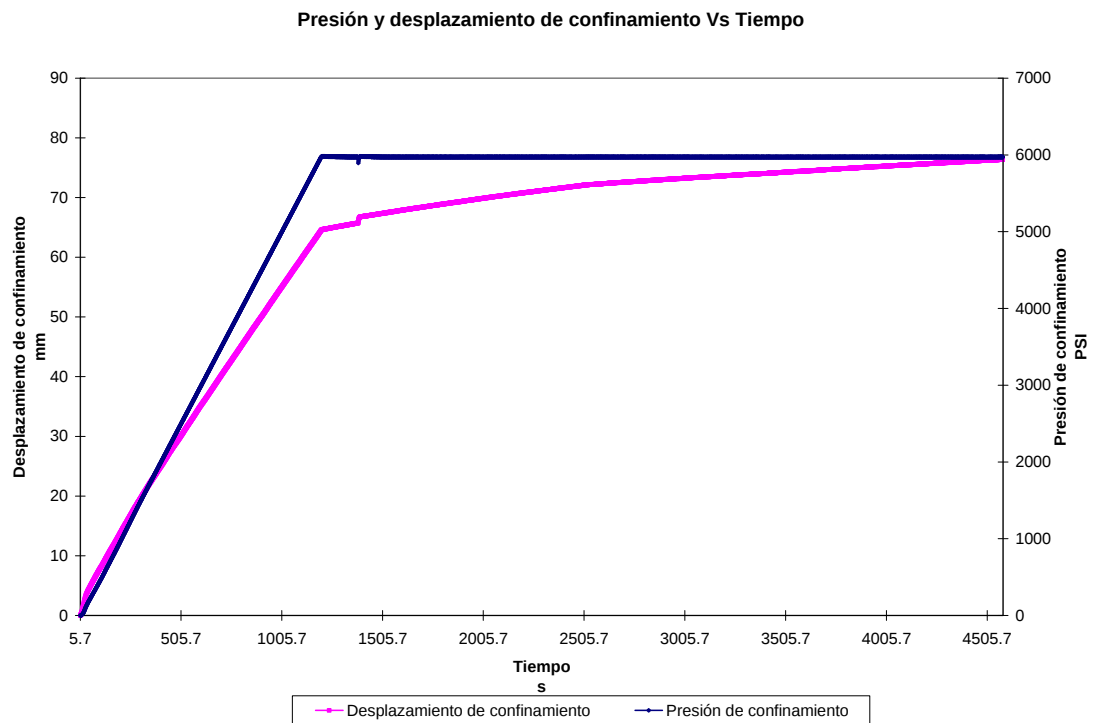
Fuente: Los Autores.

Figura 83. Esfuerzo de corte Vs tiempo de corte en CCS CDI 01



Fuente: Los Autores.

Figura 84. Presión de confinamiento Vs tiempo en CCS CDI 01



Fuente: Los Autores.

5.3.2 Ensayo CCS CDI en la muestra Tambor 51b05

Se mantuvieron los parámetros del montaje experimental y el protocolo empleados en la prueba CCS CDI Tambor 51b04. Transcurridos 1000 segundos del ensayo, se presenta nuevamente un incremento en la carga axial similar al presentado en la prueba anterior. En este punto la presión de confinamiento estaba en ascenso con un valor de 5000PSI. Se cree que el montaje de la doble chaqueta mas la silicona alrededor del montaje falla a esta presión, por tanto al llegar a los 6000PSI donde se mantiene constante la presión, el montaje ya se encuentra saturado y no permite ejercer carga axial sobre la muestra. La carga axial no incrementó y se mantiene constante, por tanto se da por concluida la prueba.

Desmontado el DCDI, se observa la falla de la chaqueta nuevamente. La muestra de roca, saturada de fluido de confinamiento, presenta pequeñas marcas, aproximadamente 0.46mm en cada costado, producto de la presión de confinamiento, actuando como carga axial dentro del montaje del dispositivo. En la figura 85a se puede observar la falla de la chaqueta producto de la presión de confinamiento.

Figura 85a. Falla de la chaqueta termoencogible



Fuente: Los Autores

La figura 85b muestra el endcap superior con el espécimen de roca saturado por el fluido de confinamiento.

Figura 85b. Endcap con la muestra de roca saturada



Fuente: Los Autores

La figura 85c muestra las marcas generadas en la muestra de roca causadas por el confinamiento interno del montaje.

Figura 85c. Muecas en la muestra de roca

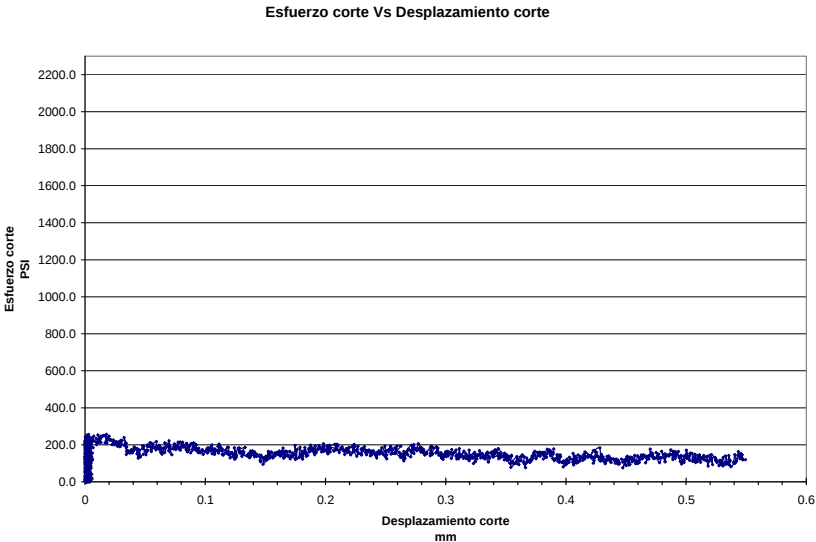


Fuente: Los Autores

En la figura 86 se observa la gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento de corte. En la figura 87 se observa la gráfica de esfuerzo de corte contra tiempo. Por último, se observa en la figura 88 el comportamiento

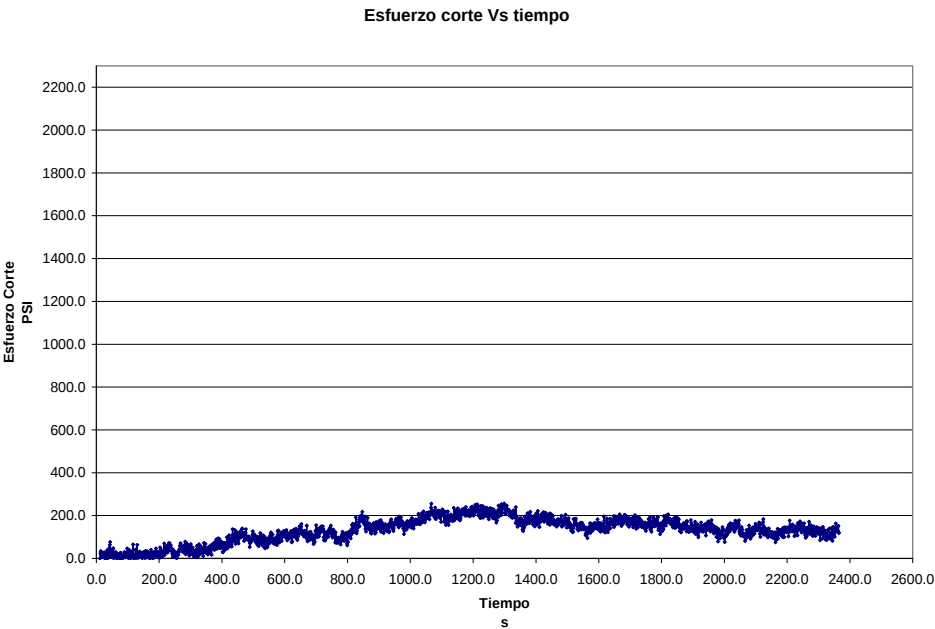
de la presión de confinamiento y el desplazamiento del pistón de confinamiento contra el tiempo.

Figura 86. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte en CCS CDI 02



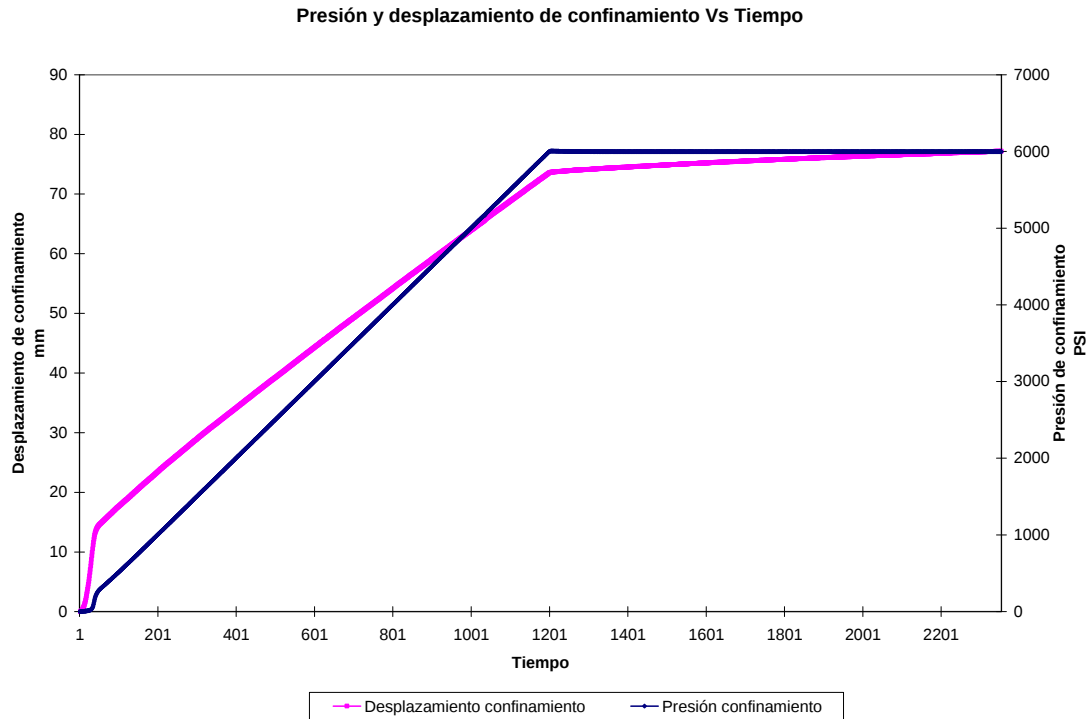
Fuente: Los Autores

Figura 87. Esfuerzo de corte Vs tiempo de corte en CCS CDI 02



Fuente: Los Autores

Figura 88. Presión de confinamiento Vs tiempo en CCS CDI 02



Fuente: Los Autores

5.3.3 Ensayo CCS CDI en la muestra Tambor 51b06

Teniendo como referencia las dos primeras pruebas realizadas, donde la chaqueta fallaba antes de llegar a la presión de confinamiento y por tanto la prueba no era satisfactoria, se decidió cambiar el diseño experimental en el montaje de la probeta. Para evitar la ruptura de la chaqueta se incorpora en el montaje una lámina de cobre de 0.5mm de espesor que recubre el montaje en el sector propenso a fallar. Se ajusta y sella el montaje inicialmente con una chaqueta termoencogible, posteriormente se ubica la lámina de cobre alrededor del montaje y por último se coloca la segunda chaqueta termoencogible. La silicona que recubre el montaje, se aplica de igual forma que en las dos primeras pruebas. En la imagen 89 se puede observar el

montaje listo para ensayar con la nueva lámina de cobre colocada en el montaje.

Figura 89. Montaje de la probeta



Fuente: Los Autores

Los parámetros del protocolo se conservan, presión máxima de confinamiento 6000PSI con tasa de ascenso de 50PSI/min y desplazamiento del pistón de carga axial 0.0005mm/s. Se inicia el ensayo incrementando la presión de confinamiento hasta llegar al valor constate. Transcurridos 600 segundos inicia un incremento en la carga axial, como se presentaba en las pruebas anteriores, aproximadamente a 4000PSI de presión de confinamiento, se cree que la chaqueta no resistió la presión y nuevamente ha fallado. Se continúo con la prueba incrementando la presión de confinamiento hasta 6000PSI constantes y posteriormente aplicando la carga axial, sin observarse incremento en el esfuerzo cortante mientras sí se registra un desplazamiento axial, lo que indica dos alternativas: la chaqueta falló y no permitió aplicar carga axial sobre la muestra, o ésta falló antes de aplicar la carga axial. Se culmina el ensayo 1700 segundos después de iniciado, sin observarse incremento en la carga axial.

Desmontada la probeta, no se observa fuga o falla de la chaqueta de aislamiento. La muestra de roca se encuentra fallada pero no por corte directo, la carga de corte nunca aumentó, indicando que la muestra no soportó carga alguna de corte. Analizando la falla de la muestra, se observó claramente que ésta había ocurrido por cizalla, debido a la carga normal y su efecto compresivo, lo que explica por qué no soportó carga de corte. En la figura 90 se puede observar la muestra de roca con la falla por cizalla a 45°, característica de este tipo de falla. También se observan unas pequeñas entalladuras, producto de la carga de corte.

Figura 90. Muestra de roca fallada por cizalla.



Fuente: Los Autores

Se concluye a partir de los resultados de esta prueba, que la presión de confinamiento de 6000PSI es muy alta, produciendo un esfuerzo normal sobre la muestra muy elevado, causando una falla por compresión y no por corte directo, afectando el correcto desarrollo de la prueba. Es necesario disminuir la presión de confinamiento hasta un valor seguro, por determinar experimentalmente, donde la muestra no falle por compresión, se mantenga un esfuerzo normal constante y se pueda aplicar carga axial que genere el corte directo.

Se puede observar en la figura 91 el montaje después de la prueba y la chaqueta sin falla.

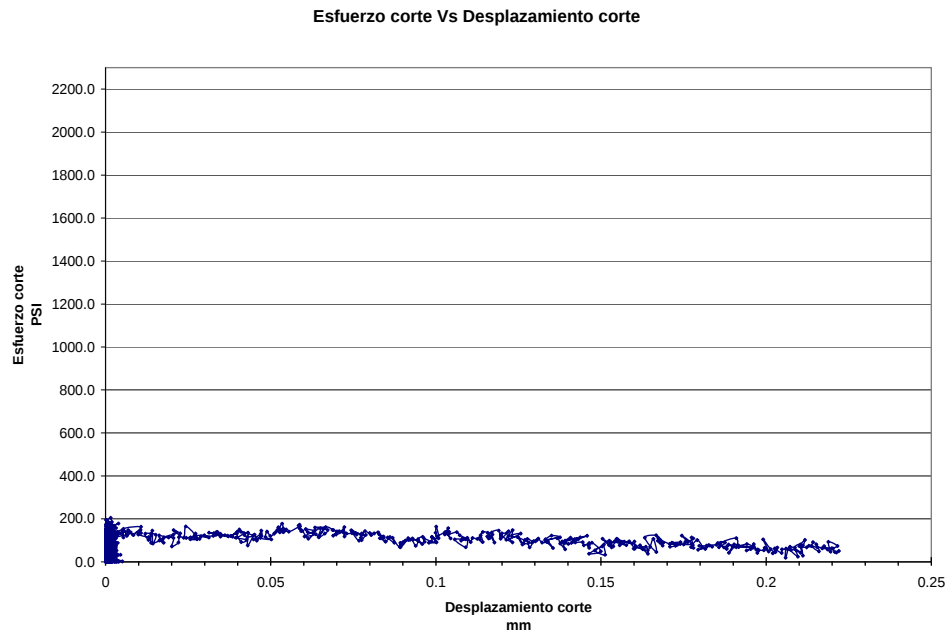
En la figura 92 se observa la gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento de corte. En la figura 93 se observa la gráfica de esfuerzo de corte contra tiempo. Por último, se observa en la gráfica 94 el comportamiento de la presión de confinamiento y el desplazamiento del pistón de confinamiento contra el tiempo.

Figura 91. Montaje después de la prueba



Fuente: Los Autores

Figura 92. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte en CCS CDI 03



Fuente: Los Autores

Figura 93. Esfuerzo de corte Vs tiempo de corte en CCS CDI 03

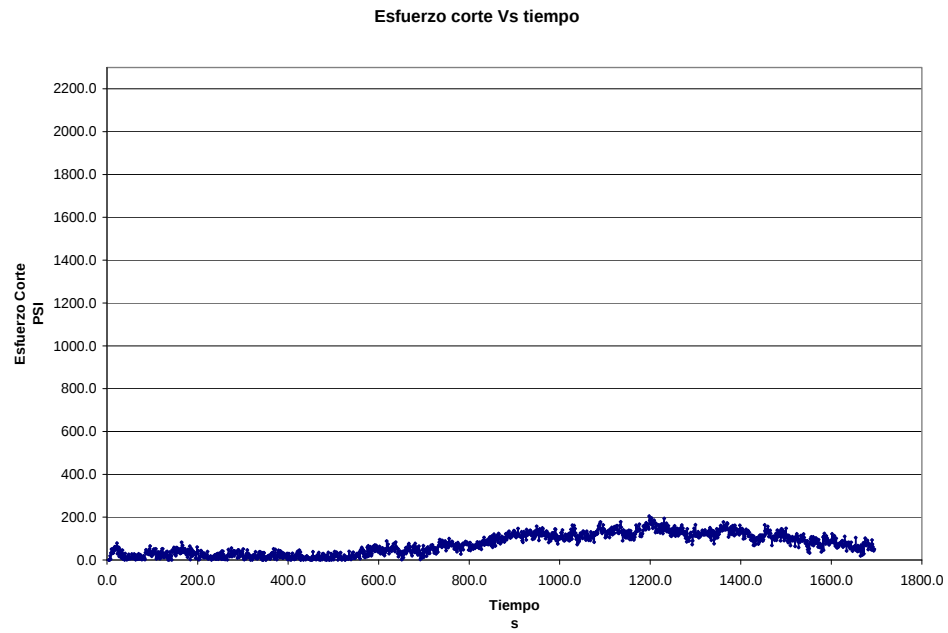
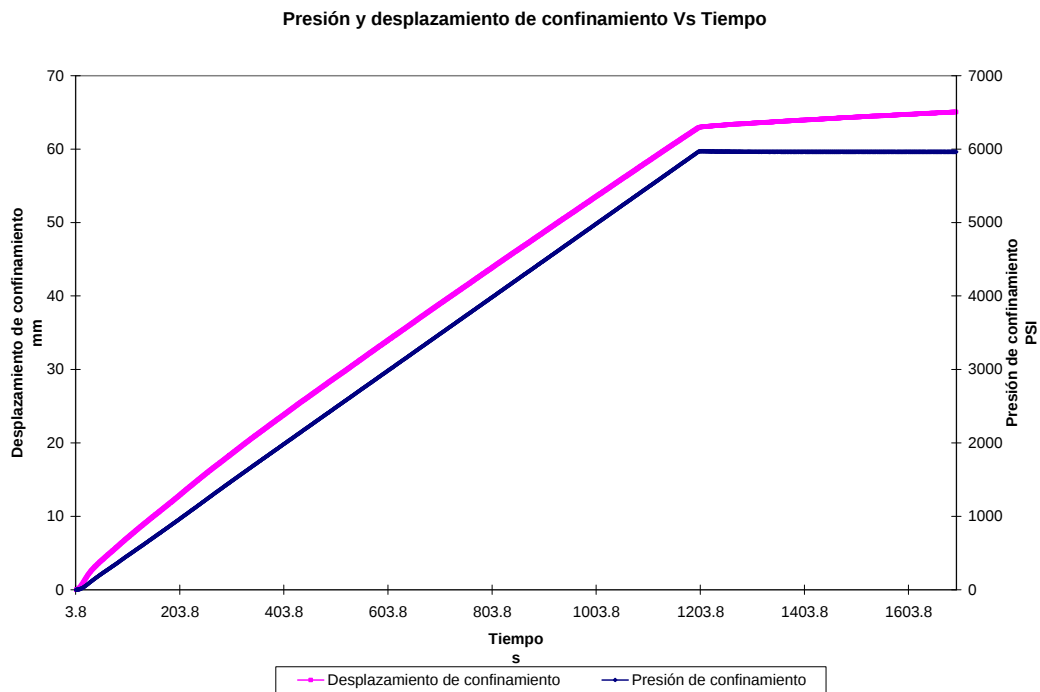


Figura 94. Presión de confinamiento Vs tiempo en CCS CDI 03



5.3.4 Ensayo CCS CDI en la muestra Tambor 08 III

Partiendo de la conclusión hallada en el ensayo anterior, se cambió el protocolo de ensayo para esta prueba. La presión de confinamiento máxima se disminuyó a 200PSI, asegurando que la muestra no falle por compresión. La tasa de aumento de presión de confinamiento se mantuvo a razón de 50PSI/min y se descartó el uso de la lámina de cobre debido a la posible influencia de la misma sobre los registros de desplazamiento del montaje debido a la rigidez del material.

Transcurridos 900 segundos de la prueba se observa un descenso en la presión de confinamiento, lo que produce un leve incremento (200PSI) en el esfuerzo de corte, se cree que esta caída de presión se debe a fallas en el sistema del equipo MTS. La prueba continúa hasta llegar a falla por corte directo al observarse una caída súbita de la carga de corte. La muestra falla a 2962PSI de esfuerzo cortante bajo un esfuerzo normal de 180PSI.

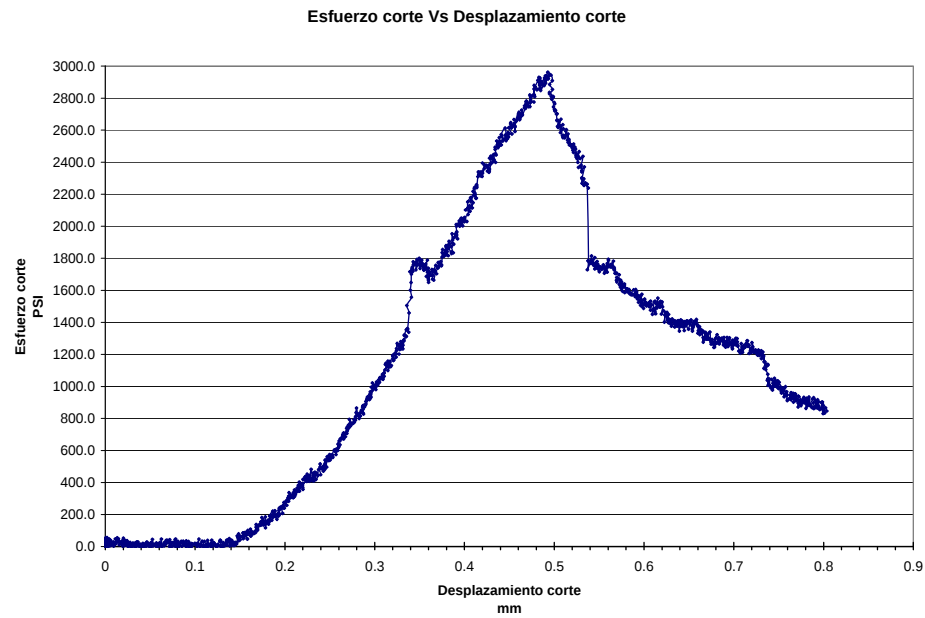
En la figura 95 se observa la muestra y el montaje después de la falla. En la figura 96 se observa la gráfica de esfuerzo de corte contra desplazamiento de corte. En la figura 97 se observa la gráfica de esfuerzo de corte contra tiempo. Por último, se observa en la gráfica 98 el comportamiento de la presión de confinamiento y el desplazamiento del pistón de confinamiento contra el tiempo.

Figura 95. Muestra de roca fallada



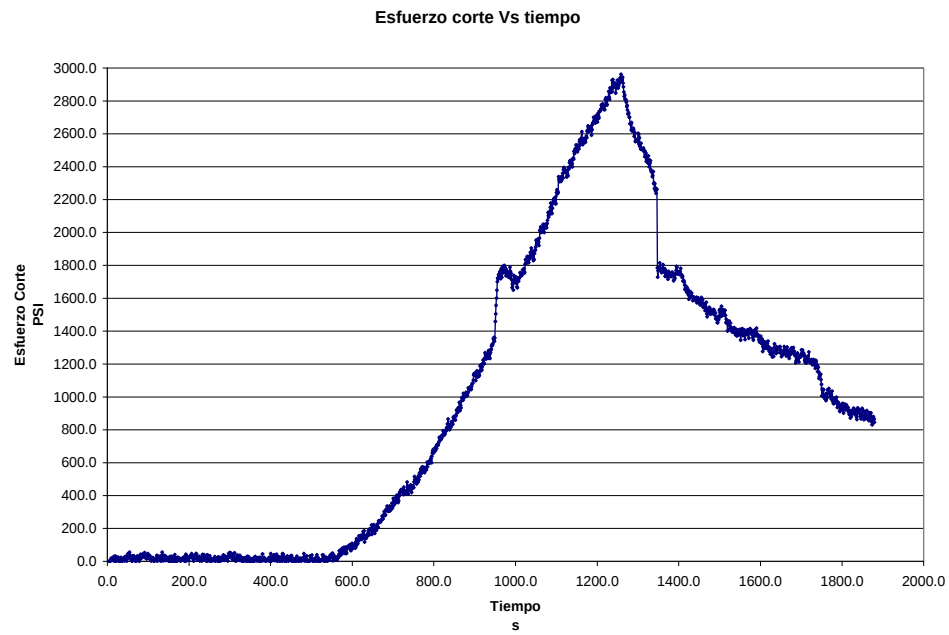
Fuente: Los Autores

Figura 96. Esfuerzo de corte Vs desplazamiento de corte en CCS CDI 04



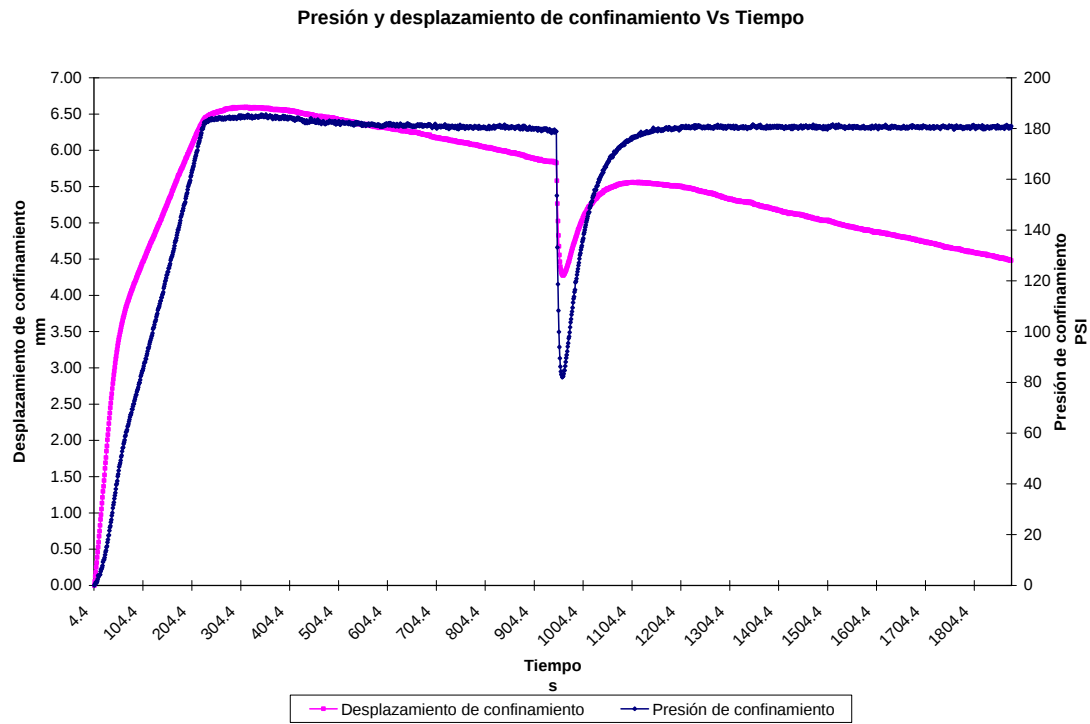
Fuente: Los Autores

Figura 97. Esfuerzo de corte Vs tiempo de corte en CCS CDI 04



Fuente: Los Autores

Figura 98. Presión de confinamiento Vs tiempo en CCS CDI 04



Fuente: Los Autores

5.4 RELACION ENTRE EL ENSAYO EXPERIMENTAL DE CORTE DIRECTO INCLINADO Y LOS ENSAYOS CONVENCIONALES

Para establecer la relación entre los ensayos experimentales realizados con el DCDI y los ensayos convencionales, se analizan dos parámetros estadísticos: la precisión y la exactitud.

La precisión permite conocer el grado de confianza con que se puede repetir el experimento y que éste pueda dar los mismos resultados, también conocida como repetibilidad. La precisión se determina evaluando el porcentaje de error entre los valores de esfuerzo cortante máximo de cada prueba.

La exactitud, es el grado de concordancia entre el resultado de un ensayo y el valor referencia aceptado, que para el caso de esta relación, son los datos de ensayos convencionales triaxiales, realizados en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP y los datos de ensayos normalizados por la ASTM en su norma D7012 para el caso de datos en la formación geológica Berea. La exactitud se evalúa calculando el porcentaje de error entre los valores de resistencia máxima al corte y los valores de resistencia al corte máximo obtenidos a partir de las envolventes de falla múltiple en pruebas triaxiales.

5.4.1 Precisión del ensayo de CDI utilizando el DCDI.

La precisión se evalúa en cuatro formaciones geológicas diferentes como son: Tambor 51, Tambor 08, Tambor AC y Berea. En cada una de ellas se efectuaron mínimo 3 ensayos manteniendo el protocolo y diseño experimental planteados en el capítulo 4. Los resultados de las pruebas individuales se pueden observar en el capítulo 5.2. A continuación se describe para cada formación geológica cómo se obtiene el porcentaje de

error entre los datos de resistencia máxima al corte y su valor, para establecer la precisión del ensayo.

Ensayos en formación Tambor 51

Para conocer el porcentaje de error entre los datos de resistencia máxima al corte se realiza la siguiente tabla (tabla 10), donde se ingresan los valores de esfuerzo máximo al corte y esfuerzo máximo normal de cada prueba, posteriormente se calcula: la desviación estándar de los datos, el promedio de los mismos y por último el cálculo del porcentaje de error.

Tabla 10. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor 51.

Precisión o repetibilidad			
Muestra	Esfuerzo N	Esfuerzo C	
51a_01	18196	21685	
51a_02	23521	28031	
51a_03	23034	27451	

Esfuerzo	Desviación	Promedio	% de error
Esfuerzo C	3508.46831	25722	13.64
Esfuerzo N	2943.95447	21584	13.64

Fuente: Los Autores

Las ecuaciones respectivas para el cálculo de la desviación estándar, el promedio y el porcentaje de error son en su orden respectivo las siguientes:

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (20)$$

Donde $\bar{x}$ es la media muestral promedio y n el tamaño de la muestra

$$AVERAGE = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (21)$$

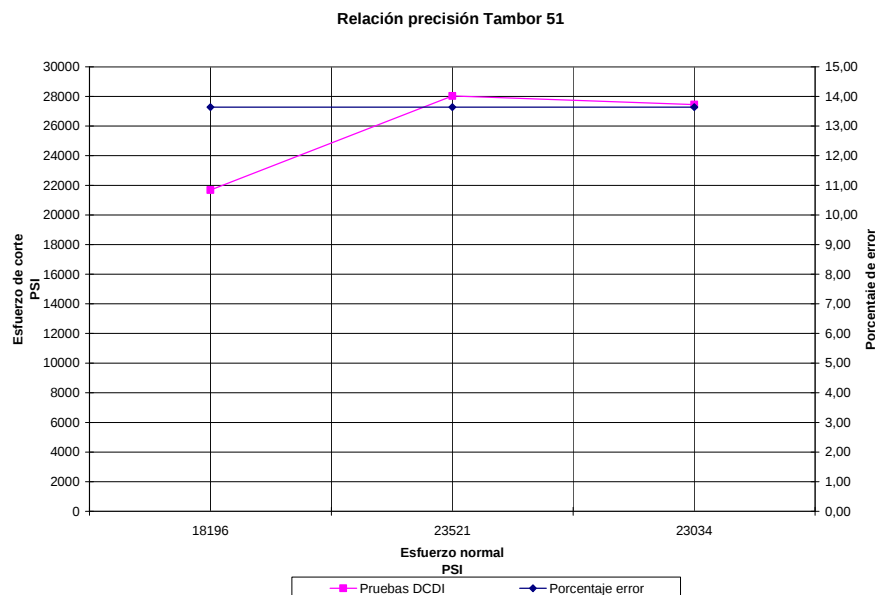
Donde $\bar{x}$ es la media muestral y n el tamaño de la muestra

$$\%error = \frac{STDEV}{AVERAGE} * 100 \quad (22)$$

Para los tres ensayos efectuados en la formación Tambor 51, se obtuvo una desviación estándar de 3508, un promedio de 25722PSI y finalmente un porcentaje de error de 13.64%. Todos calculados con el esfuerzo máximo al corte. El valor de porcentaje de error es bajo, teniendo en cuenta que el diseño es experimental y la técnica de ensayo no convencional. El porcentaje de error máximo permisible para asegurar la repetibilidad de un ensayo en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP es del 8%. Buscando reducir este porcentaje de error, se realizaron 3 grupos de ensayos adicionales, en formaciones geológicas diferentes, para encontrar la variable que permita reducir dicho porcentaje.

En la gráfica 99 se observa la relación entre los esfuerzos cortante y normal con el respectivo porcentaje de error, permitiendo conocer la precisión del ensayo.

Figura 99. Precisión para los ensayos en la formación Tambor 51



Fuente: Los Autores

Ensayos en formación Tambor 08

Aplicando el mismo procedimiento de cálculo del ensayo anterior, se halla el porcentaje de error entre los datos de resistencia máxima al corte en las diferentes pruebas realizadas en la formación Tambor 08.

Tabla 11. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor 08.

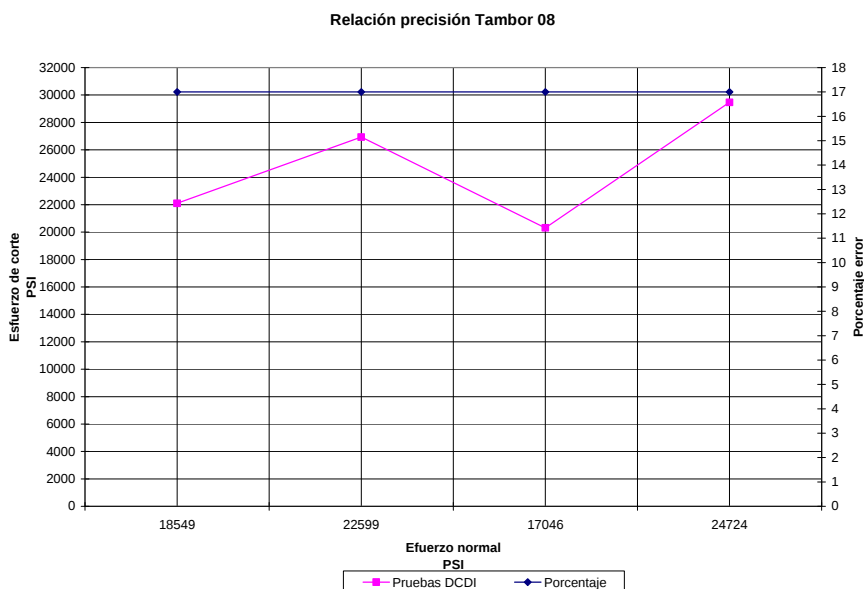
Precisión o repetibilidad		
Muestra	Esfuerzo N	Esfuerzo C
Tambor 08 I	18549	22106
Tambor 08 II	22599	26932
Tambor 08 V	17046	20314
Tambor 08 VI	24724	29465
Tambor 08 III 90°	180	2963

Esfuerzo	Desviación	Promedio	% de error
Esfuerzo C	4229.104294	24704	17.12
Esfuerzo N	3548.639853	20729	17.12

Fuente: Los Autores

Para los 4 ensayos realizados en la formación Tambor 08 se obtuvo una desviación estándar de 4229, un esfuerzo de corte promedio de 24704PSI y finalmente un porcentaje de error de 17.12%. En la gráfica 100 se observa la relación entre los esfuerzos cortante y normal con el respectivo porcentaje de error, permitiendo conocer la precisión del ensayo.

Figura 100. Precisión para los ensayos en la formación Tambor 08



Fuente: Los Autores

El porcentaje de error aumentó, debido a la dispersión de los valores en la geometría de las muestras. El diámetro no se mantuvo dentro de las tolerancias del protocolo, por tanto el porcentaje de error aumentó.

Ensayos en formación Tambor AC

Manteniendo el procedimiento de cálculo de las pruebas anteriores se tiene para la formación Tambor AC los siguientes resultados:

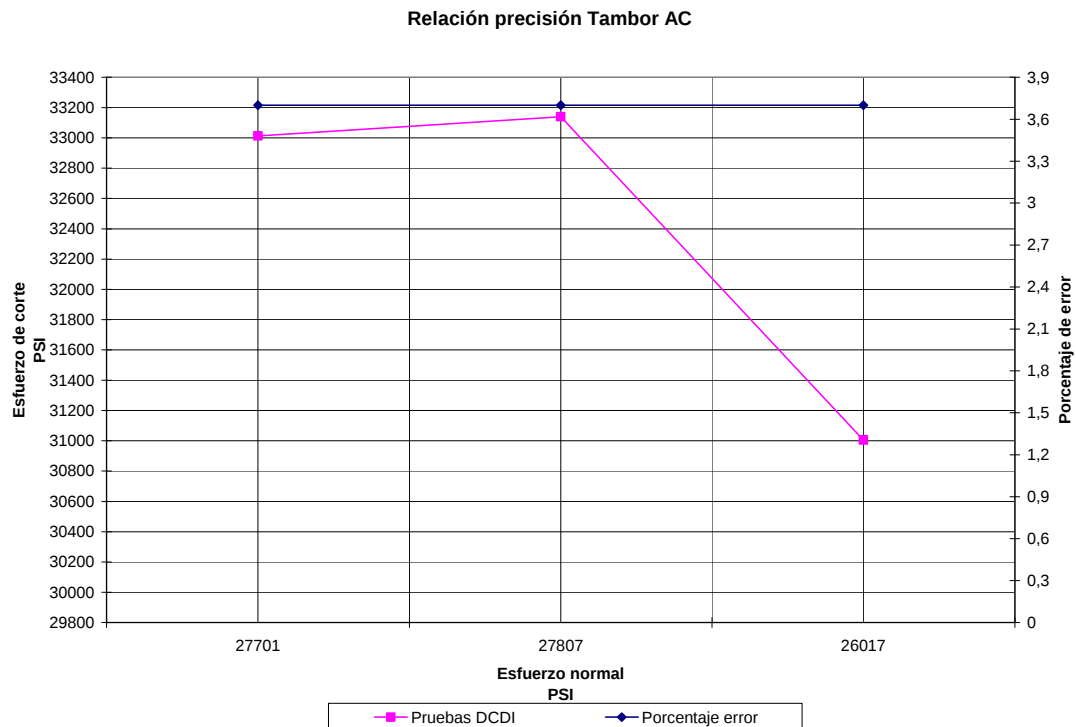
Tabla 12. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor AC.

Precisión o repetibilidad		
Muestra	Esfuerzo N	Esfuerzo C
A1	27701	33013
A2	27807	33139
A3	26017	31005

Esfuerzo	Desviación	Promedio	% error
Esfuerzo C	1197.36915	32386.0	3.70
Esfuerzo N	1004.71201	27175.1	3.70

Para los 3 ensayos realizados en la formación Tambor AC se obtuvo una desviación estándar de 1197, un esfuerzo de corte promedio de 32386PSI y finalmente un porcentaje de error de 3.7%. En la gráfica 101 se observa la relación entre los esfuerzos cortante y normal con el respectivo porcentaje de error, permitiendo conocer la precisión del ensayo.

Figura 101. Precisión para los ensayos en la formación Tambor AC



Fuente: Los Autores

El porcentaje de error disminuyó, debido al control realizado en la geometría de las muestras, se cumplió a cabalidad con lo establecido en el protocolo, 0.025mm de tolerancia en el diámetro, altura y planitud del montaje, indicando esta prueba, que las variables geométricas, (mayormente el diámetro) son la principales influencias, en la precisión del ensayo.

Ensayos en formación Berea

Efectuados los ensayos en las formaciones Tambor 51, Tambor 08 y Tambor AC, con los que se logró determinar que la geometría de la muestra es el factor determinante para obtener alta precisión en los ensayos, se procede a realizar pruebas en la formación Berea, mundialmente caracterizada y que servirá como referente para conocer la precisión y exactitud del DCDI. A continuación en la tabla 13 se observan los valores calculados de desviación estándar, promedio y porcentaje de error

Tabla 13. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor AC.

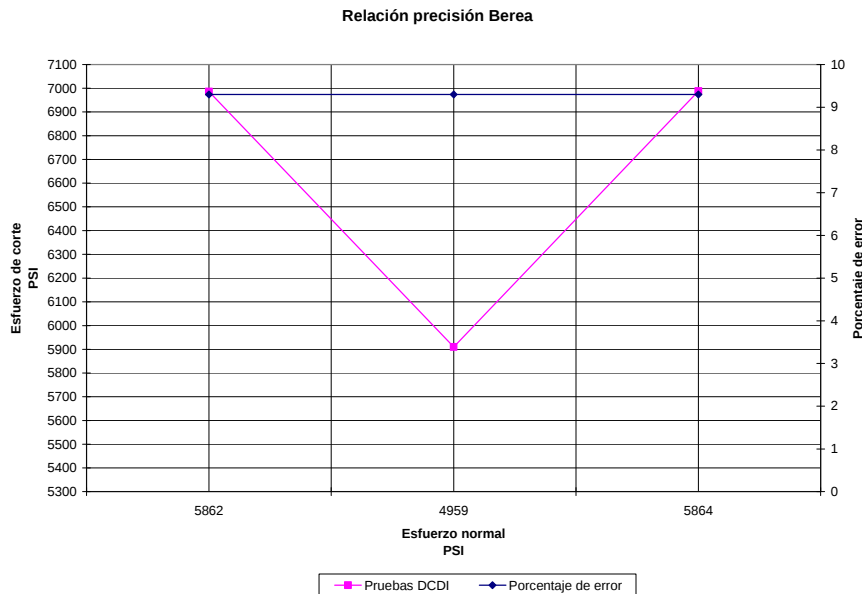
Presicion o repetibilidad			
Muestra	Esfuerzo N	Esfuerzo C	
Berea B1	5862	6986	
Berea B3	4959	5910	
Berea B2	5864	6988	

Esfuerzo	Desviacion	Promedio	% de error
Esfuerzo C	621.9371468	6628	9.38
Esfuerzo N	521.8672305	5562	9.38

Fuente: Los Autores

Para los ensayos realizados en la formación Berea se obtuvo una desviación estándar de 621.9, un esfuerzo de corte promedio de 6628PSI y finalmente un porcentaje de error de 9.38%. En la gráfica 102 se observa la relación entre los esfuerzos cortante y normal con el respectivo porcentaje de error, permitiendo conocer la precisión del ensayo

Figura 102. Precisión para los ensayos en la formación Berea



Fuente: Los Autores

Se tiene entonces un porcentaje de error de 9.37%, respecto a la precisión para los ensayos de la formación Berea. Esto indica una alta repetibilidad en el ensayo y en el DCDI, aun el porcentaje de error se encuentra por debajo del requerido por el laboratorio de mecánica de rocas del ICP. Se debe continuar en el ajuste del montaje, protocolo y diseño experimental para disminuir la repetibilidad del ensayo, al valor requerido y aprobado en el laboratorio.

5.4.2 Exactitud del ensayo CDI utilizando el DCDI

De forma similar como se calculó la precisión del DCDI, se efectúa el cálculo de la exactitud del dispositivo en las mismas formaciones geológicas ensayadas. En este caso, para obtener la relación de exactitud, se comparan los valores de esfuerzo cortante máximos obtenidos con el DCDI y los valores de esfuerzo cortante obtenidos a partir de la envolvente de falla en pruebas triaxiales convencionales realizadas en el laboratorio. Se calculan dos porcentajes de error: el primero producto de la relación entre los resultados

del DCDI y la envolvente de falla alta y el segundo entre el esfuerzo obtenido con el DCDI y el esfuerzo de la envolvente de falla baja. Estos porcentajes de error permitirán conocer la exactitud del ensayo con el DCDI, al comparar los datos experimentales con datos de pruebas convencionales.

A continuación se muestra el cálculo de cada porcentaje de error en las diferentes formaciones ensayadas.

Ensayos en formación Tambor 51

Para realizar el cálculo del porcentaje de error que permita conocer la relación de exactitud, se elabora inicialmente una tabla, (tabla 14) donde se ingresan los valores de esfuerzo normal y cortante de cada prueba efectuada y su correspondiente valor calculado de esfuerzo cortante para la envolvente de falla.

Para el cálculo del esfuerzo cortante correspondiente a cada envolvente de falla, se utilizan las siguientes ecuaciones de la envolvente de falla:

Ecuación para la envolvente de falla baja de la formación Tambor 51, determinada a partir de ensayos triaxiales en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP

$$\tau = 0.99 * \sigma + 5029 \quad (23)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante y σ el esfuerzo normal

Ecuación para la envolvente de falla alta de la formación Tambor 51

$$\tau = 0.68 * \sigma + 10159 \quad (24)$$

Conocidas las ecuaciones de las envolventes de falla, se calcula el valor de esfuerzo cortante para cada valor de esfuerzo normal de las pruebas experimentales. Los valores correspondientes se ingresan en la tabla 14.

Tabla 14. Ingreso de datos y cálculo de esfuerzos formación Tambor 51

Exactitud		
Muestra	Esfuerzo N	Esfuerzo C
51a_01	18196	21685
51a_02	23521	28031
51a_03	23034	27451
Envolvente Baja 01	18196	23080
Envolvente Baja 02	23521	28362
Envolvente Baja 03	23034	27879
Envolvente Alta 01	18196	22623
Envolvente Alta 02	23521	26270
Envolvente Alta 03	23034	25937

Fuente: Los Autores

Para hallar el porcentaje de error, se calcula la desviación estándar entre el valor de esfuerzo cortante de la prueba y el valor calculado de la envolvente de falla. Posteriormente se promedian estos dos valores de esfuerzo para finalmente calcular el porcentaje de error, siendo este último el cociente entre la desviación estándar y el promedio, multiplicado por 100. En la tabla 15 se observan los datos del respectivo cálculo.

Tabla 15. Cálculo del porcentaje de error en la formación Tambor 51.

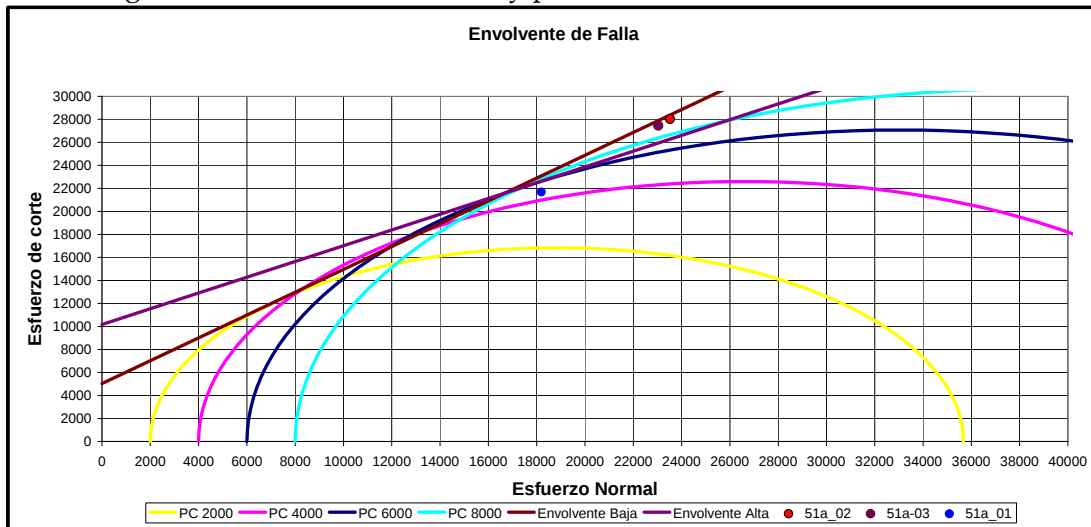
Relacion de esfuerzos	Desviacion	Promedio	% de error	promedio % error
Esfuerzo C 51a_01 Vs baja	986.210261	22382	4.41	2.11
Esfuerzo C 51a_02 Vs baja	234.059639	28196	0.83	
Esfuerzo C 51a_03 Vs baja	302.771409	27665	1.09	
Esfuerzo C 51a_01 Vs alta	663.266704	22154	2.99	3.86
Esfuerzo C 51a_02 Vs alta	1244.93155	27150	4.59	
Esfuerzo C 51a_03 Vs alta	1070.61051	26694	4.01	

Fuente: Los Autores

En la última columna de la tabla 15 se encuentra el promedio de los porcentajes de error para cada grupo de pruebas respecto a las envolventes baja y alta. Esto con el fin de conocer la exactitud del ensayo experimental respecto a cada envolvente de falla.

En la figura 103, se observan las líneas de envolvente de falla determinadas a partir de los círculos de Mohr elaborados con los datos de pruebas triaxiales. Se observa de igual forma los tres puntos de falla obtenidos con el DCDI.

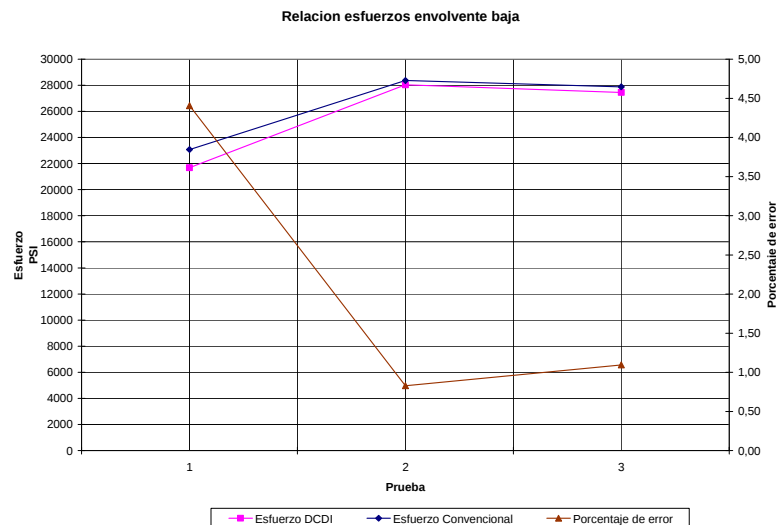
Figura 103. Envolvente de falla y puntos de falla hallados con el DCDI



Fuente: Los Autores

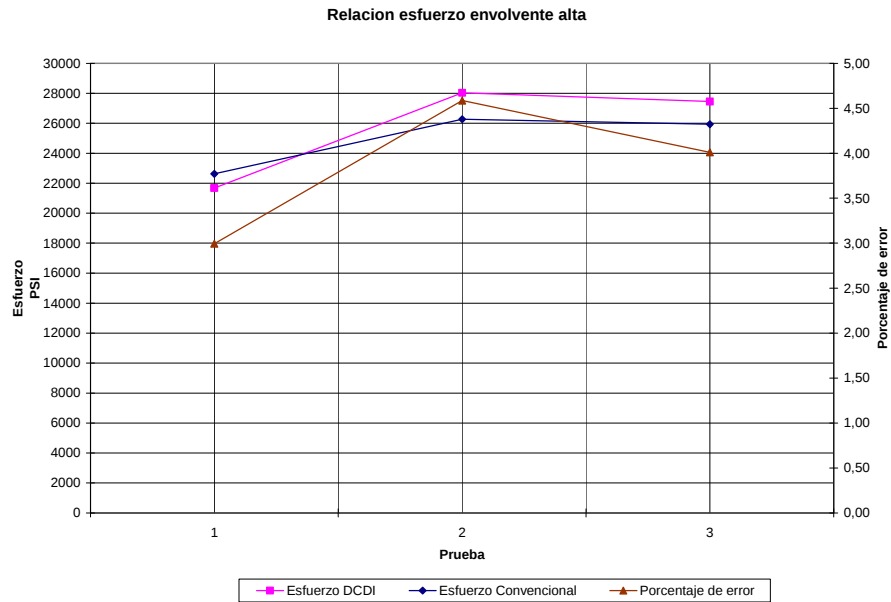
En la figura 104 se observan los valores de esfuerzo cortante de la prueba experimental y la prueba convencional (esfuerzos envolvente de falla baja) indicando el respectivo porcentaje de error entre ellos.

Figura 104. Porcentaje de error envolvente baja formación Tambor 51.



En la figura 105 se observan los valores de esfuerzo cortante de la prueba experimental y la prueba convencional (esfuerzos envolvente de falla alta) indicando el respectivo porcentaje de error entre ellos.

Figura 105. Porcentaje de error envolvente alta formación Tambor 51.



Fuente: Los Autores

Se concluye que el porcentaje de error en la exactitud de los ensayos realizados con el DCDI para la relación con la envolvente de falla baja es de 2.11% y de 3.86% para la relación con la envolvente de falla alta.

Todo el procedimiento mostrado anteriormente para el cálculo del porcentaje de error de los ensayos en la formación Tambor 51, se realiza en las siguientes formaciones ensayadas. A continuación se muestran los porcentajes de error para la exactitud de cada ensayo, excluyendo la metodología de cálculo mencionada anteriormente.

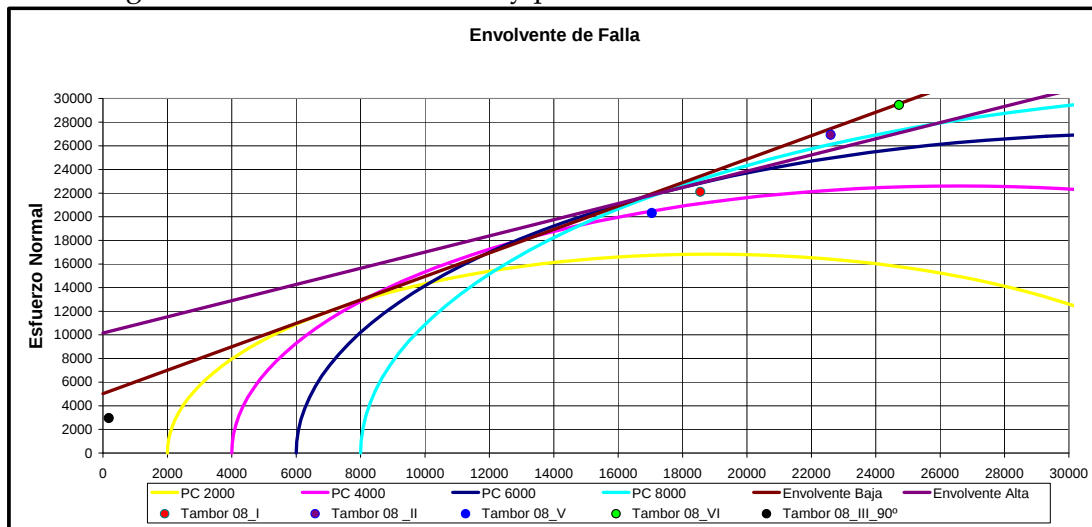
Ensayos en formación Tambor 08

En el análisis de la exactitud de los ensayos de esta formación, se incluye el resultado de la prueba realizada con el dispositivo prototipo de 90°. Es la única prueba realizada satisfactoriamente con el prototipo de 90°, por tanto

no se mencionó en el capítulo 5.4.1, precisión del ensayo, debido a que solo se cuenta con un dato.

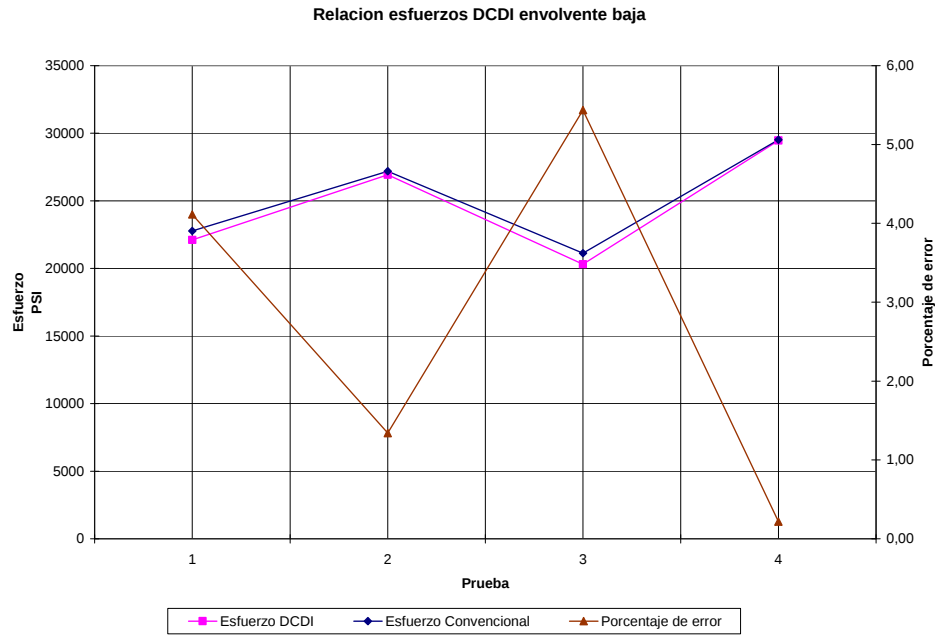
A continuación, se observan en la figura 106 las líneas de envolvente de falla determinadas a partir de los círculos de Mohr elaborados con los datos de pruebas triaxiales. Se observa de igual forma los 5 puntos de falla obtenidos con el DCDI, 4 de ellos con el prototipo 50° y uno con el prototipo de 90°. Esta gráfica permite observar la ubicación de los puntos de falla con el DCDI respecto a los puntos de falla de la envolvente, brindado ésto la posibilidad de tener una aproximación gráfica de la exactitud y precisión del ensayo en una sola gráfica. La cercanía entre los diferentes puntos de falla del DCDI, permite estimar la precisión del ensayo, y la cercanía entre los puntos de falla del DCDI comparados con los de la envolvente de falla, permiten estimar la exactitud del ensayo.

Figura 106. Envolvente de falla y puntos de falla hallados con el DCDI



En la figura 107 se observan los valores de esfuerzo cortante de la prueba experimental y la prueba convencional (esfuerzos envolvente de falla baja) indicando el respectivo porcentaje de error entre ellos.

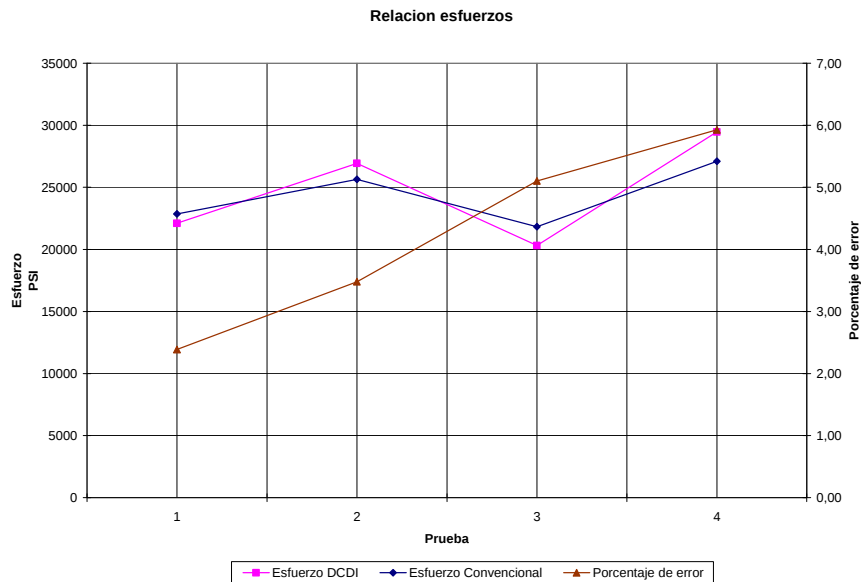
Figura 107. Porcentaje de error envolvente baja formación Tambor 08.



Fuente: Los Autores

En la figura 108 se observan los valores de esfuerzo cortante de la prueba experimental y la prueba convencional (esfuerzos en la envolvente de falla alta) indicando el respectivo porcentaje de error entre ellos.

Figura 108. Porcentaje de error envolvente alta formación Tambor 08.



Fuente: Los Autores

Los resultados indican un porcentaje de error, en la exactitud de los ensayos realizados con el DCDI (formación Tambor 08) para la relación con la envolvente de falla baja de 2.78% y de 4.22% para la relación con la envolvente de falla alta.

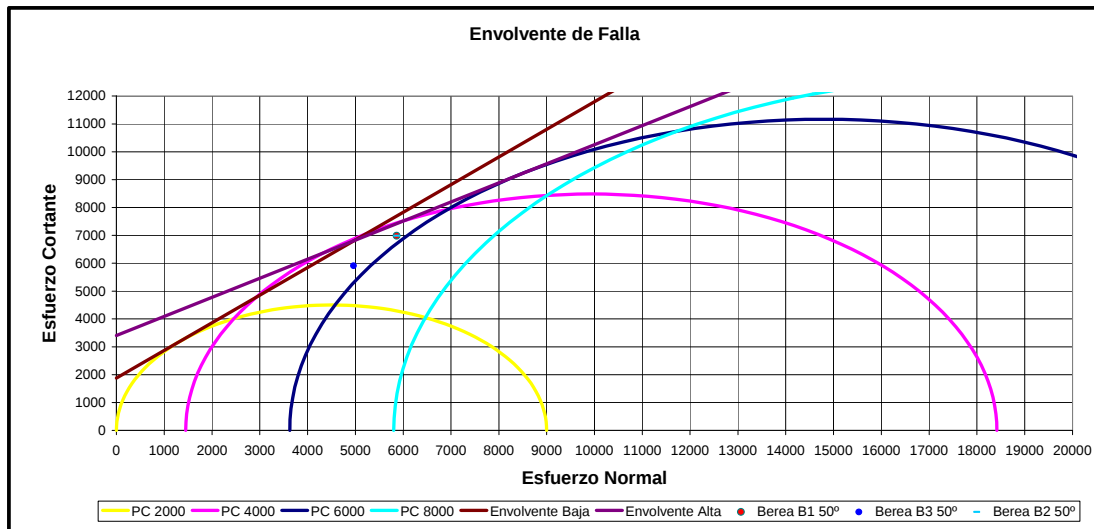
Para los resultados del ensayo efectuado con el prototipo de 90° se tiene un porcentaje de error de 38% respecto a la envolvente de falla baja y un porcentaje de error de 78% respecto a la envolvente de falla alta. Estos resultados demuestran que el prototipo de 90°, actualmente no permite caracterizar formaciones geológicas, caso contrario a los excelentes resultados obtenidos con el prototipo de 50°. Se debe continuar con la investigación para mejorar el diseño experimental de las pruebas efectuadas con el prototipo de 90°.

Ensayos en formación Berea

Manteniendo el procedimiento de cálculo de las pruebas anteriores se tiene:

La figura 109 muestra las líneas de envolvente de falla determinadas a partir de los círculos de Mohr elaborados con los datos de pruebas triaxiales. Se observa de igual forma los tres puntos de falla obtenidos con el DCDI

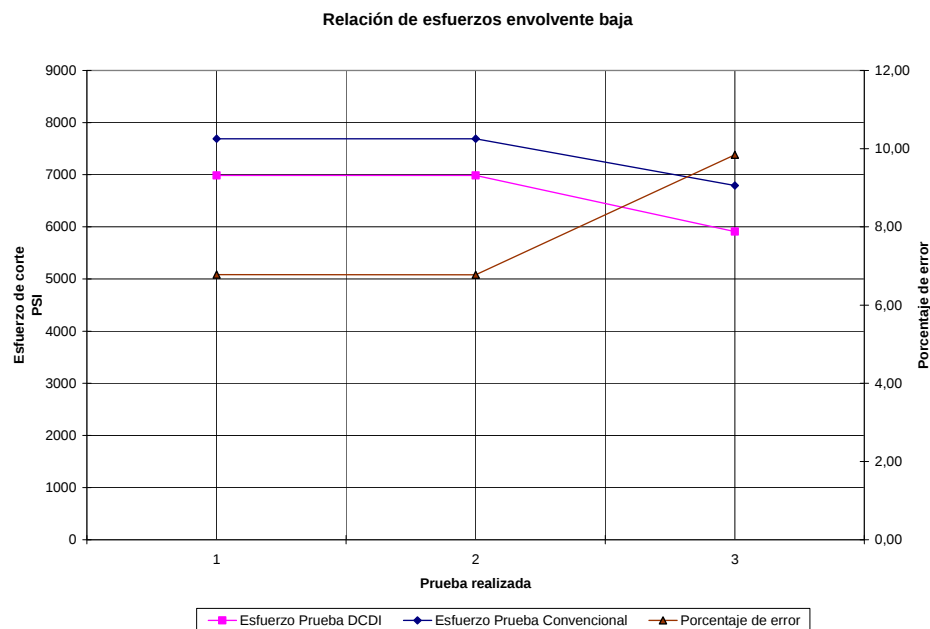
Figura 109 Envolvente de falla y puntos de falla hallados con el DCDI



Fuente: Los Autores

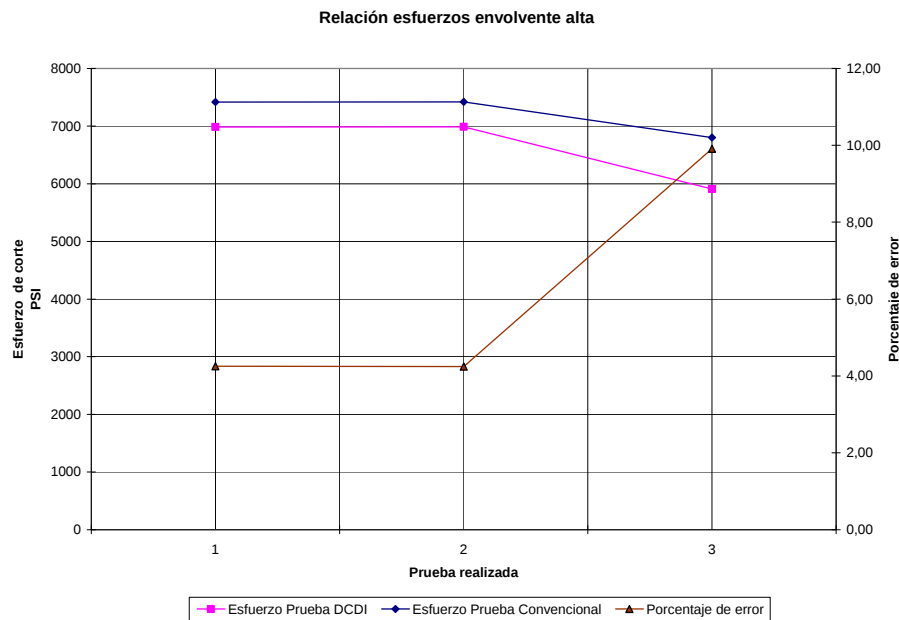
En la figura 110 se observan los valores de esfuerzo cortante de la prueba experimental con el DCDI y la prueba convencional (esfuerzos envolvente de falla baja) indicando el respectivo porcentaje de error entre ellos.

Figura 110. Porcentaje de error envolvente baja formación Barea.



En la figura 111 se observan los valores de esfuerzo cortante de la prueba experimental con el DCDI y la prueba convencional (esfuerzos envolvente de falla alta) indicando el respectivo porcentaje de error entre ellos.

Figura 111. Porcentaje de error envolvente alta formación Berea.



Fuente: Los Autores

El porcentaje de error para la formación Berea es de 7.8% en relación con la envolvente de falla baja y de 6.14% en relación con la envolvente de falla alta. Estos resultados indican que el DCDI permite caracterizar la formación Berea con una exactitud del 93.3%.

En conclusión se obtienen los siguientes valores promedio de precisión y exactitud para las pruebas realizadas con el DCDI:

Tabla 16. Precisión promedio

Precisión promedio ensayos DCDI	
% de error 10.9	Precisión de % 89.1

Fuente: Los Autores

Tabla 17. Exactitud promedio

Exactitud promedio ensayos DCDI	
% de error 4.4	Precisión de % 95.6

Fuente: Los Autores

Esto indica que la técnica experimental para ensayos de corte directo inclinado utilizando el DCDI tiene una precisión de 89.1% y una exactitud de 95.6%, conclusión deducida a partir de las 14 pruebas efectuadas, confirmándose así la hipótesis planteada al inicio de este trabajo de grado: “el dispositivo de corte directo inclinado, permitirá caracterizar mecánicamente formaciones geológicas sensibles” y de igual manera cumpliendo el objetivo general de esta tesis de grado.

CONCLUSIONES

Crear cuadros de control con las variables del código del modelo generado en ANSYS para la simulación de la muestra de roca, permitió realizar de manera ordenada, ágil y ajustada, las pruebas del comportamiento de la roca en el montaje y obtener así el ángulo apropiado para producir corte directo conforme al concepto de la norma ASTM D5607 - 08.

El diseño mecánico de los dispositivos cumplió con los requerimientos geométricos y de carga evaluados para la reproducción del fenómeno de corte directo bajo la particularidad de ser un montaje inclinado y adaptable al equipo MTS 815, seleccionando un acero inoxidable de alta resistencia y obteniendo un montaje estable y resistente a las condiciones de la prueba.

La definición de los protocolos para el montaje experimental permiten enmarcar los procedimientos técnicos necesarios para realizar el ensayo de corte directo inclinado en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP de forma estandarizada.

La preparación de las muestras tiene una marcada influencia en los resultados de las pruebas, y por esto se debe tener un control muy estricto con el procedimiento de corte durante la preparación de muestras, el corte eleva la temperatura en los granos de la muestra de roca, éstos pueden cambiar las propiedades mecánicas a evaluar y las tolerancias dimensionales deben estar en el rango establecido para no inducir errores en los datos obtenidos.

Realizar las pruebas de control de geometría con la formación Tambor AC, confirmó que el factor geométrico más relevante en la precisión y exactitud del dispositivo es el diámetro y que este debe estar dentro de la tolerancia permitida que se determinó en 0.05mm, para obtener una precisión superior a 96% como se presentó en los resultados de dicha prueba

En las pruebas efectuadas con la formación Berea, Tambor 08 y Tambor 51, se obtuvieron resultados de precisión de 95.6% y exactitud de 90% entre las pruebas normalizadas y la de corte directo inclinado, por lo cual para ser una técnica experimental supera las expectativas y se puede considerar un ensayo confiable.

El objetivo del proyecto de investigación de diseñar y construir un dispositivo para pruebas de corte directo inclinado en muestras de geometría no convencional que permitiera caracterizar las propiedades mecánicas de rocas se cumplió a cabalidad bajo los parámetros establecidos y se convierte en una técnica adicional para estudiar el comportamiento mecánico de rocas en el Instituto Colombiano del Petróleo.

RECOMENDACIONES

La holgura diametral en las cavidades de los endcap es superior a lo estipulado, debido al menor diámetro de las muestras y aunque éstas se acomodan bien, a pesar de eso se debe construir una broca que asegure un diámetro mayor en las muestras extraídas.

Se deberían construir dos montajes más para garantizar tres puntos de evaluación que permitan construir la recta característica de la roca, respecto del valor de resistencia máxima al corte y determinando el ángulo de fricción interna y factor de cohesión de ésta.

Se debe completar el desarrollo del procedimiento para extracción y limpieza para el área de corte del ICP en muestras obtenidas de pequeños fragmentos de la cara del pozo.

BIBLIOGRAFIA

CHARLES, Philippe. Rocks mechanics – Theoretical fundamentals. Editions technip. 1991

ABOUSLEIMAN, Y., Tran M. “Geomechanics Field and Laboratory Characterization of Woodford Shale” paper SPE 110120 presentado en Annual Technical Conference and Exhibition held in Anaheim, California, U.S.A., 11-14 November 2007.

ROA GARZON, Máximo. Introducción al Modelamiento por Elementos Finitos con ANSYS. Bogota 2007 Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

DESAY, Chandranat; CHISTIAN, John. Numerical methods in geotechnical engineering. Mc Graw Hill. 1991

JUVINALL, Robert . Engineering considerations of stress, strain, and strength. Universidad de Michigan. McGraw-Hill, 1967

GUTIÉRREZ, Humberto; SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill. 2004

NORTON, Robert L. Diseño de maquinas. Prentice Hall. 1999.

NORMA ASTM D4543 - 08 Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances

NORMA ASTM D7012-07 Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

NORMA ASTM D5607-08 Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force

ANEXOS

ANEXO A. PLANO DE PROTOTIPOS DISPOSITIVOS DE CORTE DIRECTO INCLINADO

Ver Plano “Dispositivos para pruebas de corte directo inclinado DCDI” adjunto en formato A3.

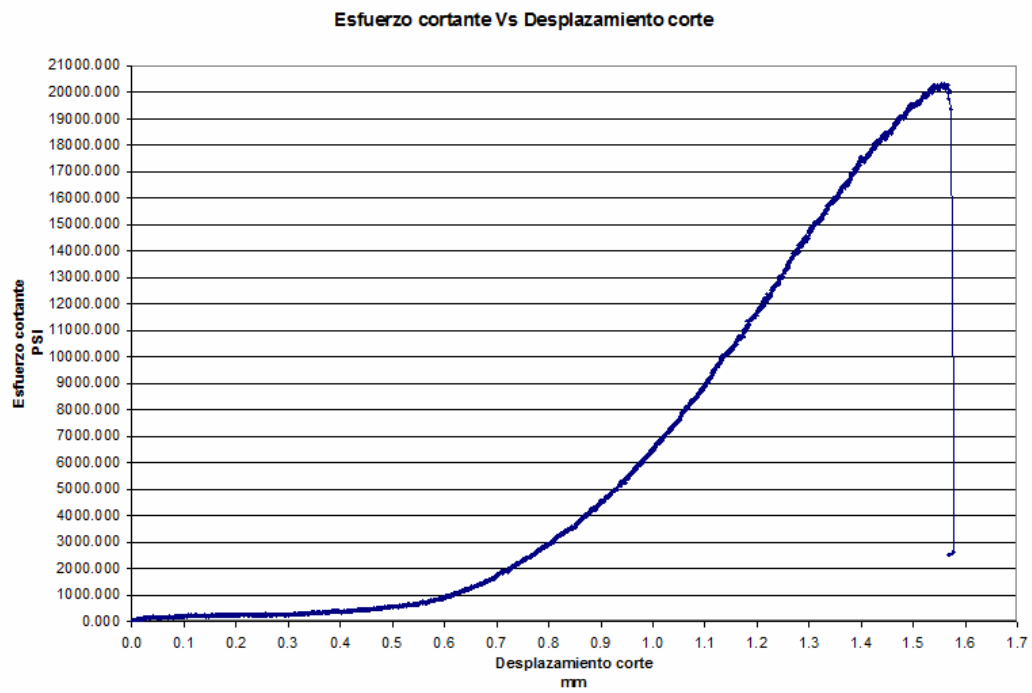
MTS793|MPT|ENU|1|2|.V|1|0|0|A

Operator Information		Specimen Characteristics
Responsable	Hernan Mantilla	
--- Specimen Characteristics ---	Ensayo CDI-08	
Age	Tambor 08 V	
Length	7.28	mm
Diameter	21.58	mm
Espesor de la chaqueta	0.5	mm
--- Additional Information ---		
Date of Test	Enero 20 de 2009	
Specific Gravity	0	unitless
Porosity	0	%
Permeability	0	unitless
Moisture Condition	Seca	
Temperature	19	deg. C
Other information	Ensayo de Corte Directo Inclinado 50°	
Operator Information End		

Data Acquisition					Time:
Time	Running Time	Axial Force	Axial Displacement		
Sec	Sec	kN	mm		
9.2756348	9.2724609	-2.2061899	82.02288		
10.275635	10.272461	-2.2019122	82.0237		
11.275635	11.272461	-2.1680582	82.02551		
12.275635	12.272461	-2.1877046	82.02342		
13.275635	13.272461	-2.1729963	82.0252		
14.275635	14.272461	-2.1459198	82.02701		
15.275635	15.272461	-2.0550597	82.02632		
16.275635	16.272461	-2.1064081	82.0277		
17.275635	17.272461	-2.0622087	82.02797		
18.275635	18.272461	-1.9992576	82.03008		
19.275635	19.272461	-2.0155108	82.02547		
20.275635	20.272461	-2.0249505	82.02845		
21.275635	21.272461	-1.9656285	82.02871		
22.275635	22.272461	-2.0344968	82.03005		
23.275635	23.272461	-2.0189574	82.03016		
24.275635	24.272461	-1.9564924	82.03606		
25.275635	25.272461	-1.9491622	82.03363		
26.275635	26.272461	-2.0214398	82.03057		
27.275635	27.272461	-1.9823078	82.03397		
28.275635	28.272461	-1.9039665	82.03486		
29.275635	29.272461	-1.9453906	82.03318		
30.275635	30.272461	-1.90329	82.0333		
31.275635	31.272461	-2.0018198	82.03515		
32.275635	32.272461	-1.9774228	82.03582		
33.275635	33.272461	-1.9622724	82.03478		
34.275635	34.272461	-1.9369524	82.03822		
35.275635	35.272461	-1.8962914	82.03718		

Time	Running Time	Axial Force	Axial Force	Axial Displacement	Axial Displacement	Fn	Fc
Sec	Sec	kN	kN	mm	mm	kN	kN
9.275635	9.272461	-2.20619	0	82.022881	0	0	0
10.27564	10.27246	-2.201912	0.004278	82.023697	0.000816	0.00275	0.003277
11.27564	11.27246	-2.168058	0.038132	82.025513	0.002632	0.024511	0.029211
12.27564	12.27246	-2.187705	0.018485	82.023422	0.000541	0.011882	0.014161
13.27564	13.27246	-2.172996	0.033194	82.0252	0.002319	0.021336	0.025428
14.27564	14.27246	-2.14592	0.06027	82.027008	0.004127	0.038741	0.04617
15.27564	15.27246	-2.05506	0.15113	82.026321	0.00344	0.097145	0.115772
16.27564	16.27246	-2.106408	0.099782	82.027695	0.004814	0.064139	0.076437
17.27564	17.27246	-2.062209	0.143981	82.027969	0.005088	0.092549	0.110296
18.27564	18.27246	-1.999258	0.206932	82.030083	0.007202	0.133014	0.158519
19.27564	19.27246	-2.015511	0.190679	82.025467	0.002586	0.122566	0.146069
20.27564	20.27246	-2.024951	0.181239	82.02845	0.005569	0.116498	0.138837
21.27564	21.27246	-1.965629	0.240561	82.028709	0.005828	0.15463	0.184281
22.27564	22.27246	-2.034497	0.171693	82.030052	0.007171	0.110362	0.131525
23.27564	23.27246	-2.018957	0.187233	82.030159	0.007278	0.120351	0.143428
24.27564	24.27246	-1.956492	0.249698	82.036064	0.013183	0.160502	0.191279
25.27564	25.27246	-1.949162	0.257028	82.03363	0.010749	0.165214	0.196895
26.27564	26.27246	-2.02144	0.18475	82.030571	0.00769	0.118755	0.141527
27.27564	27.27246	-1.982308	0.223882	82.033966	0.011085	0.143909	0.171504
28.27564	28.27246	-1.903967	0.302223	82.034859	0.011978	0.194265	0.231517

Esfuerzo n	Esfuerzo c	Desplazamiento axial	Desplazamiento corte	Esfuerzo n	Esfuerzo c
Pa	Pa	mm	mm	PSI	PSI
0.00000E+00	0.00000E+00	0.0	0.0000000	0.000	0.000
7.51770E+03	8.95925E+03	0.0	0.0010652	1.090	1.299
6.70133E+04	7.98633E+04	0.0	0.0034358	9.719	11.583
3.24864E+04	3.87158E+04	0.0	0.0007062	4.712	5.615
5.83350E+04	6.95209E+04	0.0	0.0030272	8.461	10.083
1.05920E+05	1.26230E+05	0.0	0.0053874	15.362	18.308
2.65599E+05	3.16528E+05	0.0	0.0044906	38.522	45.909
1.75358E+05	2.08984E+05	0.0	0.0062842	25.434	30.311
2.53035E+05	3.01555E+05	0.0	0.0066419	36.700	43.737
3.63666E+05	4.33401E+05	0.0	0.0094015	52.745	62.860
3.35103E+05	3.99360E+05	0.0	0.0033758	48.603	57.922
3.18513E+05	3.79589E+05	0.0	0.0072698	46.197	55.055
4.22767E+05	5.03834E+05	0.0	0.0076079	61.317	73.075
3.01736E+05	3.59595E+05	0.0	0.0093611	43.763	52.155
3.29046E+05	3.92141E+05	0.0	0.0095008	47.724	56.875
4.38823E+05	5.22968E+05	0.0	0.0172092	63.646	75.850
4.51705E+05	5.38321E+05	0.0	0.0140318	65.514	78.077
3.24683E+05	3.86942E+05	0.0	0.0100386	47.091	56.121
3.93454E+05	4.68900E+05	0.0	0.0144704	57.066	68.008
5.31132E+05	6.32979E+05	0.0	0.0156362	77.034	91.806



FOTOGRAFIAS



ANEXO C. FORMATO PARA EL REPORTE DE RESULTADOS EN PRUEBAS DE CORTE DIRECTO INCLINADO CON EL DCDI 90°

MTS793|MPT|ENU|1|2|.|1|1|0|0|A

Operator Information			Specimen Characteristics	
Responsible	Javier Reyes			
--- Specimen Characteristics ---				
Age	Tambor 08 III			
Length	7.42	mm		
Diameter	21.44	mm		
Jacket Thickness	0.5	mm		
--- Additional Information ---				
Date of Test	15 de Enero de 2009			
Specific Gravity	2.622	unitless		
Porosity	9.4	%		
Permeability	4.4	unitless		
Moisture Condition	seca			
Temperature	19.2	deg. C		
Item3	CCS CDI Pc 200 Psi			
Item1	Doble Chaqueta			
Operator Information End				

Data Acquisition

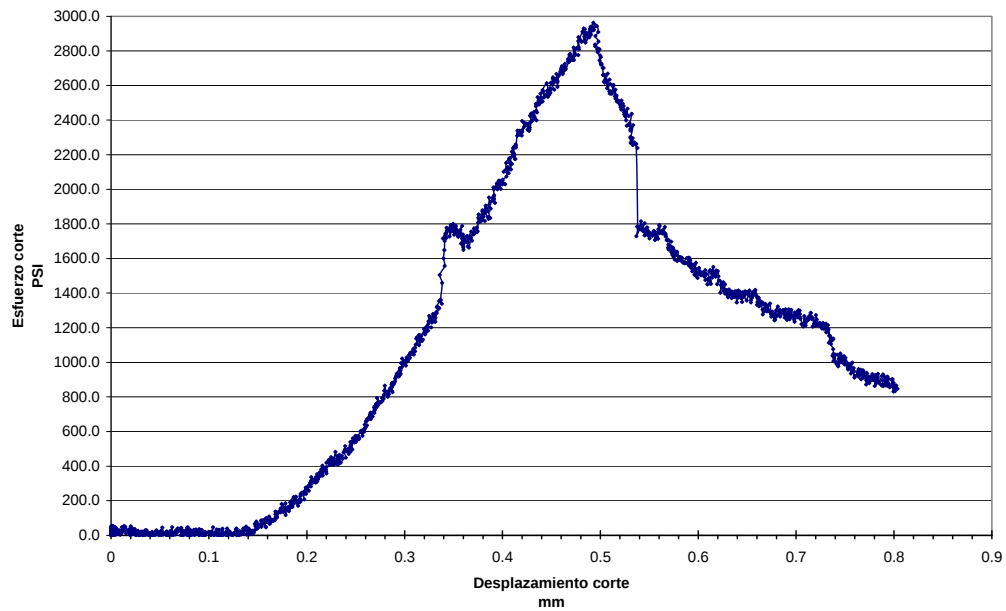
Time	Running Time	Confining P	Confining P	Axial Displacement	Axial Force
Sec	Sec	mm	psi	mm	kN
4.418457	4.4152832	1.039603	19.70736	79.46936	-2.2350099
5.418457	5.4152832	1.096014	19.44327	79.469978	-2.243757
6.418457	6.4152832	1.164229	20.39681	79.469772	-2.241168
7.418457	7.4152832	1.220195	20.92322	79.469093	-2.2285533
8.418457	8.4152832	1.290452	20.90496	79.469353	-2.2478058
9.418457	9.4152832	1.353859	20.81751	79.471855	-2.2819195
10.418457	10.415283	1.427632	21.47309	79.468887	-2.206094
11.418457	11.415283	1.497238	22.17493	79.46946	-2.1872039
12.418457	12.415283	1.568147	23.63588	79.467773	-2.1931331
13.418457	13.415283	1.636672	23.14595	79.468132	-2.2500417
14.418457	14.415283	1.717665	23.70772	79.469719	-2.1966436
15.418457	15.415283	1.789847	23.92751	79.46843	-2.1657941
16.418457	16.415283	1.867339	23.9776	79.468826	-2.2282283
17.418457	17.415283	1.948401	25.18517	79.470322	-2.1708708
18.418457	18.415283	2.015373	25.92655	79.473183	-2.1905227
19.418457	19.415283	2.093664	26.25364	79.470566	-2.3164608
20.418457	20.415283	2.175273	26.76223	79.468498	-2.2009268
21.418457	21.415283	2.254267	27.50268	79.47139	-2.2338538
22.418457	22.415283	2.334927	28.94682	79.471329	-2.2126038
23.418457	23.415283	2.407389	29.72018	79.469109	-2.2825694
24.418457	24.415283	2.486131	29.88076	79.469543	-2.2676907
25.418457	25.415283	2.563265	30.65487	79.469589	-2.1946673
26.418457	26.415283	2.653171	31.79181	79.468521	-2.2994514
27.418457	27.415283	2.73133	32.89371	79.468719	-2.2272909
28.418457	28.415283	2.802498	33.5064	79.469849	-2.2638497
29.418457	29.415283	2.892739	34.78183	79.469131	-2.2395594
30.418457	30.415283	2.963983	35.20415	79.4692	-2.2399216
31.418457	31.415283	3.049483	36.69512	79.472862	-2.2378385

Time	Running Time	Confining Displacement	Confining Pressure	Axial Displacement	Axial Force
Sec	Sec	mm	psi	mm	kN
4.4	4.4152832	1.0396028	19.707355	79.46936	-2.2350099
5.4	5.4152832	1.0960143	19.443266	79.469978	-2.243757
6.4	6.4152832	1.1642294	20.396811	79.469772	-2.241168
7.4	7.4152832	1.2201953	20.923223	79.469093	-2.2285533
8.4	8.4152832	1.2904515	20.904961	79.469353	-2.2478058
9.4	9.4152832	1.3538594	20.817509	79.471855	-2.2819195
10.4	10.415283	1.4276321	21.473089	79.468887	-2.206094
11.4	11.415283	1.4972384	22.174932	79.46946	-2.1872039
12.4	12.415283	1.5681468	23.635878	79.467773	-2.1931331
13.4	13.415283	1.6366724	23.145954	79.468132	-2.2500417

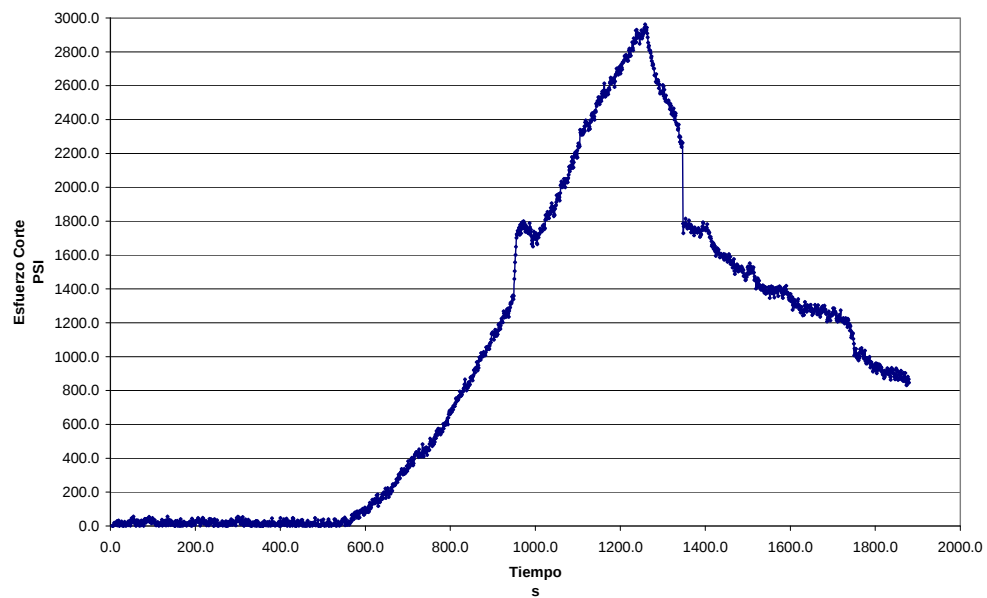
Confining Displacement	Confining Pressure	Axial Displacement	Axial Force	Fc	Esfuerzo n
mm	psi	mm	kN	KN	Pa
0.00	0	0	0	0	0.00E+00
0.06	0.264089	0.000618	0.0087471	0.0087471	1.82E+03
0.12	0.689456	0.000412	0.0061581	0.0061581	4.75E+03
0.18	1.215868	0.000267	0.0064566	0.0064566	8.38E+03
0.25	1.197606	7E-06	0.0127959	0.0127959	8.26E+03
0.31	1.110154	0.002495	0.0469096	0.0469096	7.65E+03
0.39	1.765734	0.000473	0.0289159	0.0289159	1.22E+04
0.46	2.467577	0.0001	0.047806	0.047806	1.70E+04
0.53	3.928523	0.001587	0.0418768	0.0418768	2.71E+04
0.60	3.438599	0.001228	0.0150318	0.0150318	2.37E+04

Esfuerzo c	Esfuerzo n	Esfuerzo c
Pa	PSI	PSI
0.00E+00	0.0	0.0
2.42E+04	0.3	3.5
1.71E+04	0.7	2.5
1.79E+04	1.2	2.6
3.54E+04	1.2	5.1
1.30E+05	1.1	18.8
8.01E+04	1.8	11.6
1.32E+05	2.5	19.2
1.16E+05	3.9	16.8
4.16E+04	3.4	6.0

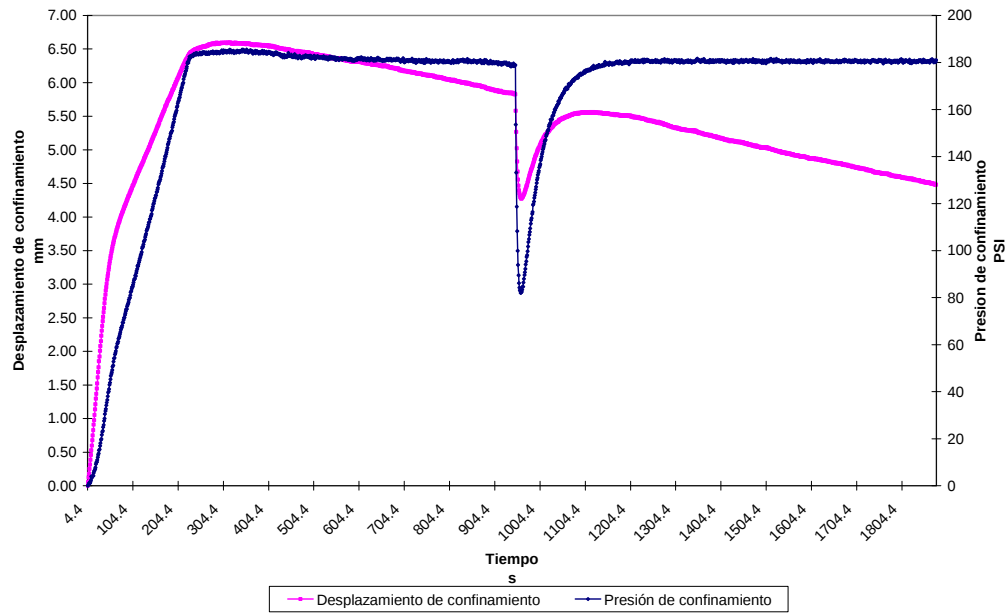
Esfuerzo corte Vs Desplazamiento corte



Esfuerzo corte Vs tiempo

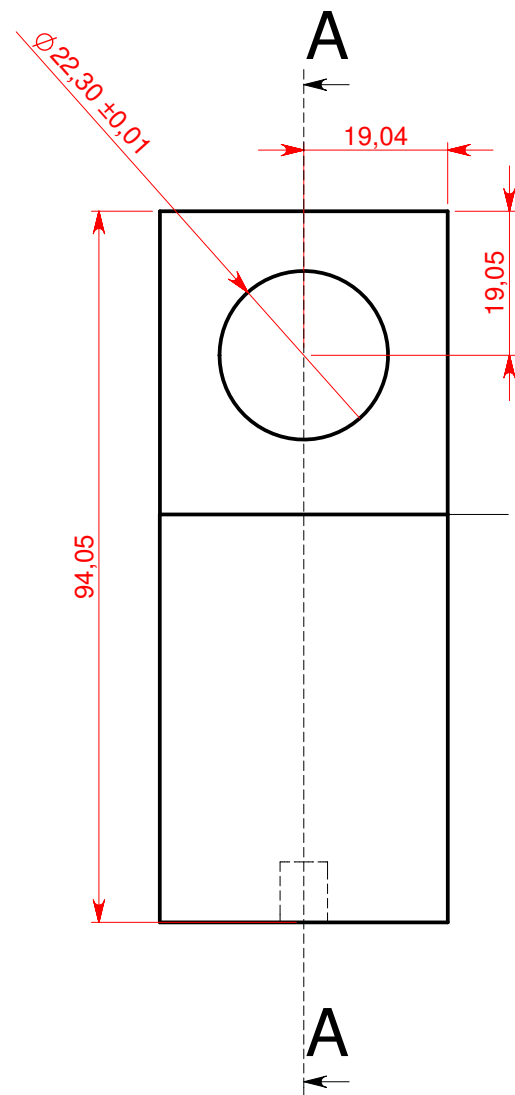


Presion y desplazamiento de confinamiento Vs Tiempo

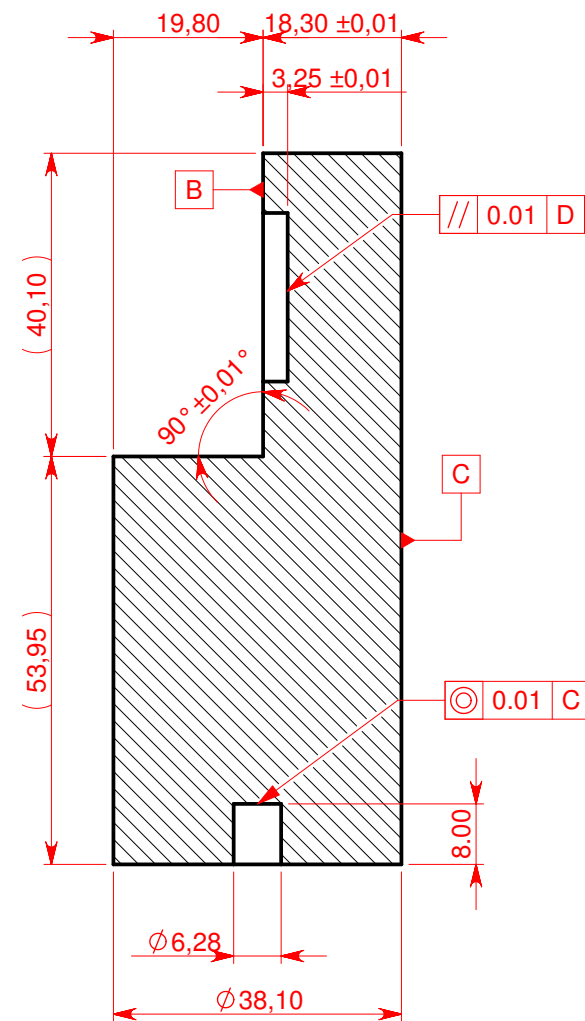


ANEXO D. PLANO DE BROCA PARA EXTRACCION DE MUESTRAS DE ROCA

Ver Plano “Broca de extracción de muestras de roca” adjunto en formato A3.

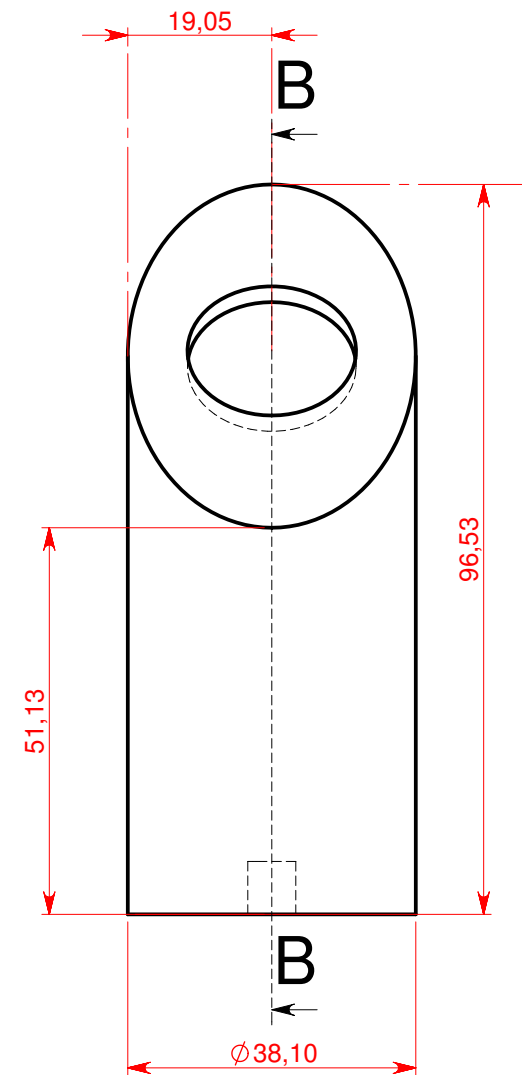


2

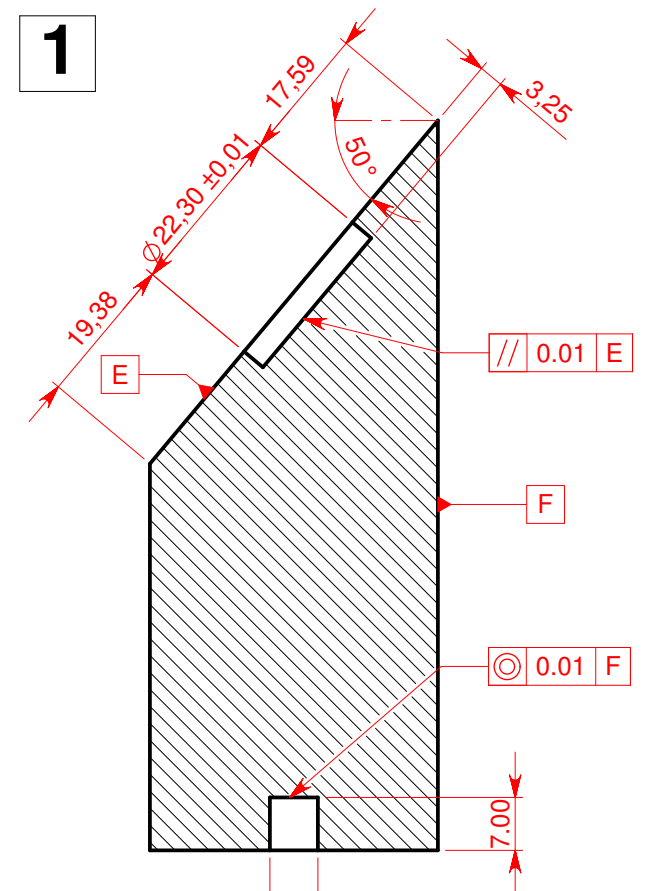


SECCIÓN A-A

Dispositivo prototipo Endcap 90° para pruebas de corte directo inclinado en muestras de roca de geometría no convencional



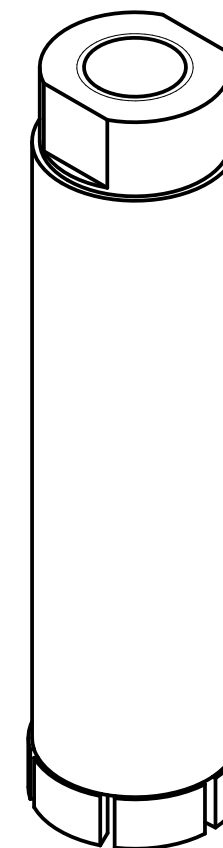
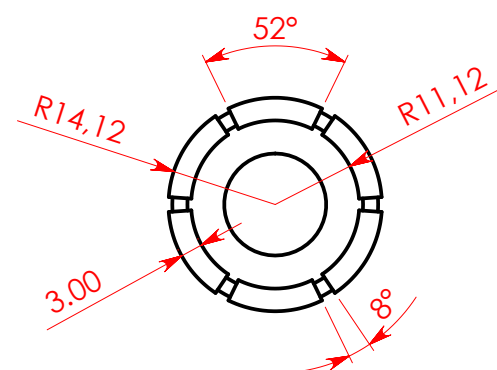
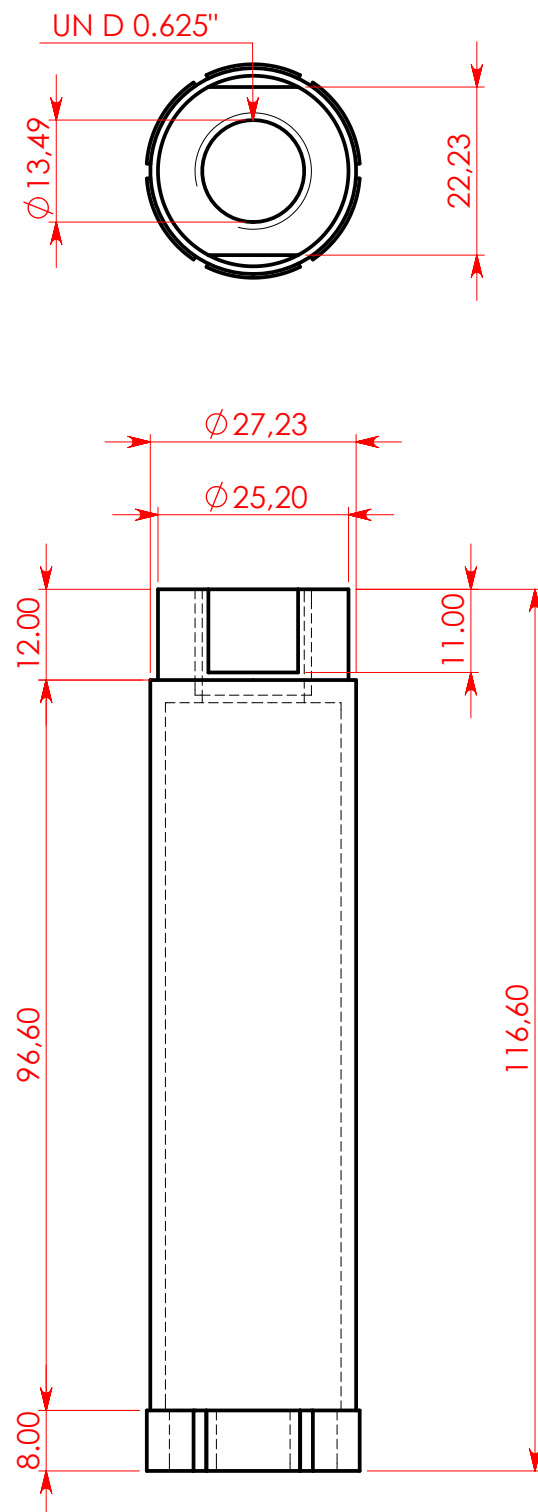
1



SECCIÓN B-B

Dispositivo prototipo Endcap 50° para pruebas de corte directo inclinado en muestras de roca de geometría no convencional

2	Endcap 90°		Acero AISI 304		310 g
1	Endcap 50°		Acero AISI 304		300 g
Nº de pieza	Denominación y observaciones	Dibujo Nº	Material	Modelo	Peso
	Fecha	Nombre	Universidad Industrial de Santander		
Dibujado	14/04/09	Hernan M			
Revisado	14/04/09	Pedro D			
Norma		UNE 1-035			
Escala 1:1	Dispositivos para pruebas de corte directo inclinado DCDI.			Plano #1 de 1	
Ajuste 0.005mm				Sustituye a:	
				Sustituido por:	



Broca diamantada para extracción de muestras de roca con diámetro de 22mm nominal

1	Broca diamantada		Acero AISI 4340		230 g
Nº de pieza	Denominación y observaciones	Dibujo Nº	Material	Modelo	Peso
	Fecha	Nombre	Universidad Industrial de Santander		
Dibujado	14/04/09	Hernan M			
Revisado	14/04/09	Pedro D			
Norma		UNE 1-035			
Escala 1:1	Broca para extracción de muestras de roca			Plano #1 de 1	
Ajuste 0.005mm				Sustituye a:	
				Sustituido por:	