

**PROCESO METODOLÓGICO PARA LA
DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA EN
ARENISCAS**

CLAUDIA MARCELA AMOROCHO GARCÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO**

2008

**PROCESO METODOLÓGICO PARA LA
DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA EN
ARENISCAS**

CLAUDIA MARCELA AMOROCHO GARCÍA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

**Director
Ing. Hernando Buendía**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO**

2008

DEDICATORIA

A Dios, quien ha sido mi guía y me colma de bendiciones día a día.

A mi mami Ligia, quien es una luchadora y me ha enseñado que es posible enfrentar las peores situaciones con una sonrisa, que éste sea un aliciente para verte caminando otra vez. Va por ti.

A mi mami María, que ha sido una mamá en todo el sentido de la palabra, apoyándome en cada uno de los momentos de mi vida

A mi papá, quien desde lejos me ha apoyado en cada una de mis proyectos

A mi hermanita Judith, a quien siempre he admirado por su fortaleza

A mis tías Amparito, Isa, Sari, Susana, Sonia, Elsa y Melfy quienes han sido las mejores hermanas mayores

A toda mi familia; hermanos, tías, tíos, primos quienes han estado ahí para apoyarme siempre

AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por todas y cada una de las bendiciones que ha derramado sobre mi
y mi familia*

A toda mi familia, por apoyarme en ésta y todas las ocasiones

*Al profesor Hernando Buendía, director del proyecto, por todas sus
recomendaciones y apoyo en la realización de este proyecto*

*A Jenny Carvajal, por ser mi “hada madrina” en todo el proceso que involucró
el desarrollo de este trabajo de investigación*

*A Dr. Abousleiman, John, Minh y todo el equipo del PoroMechanics Institute
por servirme como mentores y apoyo en esta investigación*

*Al equipo de trabajo del laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto
Colombiano del Petróleo por su ayuda en la realización de las pruebas*

*A Christian y Jose Luis, quienes colaboraron directamente en la preparación
de las muestras de este proyecto*

*Al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo y todos sus integrantes,
quienes han sido parte de este proceso investigativo*

*A mis amigos; Fabi, Juanita, Say, Ley, Camilo, Oscar, Dan, Diana, Juanfe,
Nico, Nelson, Christiann, George, Carlos, Jose y todos los demás, por
compartir conmigo tan buenos momentos*

TÍTULO: PROCESO METODOLÓGICO PARA LA DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA EN ARENISCAS*

AUTOR: CLAUDIA MARCELA AMOROCHO GARCÍA**

PALABRAS CLAVES: TENACIDAD DE FRACTURA, FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS, ARENISCAS, CCNBD, PROPAGACIÓN DE FRACTURA, CORTE CHEVRON, BEREA, ISRM.

RESUMEN

Los estudios en mecánica de fracturas son de gran importancia en la industria del petróleo debido a todos los procesos que requieren de conocimiento acerca del comportamiento de la fractura. La tenacidad de fractura es la propiedad más importante en esta área y representa una descripción cuantitativa de la propagación de la fractura en un material específico. La aplicación de la tenacidad de fractura en la mecánica de rocas incluya la caracterización y optimización de procesos, y la prevención de problemas. Varias metodologías disponibles en la industria fueron evaluadas con el fin de seleccionar la más práctica para la determinación de esta propiedad y determinar su validez. La metodología publicada por el ISRM, conocida como “Método sugerido para determinar la tenacidad de fractura mediante el uso de especímenes en forma de discos con corte tipo chevron brazilian test (CCNBD)” fue utilizada para determinar la tenacidad de fractura en muestra de Arenisca Berea. Esta prueba consiste básicamente en la aplicación de carga sobre un disco al que se le ha inducido una fractura con características geométricas específicas. Dos grupos de muestras fueron probados con equipo básico de los laboratorios de mecánica de rocas del PoroMechanics Institute y el Instituto Colombiano del Petróleo; los resultados comprobaron la influencia de la simetría del corte, el cumplimiento de las restricciones geométricas y la correcta preparación de las muestras en la consecución de valores de tenacidad de fractura coherente.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Hernando Buendía. Co-director: Jenny Mabel Carvajal

TITLE: METHODOLOGY FOR FRACTURE TOUGHNESS DETERMINATION IN SANDSTONE*

AUTHOR: CLAUDIA MARCELA AMOROCHO GARCÍA**

KEYWORDS: FRACTURE TOUGHNESS, STRESS INTENSITY FACTOR, SANDSTONE, CCNBD, FRACTURE GROWTH, CHEVRON NOTCH, BEREA, ISRM

ABSTRACT

Fracture mechanics researches play a huge role in petroleum industry due to all the processes that require knowledge about fracture behavior. Fracture toughness is one of the most important properties in this area and gives a quantitative description of fracture growth in a specific material. Fracture toughness applications in Rock mechanics include process characterization and optimization, and trouble prevention. Several methodologies for fracture toughness determination are available. They were evaluated and then the most practical was selected to determine whether it is useful or not in sandstones. The ISRM publication, "Suggested method for determining Mode-I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens" was used on Berea Sandstone samples. This method consists on load application on a notched disc. This notched has specific geometric requirements. Two groups of test samples were tested with basic equipment at PoroMechanics Institute lab and Rock Mechanics lab at Colombian Petroleum Institute. Results show how success of this method is strongly related with geometrical restrictions, notched symmetry and good sample preparation.

* Graduation Project

** Faculty of Physic-Chemical Engineering's. Petroleum Engineering School. Director: Hernando Buendía. Co-director: Jenny Mabel Carvajal

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1.	ASPECTOS MECÁNICOS DE LA TENACIDAD DE FRACTURA.....	3
1.1	GEOMECÁNICA.....	3
1.2	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS	4
1.2.1	Parámetros elásticos	5
1.3	MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS A PARTIR DE PRUEBAS DE LABORATORIO	12
1.3.1	Pruebas de resistencia a la compresión.....	13
1.3.2	Pruebas de resistencia a la tensión.....	19
1.4	MECÁNICA DE FRACTURAS	24
1.4.1	Modos de fractura	24
1.4.2	Tensión de fractura de Griffith	25
1.4.3	Tasa de liberación de energía y energía de fractura	29
1.4.4	Factor de intensidad de tensiones	31
1.4.5	Zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF).....	34
2.	TENACIDAD DE FRACTURA APLICADA A MATERIAL DE ROCA	37
2.1	DEFINICIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA	37
2.2	APLICACIONES DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN LA INDUSTRIA PETROLERA.....	39
2.2.1	Selección de brocas	40
2.2.2	Caracterización de yacimientos naturalmente fracturados	43
2.2.3	Operaciones de Fracturamiento hidráulico.....	44
2.3	PARÁMETROS QUE AFECTAN LA TENACIDAD DE FRACTURA	46
2.3.1	Efectos de escalamiento en rocas homogéneas.....	47
2.3.2	Efecto de las heterogeneidades a gran escala.....	48
2.3.3	Efecto de la presión y temperatura.....	49
2.3.4	Efecto de la presión de poro.....	50

2.3.5 Crecimiento de fractura subcrítico	51
3. PROPIEDADES DE LAS ARENISCAS	52
3.1 DEFINICIÓN DE ARENISCAS	52
3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ARENISCAS	53
3.2.1 Clasificación de las areniscas a partir del criterio de Folk	53
3.3 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS ARENISCAS.....	55
3.4 CARACTERÍSTICAS DE LA ARENISCA BEREA	56
4. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA	60
4.1 ORGANIZACIONES CON MÉTODOS PUBLICADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA.....	60
4.1.1. American Society for Testing and Materials, ASTM	60
4.1.2 International Society of Rock Mechanics, ISRM.....	61
4.2 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA EN CARBUROS DE CEMENTO	62
4.2.1. Configuración de la muestra.....	63
4.2.2. Equipos requeridos.....	65
4.2.3 Procedimiento	66
4.2.4. Cálculos.....	68
4.3 MÉTODO SUGERIDO PARA DETERMINAR LA TENACIDAD DE FRACTURA MEDIANTE EL USO DE ESPECÍMENES TIPO CHEVRON INCLINADO (CB)	68
4.3.1 Geometría de la muestra	69
4.3.2 Equipos requeridos.....	71
4.3.3 Procedimiento	73
4.3.4. Cálculos.....	75
4.4 MÉTODO SUGERIDO PARA DETERMINAR LA TENACIDAD DE FRACTURA MEDIANTE EL USO DE ESPECÍMENES TIPO CILINDRO CORTO (SR) 0	76
4.4.1 Geometría de la muestra	76
4.4.2 Equipos requeridos.....	77

4.4.3 Procedimiento	80
4.4.4. Cálculos.....	82
4.5. MÉTODO SUGERIDO PARA DETERMINAR LA TENACIDAD DE FRACTURA MEDIANTE EL USO DE ESPECÍMENES EN FORMA DE DISCOS CON CORTE TIPO CHEVRON BRAZILIAN TEST (CCBND).	84
4.5.1 Geometría de la muestra	84
4.5.2 Equipos requeridos.....	86
4.5.3 Procedimiento	86
4.5.4. Cálculos.....	87
4.5.5 Modificaciones realizadas al método de determinación de tenacidad de fractura en muestras tipo CCNBD.....	88
4.6 SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA EN ARENISCAS.....	89
5. METODOLOGÍA SELECCIONADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN ARENISCAS	92
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	92
5.2 EQUIPOS REQUERIDOS	95
5.2.1 Equipo de preparación de muestras.....	95
5.2.2. Equipos de prueba y arreglos de carga.....	96
5.2.3. Dispositivos para el alineamiento de la muestra	96
5.2.4. Equipo de medición de desplazamiento	97
5.2.5. Registro de datos	97
5.3 PROCEDIMIENTO	97
5.3.1. Selección y preparación de las muestras	97
5.3.2. Calibración	101
5.3.3. Montaje.....	102
5.3.4. Realización de la prueba	102
5.4 CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA TENACIDAD DE FRACTURA.....	103
6. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO	104

6.1 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	104
6.1.2 Preparación de muestras	104
6.1.2 Montaje de la prueba y aplicación de la carga	110
6.1.3 Adquisición de los datos.....	112
6.1.4 Resultados de las pruebas	113
6.2 CÁLCULO DE TENACIDAD DE FRACTURA.....	119
6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	123
CONCLUSIONES	128
RECOMENDACIONES	130
BIBLIOGRAFÍA.....	131

LISTA DE TABLAS

FIGURA 1.1 MATERIAL ELÁSTICO LINEAL	5
FIGURA 1.2 MATERIAL PERFECTAMENTE ELÁSTICO	6
FIGURA 1.3 DEFORMACIÓN NORMAL HOMOGÉNEA	7
FIGURA 1.4 DEFORMACIÓN DE CIZALLA.	8
FIGURA 1.5 TIPOS DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE LAS ROCAS. 13	
FIGURA 1.6 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE PARA LA PRUEBA DE COMPRESIÓN UNIAxIAL	15
FIGURA 1.7 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE PARA LA PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL..	17
FIGURA 1.8 CÍRCULO DE MOHR PARA UNA PRUEBA DE COMPRESIÓN TRIAXIAL.	19
FIGURA 1.9 MONTAJE PROPUESTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA TENSIL AL RAJADO.	20
FIGURA 1.10 MONTAJE PROPUESTO PARA LA PRUEBA DE ÍNDICE DE CARGA.....	22
FIGURA 1.11 MONTAJE PROPUESTO PARA LA PRUEBA DE BRASILERA.....	23
FIGURA 1.12 LOS TRES MODOS BÁSICOS DE FRACTURA,	25
FIGURA 1.13 PLACA SEMIINFINITA CON CAVIDAD CENTRAL DE LONGITUD 2A (DOBLE PUNTA DE GRIETA) SOMETIDA A TENSIÓN.	26
FIGURA 1.14 MEDIA PLACA CON GRIETA SENCILLA DE LONGITUD A, SOMETIDA A TENSIÓN	29
FIGURA 1.15 ZONA PLÁSTICA EN LA PUNTA DE UNA GRIETA: A) TENSIÓN TEÓRICA EN UN MEDIO ELÁSTICO, B) ZONA PLÁSTICA TEÓRICA PRÓXIMA A LA PUNTA DE LA GRIETA, C) ZONA PLÁSTICA CON CORRECCIÓN DE IRWIN.....	34
FIGURA 2.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO LOS PRINCIPIOS DE FALLAMIENTO EN BROCAS PDC Y CÓNICAS.	42
FIGURA 2.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN YNF USANDO LA PROPIEDAD DE TENACIDAD DE FRACTURA.	44
FIGURA 2.3 FRACTURAS EN PROCESOS DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO.....	46
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE FOLK	54
FIGURA 3.2 LOCALIZACIÓN DE LA FORMACIÓN BERE A EN LOS ESTADOS UNIDOS... 56	
FIGURA 3.3 BLOQUES Y CORAZONES DE LA ARENISCA BERE A.....	57
FIGURA 4.1 GEOMETRÍA DE LOS ESPECÍMENES TIPO CILINDRO CORTO. A) CORTE TRANSVERSAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA SUPERIOR	63
FIGURA 4.2 GEOMETRÍA DE LOS ESPECÍMENES TIPO BARRA CORTA. A) CORTE TRANSVERSAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA SUPERIOR	64
FIGURA 4.3 ARREGLO PARA EL MÉTODO DE PRUEBA MEDIANTE ESPECÍMENES TIPO CILINDRO CORTO..	66
FIGURA 4.4 GEOMETRÍA DE LOS ESPECÍMENES TIPO CHEVRON INCLINADO. A) CORTE TRANSVERSAL, B) VISTA FRONTAL.	70
FIGURA 4.5 ARREGLO DE CARGA DEL MÉTODO DE PRUEBA MEDIANTE ESPECÍMENES CHEVRON INCLINADO.	72

FIGURA 4.6 GEOMETRÍA DE LOS ESPECÍMENES TIPO CILINDRO CORTO. A) CORTE TRANSVERSAL, B) CORTE LATERAL, C) VISTA SUPERIOR	77
FIGURA 4.7 ARREGLO PARA EL MÉTODO DE PRUEBA MEDIANTE ESPECÍMENES TIPO CILINDRO CORTO.	79
FIGURA 4.8 GEOMETRÍA DE LOS ESPECÍMENES TIPO CCNBD. A) VISTA FRONTAL, B) CORTE TRANSVERSAL.....	85
FIGURA 4.9 MONTAJE PRUEBA EN MUESTRAS TIPO CCNBD.....	87
FIGURA 5.1 GEOMETRÍA DE LA MUESTRA CCNBD.	93
FIGURA 5.2 RANGO DE DIMENSIONES GEOMÉTRICAS VÁLIDAS PARA MUESTRAS CCNBD.	95
FIGURA 5.3 PROCEDIMIENTO DE CORTE.....	100
FIGURA 6.1 DIAMETRO Y GROSOR MUESTRA PMI - A.....	105
FIGURA 6.2 DIÁMETRO Y GROSOR MUESTRA PMI-B	105
FIGURA 6.3 DIÁMETRO Y GROSOR MUESTRA PMI-C	105
FIGURA 6.4 DIÁMETRO Y GROSOR MUESTRA PMI-D	106
FIGURA 6.5 DIÁMETRO Y GROSOR MUESTRA PMI-E	106
FIGURA 6.6 DIÁMETRO Y GROSOR MUESTRA ICP-1	107
FIGURA 6.7 DIÁMETRO Y GROSOR MUESTRA ICP-2	107
FIGURA 6.8 DIÁMETRO Y GROSOR MUESTRA ICP-3	107
FIGURA 6.9 ARREGLO FINAL GRUPO DE MUESTRAS DE 4 IN DE DIÁMETRO	109
FIGURA 6.10 ARREGLO FINAL GRUPO DE MUESTRAS DE 1.5 IN DE DIÁMETRO	110
FIGURA 6.11 EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA APLICACIÓN DE CARGA	111
FIGURA 6.12 MONTAJE FINAL DE MUESTRAS EN MTS – 819.....	112
FIGURA 6.13 MONTAJE FINAL DE MUESTRAS EN MTS – 815	112
FIGURA 6.14 MUESTRA PMI – A DESPUÉS DE LA PRUEBA	114
FIGURA 6.15 MUESTRA PMI – B DESPUÉS DE LA PRUEBA.....	115
FIGURA 6.16 MUESTRA PMI – C DESPUÉS DE LA PRUEBA.....	115
FIGURA 6.17 MUESTRA PMI – D DESPUÉS DE LA PRUEBA.....	116
FIGURA 6.18 MUESTRA PMI – E DESPUÉS DE LA PRUEBA	117
FIGURA 6.19 MUESTRA ICP – 1 DESPUÉS DE LA PRUEBA.....	117
FIGURA 6.20 MUESTRA ICP – 2 DESPUÉS DE LA PRUEBA.....	118
FIGURA 6.21 MUESTRA ICP – 3 DESPUÉS DE LA PRUEBA.....	119
FIGURA 6.22 GRÁFICA DE RESULTADOS PRUEBA DE TENACIDAD DE FRACTURA. MUESTRA PMI - B.....	120
FIGURA 6.23 GRÁFICA DE RESULTADOS PRUEBA DE TENACIDAD DE FRACTURA. MUESTRA PMI - C.....	120
FIGURA 6.24 GRÁFICA DE RESULTADOS PRUEBA DE TENACIDAD DE FRACTURA. MUESTRA PMI - D.....	121
FIGURA 6.25 GRÁFICA DE RESULTADOS PRUEBA DE TENACIDAD DE FRACTURA. MUESTRA PMI – E	121
FIGURA 6.26 GRÁFICA DE RESULTADOS PRUEBA DE TENACIDAD DE FRACTURA. MUESTRA ICP - 2.....	122

FIGURA 6.27 GRÁFICA DE RESULTADOS PRUEBA DE TENACIDAD DE FRACTURA. MUESTRA ICP – 3.....	122
FIGURA 6.28 COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS CRÍTICO CON EL GROSOR DEL MATERIAL.	126

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1 RELACIONES ENTRE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS DE UN SÓLIDO ISOTRÓPICO	11
TABLA 1.2 ALGUNAS PROPIEDADES ELÁSTICAS ISOTRÓPICAS.....	11
TABLA 3.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ARENISCA BERA	58
TABLA 3.2 ALGUNAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ARENISCA BERA.....	58
TABLA 4.1 DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LA MUESTRA TIPO CILINDRO CORTO....	63
TABLA 4.2 DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LA MUESTRA TIPO BARRA CORTA.....	64
TABLA 4.3 ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS ESPECÍMENES TIPO CHEVRON INCLINADO	70
TABLA 4.4 ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS ESPECÍMENES TIPO CILINDRO CORTO	77
TABLA 4.5 ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS ESPECÍMENES CCNBD.....	85
TABLA 4.6 CUADRO COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA	90
TABLA 5.1 ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS MUESTRAS CCNBD	94
TABLA 5.2 CONDICIONES PARA LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES A_1 Y A_2	94
TABLA 6.1 DIMENSIONES DE LAS MUESTRAS TIPO CCNBD	109
TABLA 6.2 PARÁMETROS Y CÁLCULO DE TENACIDAD DE FRACTURA DE LAS MUESTRAS VÁLIDAS	123

INTRODUCCION

El conocimiento de las propiedades de las rocas tiene una gran importancia en la ingeniería de mecánica de rocas y en el diseño de procesos de la industria petrolera tales como perforación, estimulación y caracterización de yacimientos. Los conceptos relacionados específicamente con la mecánica de fractura han generado una creciente atención en los últimos años, siendo la tenacidad de fractura una de las áreas de investigación más fuertes en diferentes ramas de la ingeniería de petróleos tales como el análisis petrofísico de los sistemas fracturados y los procesos de estimulación de pozos.

Los estudios en mecánica de fracturas son aplicados en diferentes campos de la industria ayudando a prevenir problemas relacionados con la falla de los diferentes materiales, prediciendo las características del desarrollo y propagación de fracturas debido a desgaste o fatigamiento. Sin embargo, en ingeniería de petróleos, la mecánica de fracturas envuelve una descripción cuantitativa de la transformación de la rocas hasta su ruptura, mediante el crecimiento de un plano de falla cuando una carga es aplicada, lo cual envuelve aplicaciones donde la fractura se considera tanto beneficiosa como dañina.

Uno de los parámetros básicos a determinar en este tipo de estudios es la tenacidad de fractura, ya que describe directamente el comportamiento de la fractura tanto para prevenir problemas como para optimizar el desempeño en diferentes campos de la industria del petróleo.

Con el interés de determinar el comportamiento de las fracturas en cada uno de los procesos en los que se ven involucradas las areniscas (yacimientos naturalmente fracturados, perforación, operaciones de fracturamiento, entre otros), este proyecto pretende seleccionar un proceso metodológico práctico,

rápido, económico y fácil de implementar, para calcular la tenacidad de fractura

La validación de esta metodología incluye la realización de pruebas de laboratorio en dos laboratorios de mecánica de rocas: el laboratorio perteneciente al PoroMechanics Institute de la Universidad de Oklahoma y el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo. Estas pruebas se realizaron con muestras de la arenisca Berea, escogida por la uniformidad de sus propiedades y la disponibilidad de datos acerca de sus propiedades.

El análisis de los resultados de las pruebas incluye la comparación de los datos obtenidos con los teóricos, el análisis de las desviaciones presentadas y la recopilación de las lecciones aprendidas durante todo el proceso de investigación.

1. ASPECTOS MECÁNICOS DE LA TENACIDAD DE FRACTURA

1.1 GEOMECÁNICA

La geomecánica es una disciplina que estudia la respuesta mecánica de los materiales geológicos que conforman las formaciones rocosas. En el caso de la industria petrolera, esta disciplina ha desempeñado un papel muy importante en los últimos años para lograr el éxito en diferentes áreas tales como caracterización de yacimientos, operaciones de perforación y completamiento (1).

La geomecánica no surgió como un área de estudio en la industria petrolera, nació en la ingeniería civil, estudiando el uso de los suelos y las rocas como materiales fundamentales en la construcción de obras. Posteriormente surgieron aplicaciones a los procesos mineros como la construcción de túneles profundos y estabilidad de taludes en minería de ciel abierto. En la década de los 50's, empieza la geomecánica a ser aplicada en la industria petrolera siendo usada en actividades que permitieran dar explicación acerca de operaciones tales como el fracturamiento hidráulico, la estabilidad de pozo y los fenómenos de subsidencia; y entre las décadas de los 70's y 80's llegó a tomar un papel protagónico que se extiende hasta las épocas actuales (2).

La geomecánica está fundamentada en las teorías de mecánica de suelos y mecánica de rocas. Igualmente involucra áreas como mecánica de fluidos, termodinámica, geología física, entre otras. Las aplicaciones de la geomecánica en la industria petrolera incluye aplicaciones en diferentes

áreas, las cuales incluyen: el pronóstico y el control de la estabilidad de pozo, la optimización de la localización del pozo y la trayectoria, la predicción de la presión de poro, el fracturamiento hidráulico, la predicción y control de la predicción de arenas, la predicción y control de la compactación y subsidencia del yacimiento, la caracterización de yacimientos fracturados, el diagnóstico de problemas de perforación, el análisis de esfuerzos de subsuelo y el diseño de estimulaciones.

1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

Un factor indispensable en los estudios geomecánicos es el conocimiento de las propiedades mecánicas de las rocas, es decir tener idea de cómo el material rocoso se deforma y/o falla bajo la acción de fuerza aplicadas. A continuación se mostrarán los conceptos básicos que modelan las propiedades mecánicas de las rocas y se describirán algunas pruebas de laboratorio utilizadas para determinar las propiedades mecánicas estáticas, las cuales están diseñadas para medir la deformación y fractura de las muestras de roca sujetas a una variable uniaxial, biaxial y triaxial de carga.

Las propiedades mecánicas del material de roca pueden ser clasificados en tres grupos principales (2)

- Parámetros elásticos
- Parámetros de resistencia
- Esfuerzos in-situ

Los últimos no clasifican técnicamente como propiedades mecánicas de las formaciones rocosas, aunque influyen directamente en los parámetros elásticos y de resistencia.

1.2.1 Parámetros elásticos (3)

La mayoría de los materiales poseen la cualidad de deformarse ante una fuerza externa y recuperar su estado inicial cuando esta cesa. Esta propiedad es conocida como elasticidad y es el fundamento de estudio de las propiedades mecánicas de las rocas. En el material de roca es necesario incluir la teoría poro-elástica para así poder describir adecuadamente su comportamiento.

1.2.1.1 Elasticidad lineal y no lineal (4)

La estructura de los materiales rocosos sufre alteraciones cuando la roca es sometida a un campo de esfuerzo. Dichos cambios estructurales en la roca han sido cuidadosamente estudiados para diferentes valores de esfuerzos, dando como resultado las teorías elásticas lineal y no lineal.

Teoría elástica lineal

es el tipo de respuesta más simple que presenta un material, donde existe una relación lineal entre las fuerzas externas y las deformaciones correspondientes. Este comportamiento se da principalmente cuando los cambios en las fuerzas son pequeños. Esta teoría fue introducida por Robert Hook en 1676 quien estableció que la fuerza aplicada a cualquier cuerpo elástico es proporcional a su deformación, es decir:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.1)$$

Donde σ es el esfuerzo aplicado, E es el módulo de Young y ε es la deformación producida.

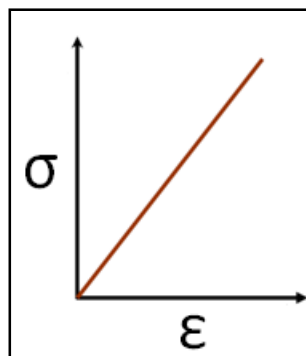


Figura 1.1 Material Elástico Lineal

Teoría elástica no lineal

La mayoría de las rocas no presentan un comportamiento lineal cuando están sometidas a altos niveles de esfuerzos, sin embargo su comportamiento puede ser modelado mediante relaciones de elasticidad lineal para cambios suficientemente pequeños de esfuerzos.

Cualquier material que no obedezca a una línea recta en la relación esfuerzo-deformación, se dice que tiene un comportamiento no lineal. Para un material elástico no lineal, la relación esfuerzo deformación puede ser escrita como :

$$\sigma = E_1 \varepsilon + E_2 \varepsilon^2 + E_3 \varepsilon^3 + E_4 \varepsilon^4 \quad (1.2)$$

Esta expresión no lineal puede llegar a ser muy complicada matemáticamente ya que σ y ε son tensores, sin embargo se presentan algunos casos de no-elasticidad que se pueden interpretar bajo los conceptos de elasticidad lineal.

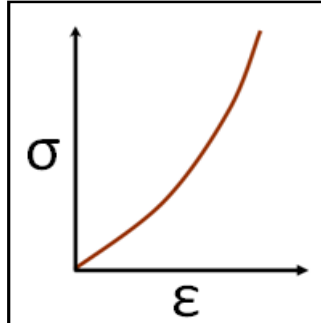


Figura 1.2 Material Perfectamente Elástico

1.2.1.2 Definición de esfuerzo

Se define como la fuerza que actúa sobre la sección transversal de una superficie. En mecánica de rocas se establece que los esfuerzos compresivos, los cuales son los más comunes históricamente hablando de los esfuerzos relacionados con la geología, poseen signo positivo de acuerdo con la convención de signos utilizada en la mecánica de rocas.

1.2.1.3 Definición de deformación

Es la compresión o extensión de un cuerpo que resulta de la aplicación de las fuerzas externas. La cantidad de deformación se incrementa con la magnitud de los esfuerzos y también con el tiempo.

Deformación longitudinal (elongación): es la elongación máxima o límite de elongación cuando la longitud (L) tiende a cero.

$$\varepsilon = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\Delta L}{L} \quad (1.3)$$

Para estar de acuerdo con la convención de signos para los esfuerzos, se requiere que la elongación se tome como negativa cuando la deformación es a partir de una fuerza tensil o se tome como positiva cuando la deformación es resultado de una fuerza compresiva.

La figura 1.3 muestra un ejemplo de deformación longitudinal producida por esfuerzos tensiles.

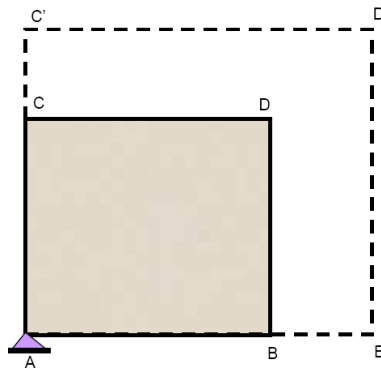


Figura 1.3 Deformación normal homogénea resultado de los desplazamientos lineales homogéneos donde no cambia la geometría.

Deformación de cizalladura (cambio angular): se define como el cambio entre dos direcciones inicialmente ortogonales como se muestra en la siguiente figura.

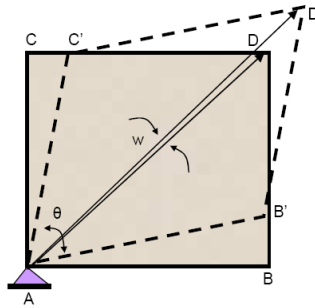


Figura 1.4 Deformación de cizalla resultado de los desplazamientos angulares relativos. De un rectángulo cambia a un paralelogramo.

Esta deformación corresponde al siguiente comportamiento

$$\Gamma = \frac{1}{2}\psi \quad (1.4)$$

Donde Γ es llamado el esfuerzo de corte correspondiente al punto O en la dirección OP. La determinación por cizalladura es positiva cuando es el resultado de la fuerza compresiva (ψ aumenta) y la deformación por cizalladura es negativa cuando resulta de una fuerza tensil (ψ disminuye)

1.2.1.4 Módulos elásticos (5)

En un material isotrópico y linealmente elástico los esfuerzos y deformaciones están relacionados por la ley de Hooke, utilizando módulos elásticos. Los módulos elásticos se miden generalmente utilizando experimentos de cizalla y compresión (deformación estática) o propagación de ondas elásticas (deformación dinámica).

- **Módulo de Young (E)** : está definido como la relación entre el esfuerzo uniaxial aplicado y la deformación sufrida a lo largo del eje de aplicación del esfuerzo. En este caso los esfuerzos $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ y solamente σ_1 es diferente de cero, luego se tiene

$$\sigma_1 = \lambda\varepsilon_v + 2G\varepsilon_1 \quad (1.5a)$$

$$0 = \lambda\varepsilon_v + 2G\varepsilon_2 \quad (1.5b)$$

$$0 = \lambda \varepsilon_v + 2G\varepsilon_2 \quad (1.5c)$$

Donde λ y G son conocidas como las constantes de Lamé. Luego:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = -\frac{\lambda}{2(\lambda+G)} \varepsilon_1 \quad (1.6)$$

Si la muestra se deforma uniformemente, hay una relación lineal entre σ_1 y ε_1 que puede ser escrita así :

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G} \quad (1.7)$$

- **Relación de Poisson (ν):** este parámetro representa la capacidad del material para transferir su deformabilidad perpendicular a la carga, en otras palabras es la medida de la expansión lateral contra la contracción longitudinal. Algunos valores típicos de la relación de Poisson (ν) para rocas presentes en el yacimiento están entre $0.15 \leq \nu \leq 0.25$. A partir de las relaciones de las constantes de Lamé, se tiene que:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{G(3\lambda+2G)}{\lambda+G} \quad (1.8)$$

Donde ν está definido como:

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+G)} \quad (1.9)$$

- **Módulo elástico de Bulk (volumétrico) (K);** se da cuando la deformación es un simple cambio en el volumen y es el resultado de aplicar una carga hidrostática (estado donde los tres esfuerzos normales son iguales $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P$) a una muestra, midiendo posteriormente su deformación volumétrica, de lo anterior se puede

decir que representa la resistencia opuesta por el material a la compresión hidrostática aplicada.

$$K = \frac{d\sigma_p}{d\varepsilon_v} \quad (1.10)$$

Donde σ_p representa el esfuerzo hidrostático relativo a la deformación volumétrica ε_v , expresando la ecuación anterior en términos de módulos elásticos se tiene lo siguiente>

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1.11)$$

- **Módulo de corte (G):** si se considera una trayectoria de carga tal que $\sigma_x = -\sigma_y = \sigma$, se tiene un estado conocido como cizalladura pura, el módulo resultante de una prueba bajo este estado se denomina módulo de corte o de rigidez que representado en términos de módulos elásticos será:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.12)$$

Para la teoría elástica lineal es necesario conocer sólo dos parámetros elásticos para describir de manera completa el medio bajo estudio; los otros parámetros elásticos pueden ser conocidos por medio de relaciones como las mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 1.1 Relaciones entre los módulos elásticos de un sólido isotrópico

$E = 3K(1 - 2\nu)$	$K = \lambda \frac{1 + \nu}{3\nu}$	$\frac{\lambda}{\lambda + G} = \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$
$E = 2G(1 + \nu)$	$K = \frac{2}{3} G \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu}$	$\frac{G}{\lambda + G} = 1 - 2\nu$
$E = \frac{9KG}{3K + G}$	$K = \lambda + \frac{2}{3} G$	$\frac{\lambda + 2G}{\lambda + G} = 2(1 - \nu)$
$E = G \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G}$	$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$	$\frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G} = 2(1 + \nu)$
$E = \frac{\lambda}{\nu} (1 + \nu)(1 - 2\nu)$	$\frac{\lambda}{G} = \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$	$\frac{3\lambda + 4G}{\lambda + G} = 2(2 - \nu)$

Fuente: Modificada "Petroleum Related Rock Mechanics", FJAER.

La Tabla 2 muestra los módulos elásticos de varios materiales bajo condiciones isotrópicas lineales. Todas las dimensiones se dan en MPsi a excepción de la relación de Poisson que es adimensional.

Tabla 1.2 Algunas Propiedades elásticas isotrópicas

Material	E (MPsi)	ν	K (MPsi)	G (MPsi)
Cuarzo	13.91	0.09	5.56	6.42
Calcita	12.32	0.31	10.85	4.70
Dolomita	17.44	0.29	13.82	6.76
Sal	5.36	0.26	3.78	2.12
Hielo	1.16	0.35	1.26	0.43
Agua	0.00	0.50	0.34	0.00
Aluminio	10.00	0.32	9.26	3.79

Fuente: Modificado Seminario "Rock Failure", Carl Sondergeld.

1.3 MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS A PARTIR DE PRUEBAS DE LABORATORIO (6)

Las pruebas in situ y las de laboratorio constituyen la forma más confiable que tiene la industria petrolera para conocer las propiedades mecánicas de las rocas que conforman las formaciones atravesadas durante la perforación de pozos petroleros y gasíferos, por ende existen organizaciones internacionales que estandarizan los procedimientos de laboratorio existentes para medir dichas propiedades de las rocas. Tales organizaciones son la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas ISRM y la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales ASTM, las cuales bajo sus parámetros han establecido diversas normas que conforman un marco de referencia para la estandarización de pruebas de laboratorio, procedimientos operacionales, preparación de muestras y manipulación de corazones de roca.

La prueba de laboratorio seleccionada para medir determinada propiedad de la roca debe tratar de simular las condiciones de la roca en el yacimiento, para tener alta confiabilidad en los resultados; para ello las pruebas de laboratorio se realizan sobre corazones de roca y además de esto es preciso conocer las condiciones in-situ bajo las cuales se hallaba la roca, por lo que se debe contar con registros de pozo, condiciones de esfuerzos in situ, presión de poro y otras condiciones que pueden identificar la condición real de las rocas presentes en las formaciones y cuyas propiedades desean ser medidas en el laboratorio. Diversas pruebas de laboratorio se han desarrollado para determinar la resistencia de las rocas, algunas de ellas son las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial y triaxial, y las pruebas de resistencia a la tensión.

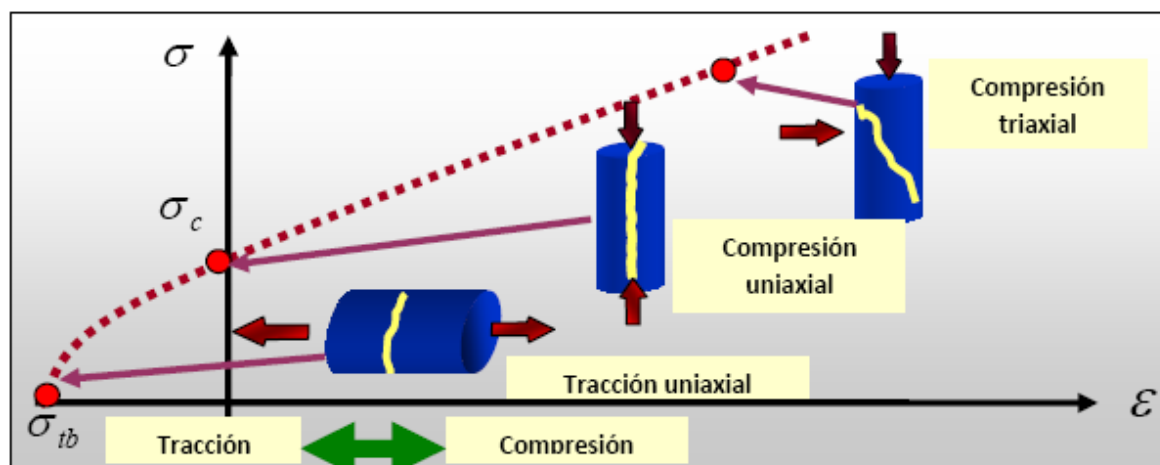


Figura 1.5 Tipos de prueba para determinar la resistencia de las rocas

Fuente: Modificado "Aplicaciones de Geomecánica", Cabrera 2003

1.3.1 Pruebas de resistencia a la compresión

Estas pruebas miden la resistencia a la compresión uniaxial o triaxial sobre cilindros de roca, la resistencia compresiva medida con estas pruebas depende en algún grado del tipo de espécimen de roca, el tamaño, el contenido de humedad de la muestra, la velocidad de aplicación de carga, entre otros factores que deben ser tenidos en cuenta al momento de interpretar los resultados de las pruebas.

1.3.1.1 Prueba de compresión uniaxial

La Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) es la propiedad de las rocas más comúnmente determinada y el procedimiento usado para su cálculo por los diferentes laboratorios de mecánica de rocas en el mundo es equivalente. La prueba de resistencia axial no confinada sobre corazones de roca es muy simple, sin embargo esta prueba no refleja en forma general el comportamiento de de la roca en el yacimiento ya que allí se halla sometida a diferentes factores como son: la heterogeneidad presente en la formación rocosa, el estado de esfuerzos in situ a los cuales está sometida la roca, las

fallas presentes, los planos de debilidad y demás factores que no pueden simularse o reproducirse en su totalidad en el laboratorio. Por lo anterior, deben ser introducidos ajustes a los resultados obtenidos mediante estas pruebas.

Descripción del ensayo.

La prueba consiste en introducir un cilindro de roca en una máquina de carga conocida como Rock Mechanics Test System (MTS). Una vez la muestra se halla dentro de la celda de carga con una presión de confinamiento igual a cero, se aplica la carga axial hasta que el cilindro de roca falle. La prueba es una de las más convenientes y útiles para la determinación de las propiedades de la roca y específicamente permite medir la resistencia compresiva uniaxial (UCS), el módulo elástico de Young y la relación de Poisson, agregando a los equipos de la prueba medidores de deformación axial y circunferencial, estos pueden ser extensómetros. LVDT's o strain gages.

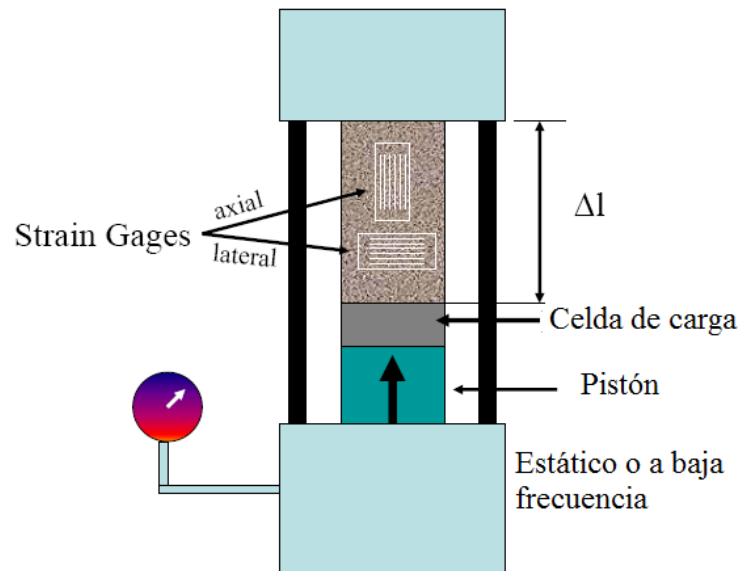


Figura 1.6 Descripción del montaje para la prueba de compresión uniaxial

Fuente: Modificado Seminario “Stress and Strain”, Carl Sondergeld.

La curva esfuerzo-deformación para esta prueba es a menudo no lineal, lo cual significa que el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν) dependen del nivel de esfuerzo axial. Es común especificar los valores de E y ν en el valor del 50% del pico de esfuerzo. La curva de esfuerzo-deformación permite definir las siguientes secciones de la curva, las cuales son:

- Región elástica: en esta región si el esfuerzo aplicado en la roca es retirado esta recupera su forma inicial sin haber sufrido alteración alguna.
- Punto de cedencia: a partir de este punto el espécimen de roca sufrirá deformaciones irreversibles
- Región dúctil: en esta región la muestra sufre deformaciones permanentes, pero soporta aún cargas sin presentarse la falla del espécimen
- UCS: resistencia compresiva uniaxial, es el esfuerzo pico o fuerza máxima aplicada a la cual el espécimen de roca falla.

- Región frágil: en esta región la habilidad de la muestra para soportar esfuerzos disminuye drásticamente, mientras la deformación del material aumenta.

Cálculos

A partir del valor de carga axial máxima registrada durante la prueba (valor leído en el momento de la falla), se determina el esfuerzo aplicado usando la siguiente ecuación:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\pi r^2} * 0.145 \quad (13)$$

Donde

$F_{m\acute{a}x}$ = Carga axial máxima alcanzada (KN)

r = radio de la muestra (m)

$P_{m\acute{a}x}$ = UCS en PSI.

1.3.1.2 Prueba de falla triaxial

Un mayor conocimiento de las propiedades mecánicas de las rocas se obtiene cuando la presión de confinamiento es considerada y esto se hace en las pruebas de falla triaxial, donde los esfuerzos que actúan sobre la roca a una profundidad determinada pueden ser simulados.

Descripción del ensayo.

La prueba consiste en introducir un cilindro de roca en una máquina de carga conocida como Rock Mechanics Test System (MTS). Una vez la muestra se halla dentro de la celda de carga, la carga axial y de confinamiento se incrementan simultáneamente hasta que un nivel de esfuerzo hidrostático recomendado sea alcanzado. Entonces, la presión de confinamiento (σ_3) es mantenida constante mientras la carga axial (σ_1) se va incrementando hasta

que ocurra la falla, los resultados obtenidos típicamente de una prueba de falla triaxial son los parámetros ϵ_1 y ϵ_2 , que representan las deformaciones de la muestra en dirección axial y radial respectivamente. Es importante considerar que la carga axial aplicada en la prueba normalmente origina una tasa de deformación axial constante.

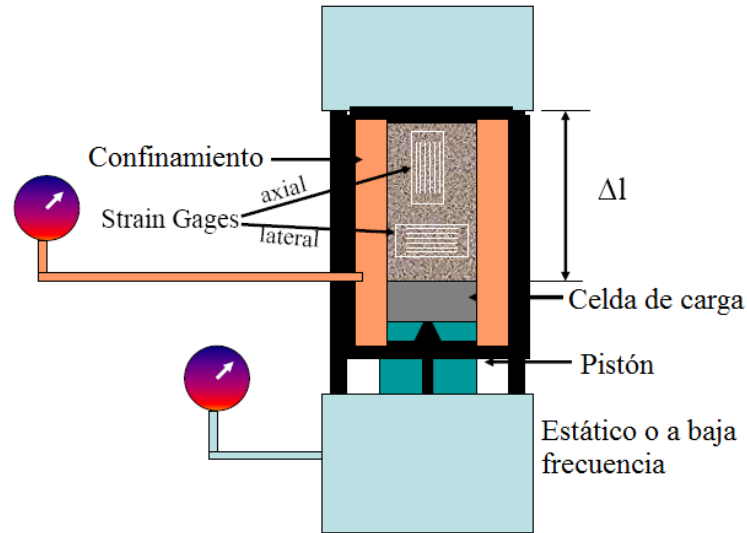


Figura 1.7 Descripción del montaje para la prueba de compresión triaxial. Fuente: Modificado Seminario "Stress and Strain", Carl Sondergeld.

La prueba de falla triaxial ha demostrado ser la herramienta más adecuada para determinar las propiedades mecánicas de las rocas a diferentes presiones de confinamiento y a diferentes temperaturas si es requerido, para un amplio rango de esfuerzos aplicados. Además esta prueba puede realizarse sobre especímenes no drenados (saturados con una presión de poro determinada) y especímenes drenados (con presión de poro igual a cero). En general la falla de la prueba triaxial resulta de una fractura de cizalladura simple, plana áspera, inclinada en un ángulo cercano a la dirección del esfuerzo máximo principal, el cual es usualmente paralelo al eje del espécimen. Para caracterizar adecuadamente la muestra, la prueba debe ser hecha usando varias presiones de confinamiento.

Así como las pruebas hidrostáticas son drenadas y no drenadas estas pruebas también lo son.

- Prueba drenada: en esta configuración de la prueba triaxial las propiedades elásticas y la resistencia dependen de los esfuerzos efectivos. Esta prueba proporciona un mejor control experimental ya que la presión de poro es mantenida constante en un valor conocido.
- Prueba no drenada: esta configuración de la prueba triaxial con mediciones de presión de poro es muy utilizada en experimentos sobre formaciones de muy baja permeabilidad (shales), ya que la prueba no drenada requiere tiempos de estabilización muy cortos.

Bajo condiciones no hidrostáticas (prueba triaxial) la roca exhibe un comportamiento dúctil o frágil dependiendo de la presión de confinamiento.

Cálculos

- Graficar la diferencia de esfuerzos vs. Deformación axial. La diferencia de esfuerzos está definida como el esfuerzo principal máximo σ_1 menos la presión lateral σ_3 .
- Graficar los círculos de Mohr. Para ello se ubican los esfuerzos de cizalla en las ordenadas y el esfuerzo normal en las abscisas. Es necesario incluir por lo menos tres círculos de Mohr a diferentes presiones de confinamiento sobre un mismo material, que serían el resultado de tres pruebas de compresión triaxial.
- Dibujar la línea recta que mejor se ajuste (Envolvente de falla) aproximadamente tangente a los círculos de Mohr.



Figura 1.8 Círculo de Mohr para una prueba de compresión triaxial.
Fuente: Modificado Seminario “Stress and Strain”, Carl Sondergeld.

1.3.2. Pruebas de resistencia a la tensión

Las fallas en las rocas muchas veces ocurren bajo resistencia a la tensión, esto debido a que la resistencia de una roca es normalmente es más baja en tensión que en compresión, por lo que es muy importante conocer las técnicas más utilizadas más utilizadas para determinar la resistencia a la tensión. Sin embargo en la práctica, las mediciones de la resistencia a la tensión son difíciles de realizar y poco utilizadas, debido a los problemas relacionados con el agarre de la muestra, puesto que al agarrar la muestra no se debe dañar su superficie y la carga debe aplicarse paralela al eje del espécimen.

La resistencia a la tensión es la propiedad mecánica de las rocas que más presenta dependencia de la forma y tamaño del espécimen de roca a ensayar, por lo que las pruebas indirectas para medir la resistencia a la tensión de las rocas son más comúnmente utilizadas que la prueba de tensión uniaxial.

1.3.2.1 Prueba estándar de resistencia tensil al rajado sobre especímenes intactos de roca.

En la aplicación de la mecánica de rocas usualmente se trata con estados de esfuerzo complicados incluyendo varias combinaciones de esfuerzos de tensión y compresión. Bajo dichas condiciones la resistencia tensil debe ser obtenida bajo esfuerzos compresivos para que ésta sea representativa de las condiciones de campo. La resistencia de tensión al rajado es una de las pruebas más simples en la cual se producen dichos esfuerzos. Desde que la prueba empezó a hacer usada ampliamente surgió la necesidad de utilizar un método estándar para que los datos puedan ser comparables. La prueba estándar, documentada por la norma ASTM D 3967, asegura que el espécimen de roca se rompa diametralmente debido a la tensión actuante a lo largo del diámetro que está sometido a carga.

Descripción del ensayo

La muestra de roca cilíndrica se introduce en un sistema que aplica carga en compresión. La carga se transmite al espécimen a lo largo de la línea de contacto entre los platos superior o inferior y el espécimen (Figura 9). Es sistema está dotado de un mecanismo que registra la carga de rotura que es el valor de interés.

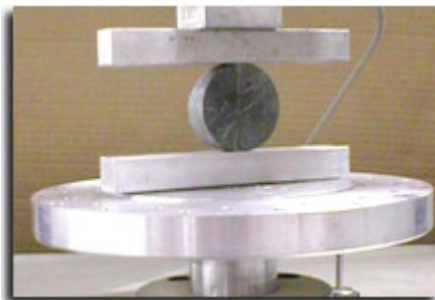


Figura 1.9 Montaje propuesto para la determinación de la resistencia tensil al rajado. Fuente: www.geocomp.com

Cálculos

La resistencia tensil al rajado determinada en esta prueba de laboratorio puede calcularse de la siguiente forma:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1.14)$$

Donde

σ_t = Resistencia tensil al rajado en Mpa o Psi.

P = Máxima carga aplicada por la máquina de prueba en N o lbf.

L = Longitud del espécimen en mm o Pulg.

D = Diámetro del espécimen en mm o Pulg.

1.3.2.2 Prueba de punto de índice de carga

La norma internacional ASTM D 5731 especifica los procedimientos para la determinación del punto de índice de resistencia en núcleos de roca o en muestras de forma irregular. La prueba se puede llevar a cabo en laboratorio o en campo ya que la máquina que realiza la prueba es portátil. El valor encontrado en con la prueba es un valor índice, usado para clasificar y caracterizar la roca estudiada. La prueba se aplica sobre rocas de alta dureza (Resistencia a la compresión superior a 15 Mpa o 2200 Psi).

Descripción del ensayo

La prueba consiste en aplicar carga a una muestra en sentido diametral hasta lograr que el material se fracture, esta prueba comúnmente es usada en ingeniería civil. La prueba de punto de índice de carga se utiliza en la clasificación de materiales rocosos y para estimar otros parámetros tracción o compresión uniaxial. El ensayo determina el índice de resistencia I_s en muestras de roca que requieren de poca preparación y que pueden tener formas regulares o irregulares.

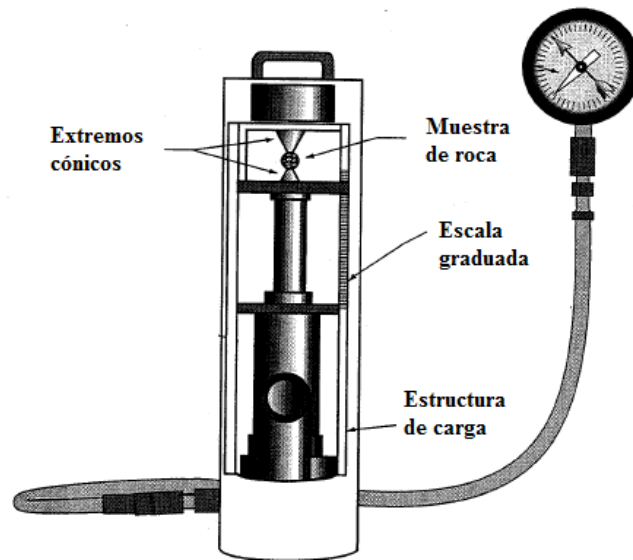


Figura 1.10 Montaje propuesto para la prueba de índice de carga.

Fuente: Modificada de www.nhi.fhwa.dot.gov

Cálculos

El punto de índice de carga (I_s) será:

$$I_s = \frac{F_c}{D_c^2} \quad (1.15)$$

Donde F_c es la carga necesaria para causar la falla y D_e es el diámetro equivalente del espécimen. Por medio de esta prueba se puede medir de una manera indirecta la resistencia a la tensión (T_0), por medio de:

$$I_s = 0.80 T_0 \quad (1.16)$$

1.3.2.3 Prueba brasilera

También llamada prueba de tracción indirecta, esta prueba mide el esfuerzo a la tracción de la roca. Con esta prueba se halla la resistencia a la tensión inducida (T_0), asumiendo que la roca es homogénea e isotrópica y que la elasticidad lineal se mantiene, la fractura primaria empezará en tensión desde el centro del espécimen.

Descripción del ensayo

Para realizar la prueba se utiliza una muestra de roca cilíndrica, donde su longitud (L) es igual o más corta a su diámetro o punto de soporte de la muestra de roca cilíndrica.



Figura 1.11 Montaje propuesto para la prueba de brasilera.

Fuente: www.gcts.com

Cálculos

La resistencia a la tensión está dada por la relación de la carga pico (F_c) y el producto del diámetro por la longitud.

$$T_0 = 0.636 \frac{F_c}{DL} \quad (1.17)$$

Donde T_0 es la resistencia a la tensión inducida y está dada en MPa, D es el diámetro de la muestra y L es la longitud de la muestra de roca. Donde ambos parámetros deben darse en mm. La prueba brasilera tiene dar resultados más representativos que aquellos obtenidos a través de las mediciones de la prueba de resistencia a la carga puntual (Point Load test).

1.4 MECÁNICA DE FRACTURAS

La mecánica de fracturas y particularmente la mecánica de fractura lineal elástica es una ciencia que estudia los mecanismos y procesos de propagación de grietas en sólidos así como la distribución de tensiones y deformaciones que ocurren en un material agrietado o con discontinuidades, sometido a cierta tensión externa. Esta ciencia surgió con los trabajos fundamentales de Griffith (1921, 1924) sobre criterios de propagación de grietas en sólidos. Basados en conceptos de transformación de energía elástica en energía de superficie y por esta razón se conoce como una formulación energética de la mecánica de fractura.

La mecánica de fractura elástica lineal es una disciplina nacida a raíz de los estudios de Griffith en 1921 y que se ha desarrollado rápidamente en las últimas décadas, partiendo de una fuerte básica teórica hasta alcanzar importantes aplicaciones prácticas. Su objetivo primordial es determinar las combinaciones críticas de tres variables relativas a un componente o estructura : la tensión aplicada, el tamaño de los defectos que contiene y la tenacidad de fractura del material. (7)

1.4.1 Modos de fractura (8)

Antes de analizar las variaciones de esfuerzos y deformaciones en cuerpos fisurados sometidos a cargas externas, es necesario definir los diferentes modos de fractura. En este sentido, existen tres modos básicos de desplazamiento de las caras de una fisura cuando es sometida a tensiones, tal como se muestra en la figura 12.

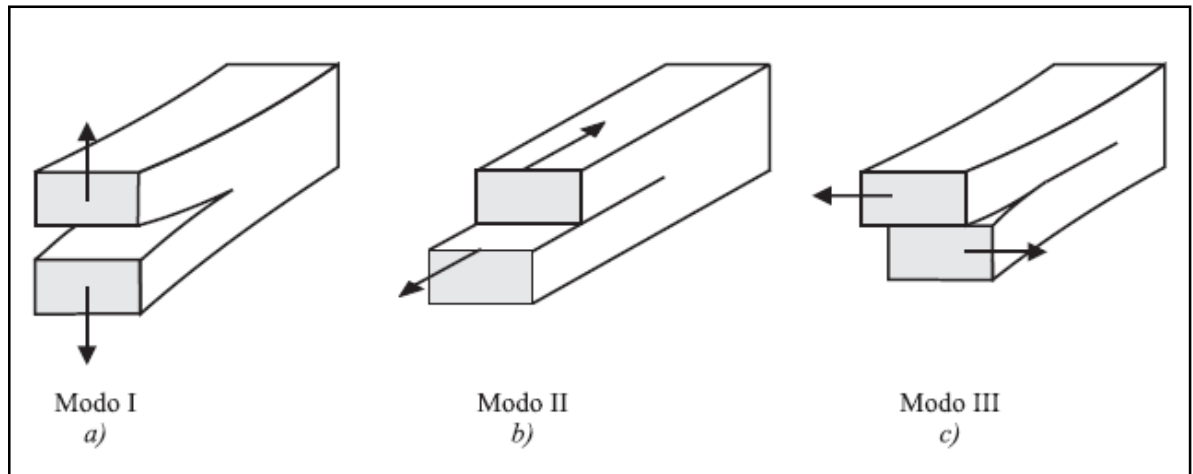


Figura 1.12 Los tres modos básicos de fractura, a) Modo I o de abertura, b) Modo II o de deslizamiento y c) Modos III o de desgarre.

Fuente : www.edicionsupc.es

El modo 1 (modo de abertura) corresponde al modo normal de separación de las caras de la grieta bajo la acción de tensiones normales, el modo II (modo de deslizamiento) se refiere al desplazamiento de los lados de la fractura bajo la acción de tensiones de corte, perpendiculares al frente de la grieta, y el modo III (modo de desgarre) también se produce por deslizamiento y cizalladura de los lados de la fisura en una dirección paralela al frente de grieta.

Un cuerpo fisurado puede ser sometido a cualquiera de los tres modos, o combinación de dos o tres de ellos, siendo el modo I el más importante, especialmente en los sólidos frágiles, ya que una grieta en un material de esta naturaleza tiene tendencia a buscar la orientación que minimiza la tensión de corte, por esta razón en las variables que se analizan, se utiliza el subíndice para denotar que se trata de este modo de apertura.

1.4.2 Tensión de fractura de Griffith

El aspecto fundamental de la mecánica de fractura es definir si una grieta existente en un material de cierta estructura permanecerá estable o se

prolongará bajo ciertas condiciones de tensión. Para poder predecir este comportamiento se han propuesto dos enfoques básicos, en términos de balance de energía y en término de campo de tensiones.

El criterio energético de propagación de grietas constituye la base de la mecánica de fracturas a partir de la solución del problema elástico de tensiones en el vértice de una cavidad elipsoidal en un medio semiinfinito. La solución elástica indica que a medida que los vértices de la elipse se hacen más agudos, las tensiones en ese punto tienden a infinito independiente de que el valor de la tensión aplicada sea muy bajo. Como este caso es similar al de una grieta en un medio semiinfinito, Griffith concluyó que debido a tal singularidad, no podría utilizarse la tensión como criterio de extensión de grietas sino que el problema debía plantearse en términos de balance de energía.

La formulación de Griffith puede ser analizada considerando una placa infinita homogénea e isotrópica, de módulo elástico E , con una grieta central de forma elíptica de longitud $2a$, que es deformada elásticamente por tensiones de tracción σ como se muestra en la figura 1.13.

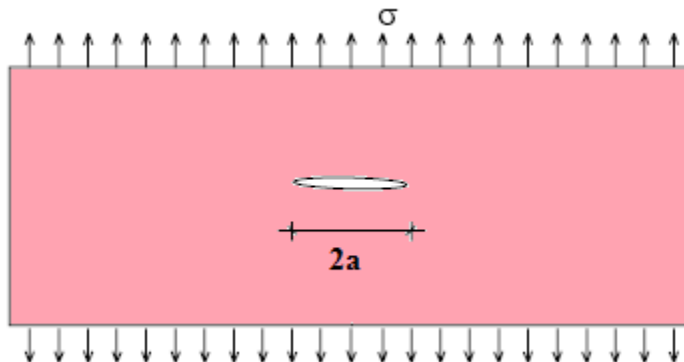


Figura 1.13 Placa semiinfinita con cavidad central de longitud $2a$ (doble punta de grieta) sometida a tensión.

En este caso, Griffith encontró que la energía elástica (U) almacenada en la placa por unidad de espesor es:

$$U = \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} \quad (1.18)$$

Y definió la energía de superficie (W) como:

$$W = 4a\gamma_s \quad (1.19)$$

Donde γ_s es la energía específica de superficie y $4a$ corresponde al área de la superficie de agrietamiento (en este caso se considera un espesor unitario de longitud $2a$ y se multiplica por dos debido a que ese es el número de caras que tiene la grieta).

Cuando la grieta comienza a incrementar su longitud, entra en un estado de equilibrio inestable bajo las tensiones aplicadas y el sistema mecánico transfiere energía de la zona no fracturada a la fractura, a través de un proceso de conversión de energía elástica en energía de superficie. Esta equivalencia de energía se puede expresar matemáticamente como:

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da} \quad (1.20)$$

Como se explica posteriormente mediante balance de energía, el término dU/da refleja implícitamente una reducción en la energía elástica almacenada por la placa, debida a la extensión de la grieta y por tal razón en la ecuación anterior no se incluye un signo menos en la igualdad. Derivando (18) y (19) con respecto a la longitud de grieta se tiene:

$$\frac{dU}{da} = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} \quad (1.21)$$

$$\frac{dW}{da} = 4\gamma_s \quad (1.22)$$

Reemplazando se puede despejar la tensión, que en este caso corresponde a una tensión para la cual se inicia la prolongación de la grieta y se conoce como tensión de fractura de Griffith σ_c :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi a}} \quad (1.23)$$

De manera general, se puede decir que de acuerdo con el criterio de Griffith, para que una grieta se prolongue una longitud da, es necesario que la energía elástica liberada por tal prolongación sea igual o mayor a la energía de superficie que se requiere para que la grieta se prolongue, si la energía liberada es inferior a la energía necesaria para la propagación, entonces la grieta permanecerá estable.

Para el caso de una sola punta de grieta (condición usualmente analizada), ilustrado en la figura 14 sólo se tendría la mitad de la placa y por lo tanto las ecuaciones (21) y (22) quedan de la siguiente forma respectivamente.

$$\frac{dU}{da} = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (1.24)$$

$$\frac{dW}{da} = 2\gamma_s \quad (1.25)$$

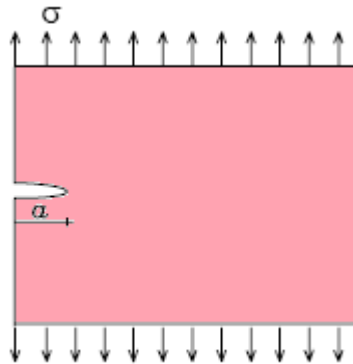


Figura 1.14 Media placa con grieta sencilla de longitud a , sometida a tensión

La tensión de fractura de la ecuación (1.23) no se ve afectada, pues por simetría es igual analizar la placa completa o la mitad de ella.

Las investigaciones de Griffith hicieron dos aportes fundamentales para sentar las bases de la mecánica de fractura: en primer lugar presentan un modelo racional del criterio de avance de una grieta y demuestran que la fractura resulta de un proceso de conversión de energía, que no depende solamente de la tensión aplicada, sino también del tamaño mismo de la grieta y en segundo lugar, mediante la ecuación (23) se tiene una relación entre tensión de fractura y tamaño de grieta que ha sido comprobada repetidamente en materiales frágiles.

1.4.3 Tasa de liberación de energía y energía de fractura

El criterio de extensión de grietas de Griffith puede generalizarse en términos de un balance entre energía disponible (suministrada fundamentalmente por las fuerzas externas) y energía requerida para que se presente tal extensión.

La energía disponible para la extensión de grieta usualmente se denomina tasa de liberación de energía (G) y como lo estableció Griffith, es igual a dU/da , de tal manera que la ecuación (24) se puede expresar como:

$$\frac{dU}{da} = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} = G \quad (1.26)$$

Por su parte, la energía requerida (dW/da), también conocida como energía de fractura o tasa crítica de liberación de energía (G_{IC}) es una propiedad del material que se puede considerar constante en comportamiento elástico. Por la forma como está expresada, tiene dimensiones de fuerza por unidad de extensión de grieta y por eso también se le denomina fuerza resistente al agrietamiento (R).

La condición de G_{IC} se presenta cuando la tensión σ adquiere un valor crítico σ_c , para el cual $dU/da = dW/da$ y por lo tanto de (26) tenemos que:

$$\frac{dU}{da} = \frac{\pi\sigma_c^2 a}{E} = G \quad \text{ó} \quad \sigma_c = \sqrt{\frac{2G_{IC}E}{\pi a}} \quad (1.27)$$

Esta es una forma más general para expresar la tensión de agrietamiento de Griffith y tiene la ventaja de que no involucra la energía específica de superficie (γ_s). Así, el criterio de fractura es el siguiente:

Si $G < G_{IC}$ entonces $da = 0$, no hay extensión de grieta (estable)

Si $G = G_{IC}$ entonces $da \geq 0$, posible extensión cuasi-estática de grieta

Si $G > G_{IC}$ entonces $da > 0$, crecimiento dinámico de grieta (inestable)

1.4.4 Factor de intensidad de tensiones (9)

Griffith planteó el criterio de extensión de grieta basado en un análisis de balance de energía para evitar el problema de la singularidad en la punta, donde de acuerdo con la solución elástica, las tensiones tienden a infinito al aplicarse cualquier carga externa. Posteriormente Irwin desarrolló uno de los más importantes avances de la mecánica de fracturas elástica lineal (LEFM) al formular el problema de extensión de grietas en términos del estado de tensiones del material cerca de la punta probando que este enfoque es en esencia igual al enfoque energético y que existe relación entre el uno y el otro.

Irwin dedujo que el proceso de fractura no podía concentrarse en un solo punto como lo plantea la teoría elástica, sino que se presenta en una zona pequeña próxima a la punta, que denominó zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF), la cual, por el efecto de la deformación, absorbe gran cantidad de energía y mantiene las tensiones dentro de un valor finito.

Con el fin de determinar la distribución de tensiones alrededor de la punta de la grieta, en una placa como la de la Figura 13, Irwin acudió a la función de tensión de Airy (ψ), que es una función especial y que en este caso debe satisfacer simultáneamente las condiciones particulares de tensiones, deformaciones y de compatibilidad de tensión-deformación que se presentan en ese sector.

Para la solución de la función de tensión de Airy se pueden usar diferentes funciones complejas. Si el agrietamiento es del modo I, resulta conveniente usar la solución propuesta por Westergaard, en cuyo caso el campo de tensiones alrededor de la punta de la grieta mostrado en la figura 15, está dado de manera general por:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\phi) \quad (1.28)$$

Donde $f_{ij}(\theta)$ es una función conocida de θ y K_I es el factor de intensidad de tensiones (FIT) para el modo I de agrietamiento y se puede expresar como:

$$K_I = \beta\sigma\sqrt{a} \quad (1.29)$$

Donde a es la longitud de la grieta inicial o entalla inicia y β es un factor adimensional, que para una placa infinita corresponde a $\sqrt{\pi}$ y en tal caso:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.30)$$

La importancia del factor de intensidad de tensiones radica entonces en que al conocerse K_I , se puede determinar completamente el campo de tensiones alrededor de una grieta. Además K_I constituye un parámetro de similitud útil para poder comparar las características de agrietamiento de elementos de un mismo material pero con diferente geometría y diferente longitud de grieta, pues este principio indica que si dos diferentes grietas, en diferentes estructuras tienen una misma K_I y están sometidas al mismo modo de agrietamiento, se debe esperar un comportamiento similar en cuanto al avance o estabilidad de la grieta, debido a que el campo de tensiones es el mismo en ambos casos, por lo tanto, una grieta se propagará cuando el factor de intensidad de tensiones alcance un valor crítico, denominado factor de intensidad de tensión crítico (K_{IC}), también conocido como tenacidad a la fractura.

El valor de K_{IC} puede obtenerse de ensayos de fractura para una condición en la cual la tensión es la crítica ($\sigma = \sigma_{cr}$) y se considera una propiedad del material, que de acuerdo con la ecuación 1.31 está dada por:

$$K_{ic} = \beta_{a/L} \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (1.31)$$

De manera similar al enfoque de tasa de liberación de energía, el criterio de avance de una grieta en términos del factor de intensidad de tensiones está dado por las siguientes condiciones:

Si $K_I < K_{ic}$, entonces no hay extensión de grieta (estable)

Si $K_I = K_{ic}$, entonces posible extensión cuasi-estática de grieta

Si $K_I > K_{ic}$, entonces crecimiento dinámico de grieta (inestable)

A partir de (26) y (29), la relación entre la tasa de liberación de energía y factor de intensidad de tensiones en condición de tensión plana se puede expresar como:

$$G_{ic} = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (1.32)$$

En muchos materiales, tales como los metales, las propiedades no se alteran significativamente con los cambios ambientales normales, sin embargo, en suelos la situación es diferente, puesto que las propiedades geomecánicas, incluida la resistencia a la fractura está directamente relacionada con factores como la humedad, la densidad, la historia de tensiones, etc., de forma tal que al hablar de K_{IC} como propiedad del material, es necesario identificar las condiciones particulares para las cuales este valor es representativo.

1.4.5 Zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF)

La distribución de tensiones y σ próximas a la punta de la grieta, para $\theta = 0$ (figura 15a), se puede obtener a partir de (28) como:

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (1.33)$$

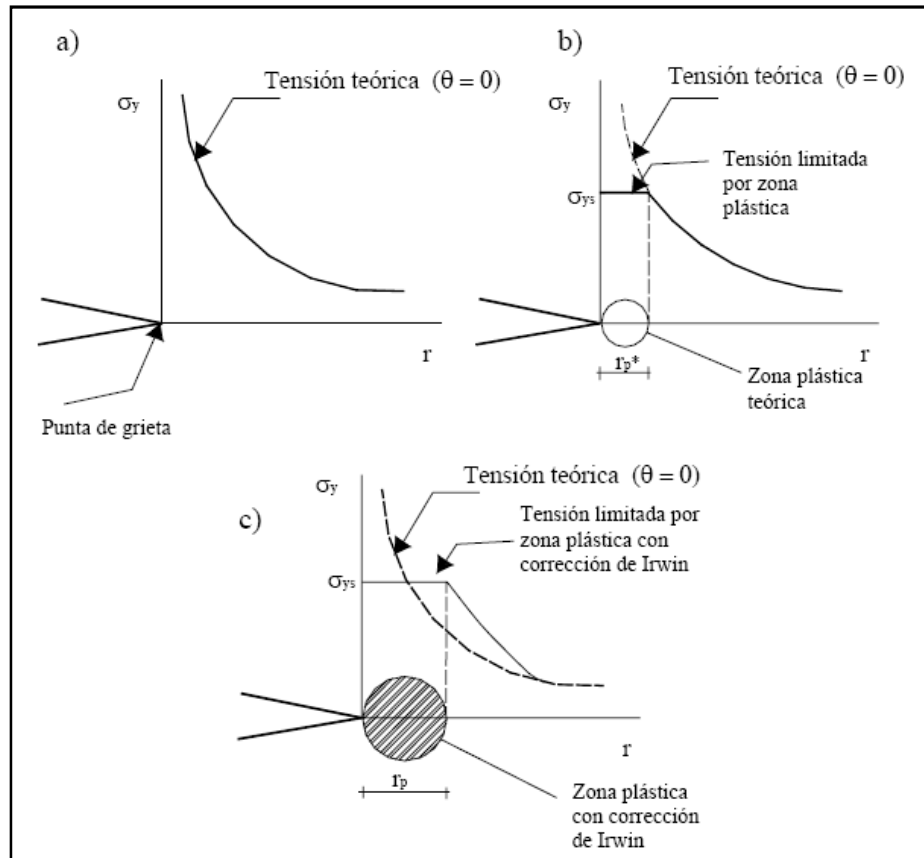


Figura 1.15 Zona plástica en la punta de una grieta: a) tensión teórica en un medio elástico, b) zona plástica teórica próxima a la punta de la grieta, c) zona plástica con corrección de Irwin.

Puede notarse en la figura que en la punta de la grieta la tensión tiende a infinito y que se reduce gradualmente a medida que se aleja de la punta. Evidentemente, el valor de la tensión no puede llegar a infinito, ya que el

material al alcanzar a su límite de fluencia sufre deformaciones plásticas que impiden que la tensión siga aumentando.

La distancia hasta la cual se producen deformaciones plásticas, corresponde a un círculo de radio r_p^* que se obtiene al proyectar en las abscisas el punto de intersección entre la tensión teórica y el límite de fluencia o valor máximo que puede tener la tensión en condiciones elásticas (σ_{ys}), tal como se indica en la Figura 15b. Este círculo se conoce como zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF). El valor de r_p^* en tensión plana se obtiene de (33) como:

$$r_p^* = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{yz}} \right)^2 \quad (1.34)$$

Experimentalmente se ha encontrado que la longitud de la zona plástica es en realidad mayor que r_p^* . Irwin propuso una corrección basada en asumir que la mayor extensión de la zona plástica era similar a una mayor longitud de grieta, puesto que los desplazamientos aumentan y la rigidez disminuye. A partir de este análisis encuentra que el valor corregido de la longitud de la grieta es $a+r_p^*$ y que la extensión de la zona plástica es aproximadamente el doble del valor sin corregir. A esta modificación se le denomina corrección de Irwin (Figura 15c), de forma tal que:

$$r_p = 2r_p^* = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{yz}} \right)^2 \quad (1.35)$$

El coeficiente $1/\pi$ de la ecuación anterior fue obtenido para metales, sin embargo, para materiales cuasifrágiles como el material de roca, cuya fractura puede presentar microagrietamientos, avances curvilíneos y reblandecimiento por deformación, este coeficiente puede presentar

variaciones entre 2 y 5 es decir que la zona plástica en estos materiales es mucho mayor que en metales.

2. TENACIDAD DE FRACTURA APLICADA A MATERIAL DE ROCA

Históricamente la mecánica de fracturas es un desarrollo de los estudios de la mecánica de materiales relacionada con los esfuerzos, en el cual la carga en una estructura es comparada con algún valor de esfuerzo para determinar si la estructura fallará o no. (9)

El parámetro básico del material en la mecánica de fractura es la tenacidad de fractura, también conocido como factor de intensidad de esfuerzo crítico. Debido a que la mecánica de fracturas describe específicamente el efecto de las fracturas, las pruebas de tenacidad de fractura difieren de las pruebas comunes de esfuerzos en que los especímenes que se trabajan en este caso requieren fracturas bien definidas.

2.1 DEFINICIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA (10)

La tenacidad de fractura es definida como la propiedad que describe la habilidad de un material que contiene una fractura para resistir a la falla a medida que se va aplicando una carga. La tenacidad de fractura es denotada como K_{Ic} y sus unidades son $\text{MPa}\sqrt{m}$. Donde el subíndice “Ic” indica el modo I de apertura de la fractura bajo un esfuerzo tensil perpendicular a ésta.

Esta definición viene del concepto del factor de intensidad de esfuerzo desarrollado en la mecánica elástico-lineal de fractura. Los factores de intensidad de esfuerzo son una medida de la singularidad de la magnitud de esfuerzos en el extremo de la fractura y son función de los parámetros de carga (como la presión en la fractura y los esfuerzos in-situ) y la geometría del cuerpo (incluida la fractura).

La piedra angular en la mecánica lineal de fractura es el hecho de que un cuerpo sólido es caracterizado por una propiedad específica. “el factor de intensidad de esfuerzo crítico” K_{Ic} o tenacidad de fractura. De tal manera que

la fractura no se propaga ($K_i < K_{Ic}$) o se propaga de tal manera que $K_i = K_{Ic}$ representa un equilibrio en el crecimiento de la fractura, en otras palabras Cuando K alcanza el valor de K_{Ic} , se asume que ocurre un crecimiento catastrófico de la fractura. Entonces, el diseño seguro de una estructura es donde K permanece debajo de K_{Ic} , y la falla o fragmentación se alcanzará si K_{Ic} es superada.

Griffith fue el primero en crear una conexión cuantitativa entre la resistencia y el tamaño de fractura usando un balance global de tasas de energía para identificar la etapa crítica en la que empieza el crecimiento inestable de la fractura en materiales frágiles. En esta aproximación la tasa de energía es balanceada mediante un término de resistencia del material, que puede ser definido como la resistencia al crecimiento de la fractura. Este término fue definido en su momento como la energía específica de superficie, con unidades de J/m^2 .

La relación entre la tenacidad de fractura y la energía (efectiva) de superficie es simplemente.

$$K_{IC} = \sqrt{(2\gamma_{eff}E)} \quad (2.1)$$

Donde el factor 2 conecta las dos caras de la fractura con el extremo de la fractura, el subíndice eff implica que todos los efectos disipadores al extremo de la falla y sus alrededores están incluidos en γ , y E es en modulo apropiado del material.

Así como la relación básica $K = K_{Ic}$ expresa un balance entre las tasas de energía disponible o disipada en el momento de iniciación de la fractura, estas tasas deben ser también balanceadas durante el crecimiento de la fractura. Entonces, la tenacidad de fractura de un material es una forma cuantitativa de expresar su resistencia a la extensión (propagación catastrófica) de la fractura, o la tasa de energía consumida por la fractura para crear nuevas superficies. Si el material tiene un valor alto de tenacidad

de fractura, éste probablemente presente fractura dúctil ya que la fractura frágil se presenta sólo en materiales con un bajo valor de tenacidad de fractura.

2.2 APLICACIONES DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN LA INDUSTRIA PETROLERA

Es importante destacar la aplicabilidad de la tenacidad de fractura y los estudios en mecánica de fracturas a diferentes campos de la industria, tales como Ingeniería civil, ingeniería de materiales, minería, entre otros; ayudando a prevenir problemas relacionados con la falla de los diferentes materiales, prediciendo las características del desarrollo y propagación de fracturas debido a desgaste o fatigamiento. Sin embargo, en ingeniería de petróleos, estos estudios envuelven aplicaciones donde la fractura se considera tanto beneficiosa como dañina, envolviendo una descripción cuantitativa de la transformación de los materiales hasta su ruptura, mediante el crecimiento de un plano de falla cuando una carga es aplicada.

Considerando que los materiales con valores mayores de tenacidad de fractura son más resistentes a la falla que aquellos con valores bajos bajo las mismas condiciones de carga, este hecho es particularmente importante cuando se consideran fallas potenciales de drill pipe donde deben ser tenidos en cuenta factores tales como las propiedades de fractura e impacto. La tenacidad de fractura en este tipo de materiales marca la diferencia acerca de cómo se comportan los materiales de los que están hechos los drill pipe, si se considera que cada uno de los pegues de la sarta de perforación tiene un comportamiento similar al de una fractura por lo que los procesos de fallamiento en el drill pipe siguen comúnmente los principios formulados por la mecánica de fracturas y pueden modelarse teniendo en cuenta los valores de tenacidad de fractura del material. (11)

Aunque la aplicación anterior involucra principalmente el área de la ingeniería de materiales más que la ingeniería de petróleos, es un hecho que la tenacidad de fractura es cada vez más utilizada como parámetro de diseño de la sarta de perforación.

Sin embargo las aplicaciones más comunes de la tenacidad de fractura en la industria del petróleo tienen que ver con la determinación de esta propiedad en rocas; varios ejemplos en la industria del petróleo han demostrado que la tenacidad de fractura puede ser usada tanto como un parámetro de ayuda al momento de prevenir problemas como para mejorar los procesos ya existentes, ya que ésta es de gran utilidad en el momento de determinar el diseño específico de procedimientos tales como perforación, fracturamiento hidráulico, fracturamiento mediante conducción de gas, expansión de cráteres, entre otros; como también facilita el análisis de fenómenos de inestabilidad de pozo y la interpretación de características geológicas.

A continuación se presentan las aplicaciones más comunes en la industria petrolera de la tenacidad de fractura en rocas.

2.2.1. Selección de brocas (12)

El desempeño óptimo de la perforación depende de un gran número de factores tales como el tipo de roca, el tipo de broca, la interacción roca-broca, el diseño hidráulico y la estabilidad de las formaciones; por esta razón en las últimas décadas se han incrementado los esfuerzos para entender cada uno de estos factores.

En el caso particular del estudio del material de roca y su interacción con la broca de perforación requiere de una investigación interdisciplinaria que incluye conocimientos en áreas tales como geología de las rocas de formación, estructura y comportamiento químico de los minerales y su estructura, física referente a la energía y aplicación de fuerzas, aspectos de mecánica de rocas relacionados con los procesos de deformación, y

mecánica de fracturas relacionada con el proceso de fallamiento. Sin embargo las áreas en las que los estudios han sido principalmente enfocados incluyen la tenacidad de fractura como propiedad de la roca de formación y su interacción con diferentes tipos de broca.

Los estudios en esta área han involucrado diferentes tipos de rocas; desde homogéneas e isotrópicas a isotrópicas con alto grado de heterogeneidad. Los valores medidos de tenacidad de fractura recopilados, junto con los valores medidos de resistencia compresiva y tensil obtenidos mediante procedimientos estándares, han sido analizados en términos de ruptura de roca mediante fallamiento compresivo o cortante como ocurre en el caso de brocas PDC o mediante un modo de fractura tensil indirecta como en el caso de las brocas tricónicas.

Las investigaciones en el área han encontrado que valores altos de tenacidad de fractura son características de una falla dúctil asociada con un alto número de generación de fracturas; por su parte valores bajos de tenacidad de fractura normalmente representan una falla frágil y rápida. Además, se encontró que la tenacidad de fractura K_{Ic} es inversamente proporcional a la resistencia tensil, lo que sugiere que las rocas más fuertes pueden ser fácilmente rotas bajo un modo de propagación de fractura.

La diferencia básica entre brocas cónicas y PDC, es que mientras la primera aplasta la roca bajo una influencia directa del peso sobre la broca envolviendo compresión bajo los dientes y/o tensión indirecta en la vecindad generando de esta manera un daño extensivo que incluye cuttings cerca a la interface roca-broca, la segunda perfora la roca bajo un modo cortante con la influencia de una fuerza horizontal causada por el torque en la broca. La siguiente figura clarifica estos conceptos esquemáticamente.

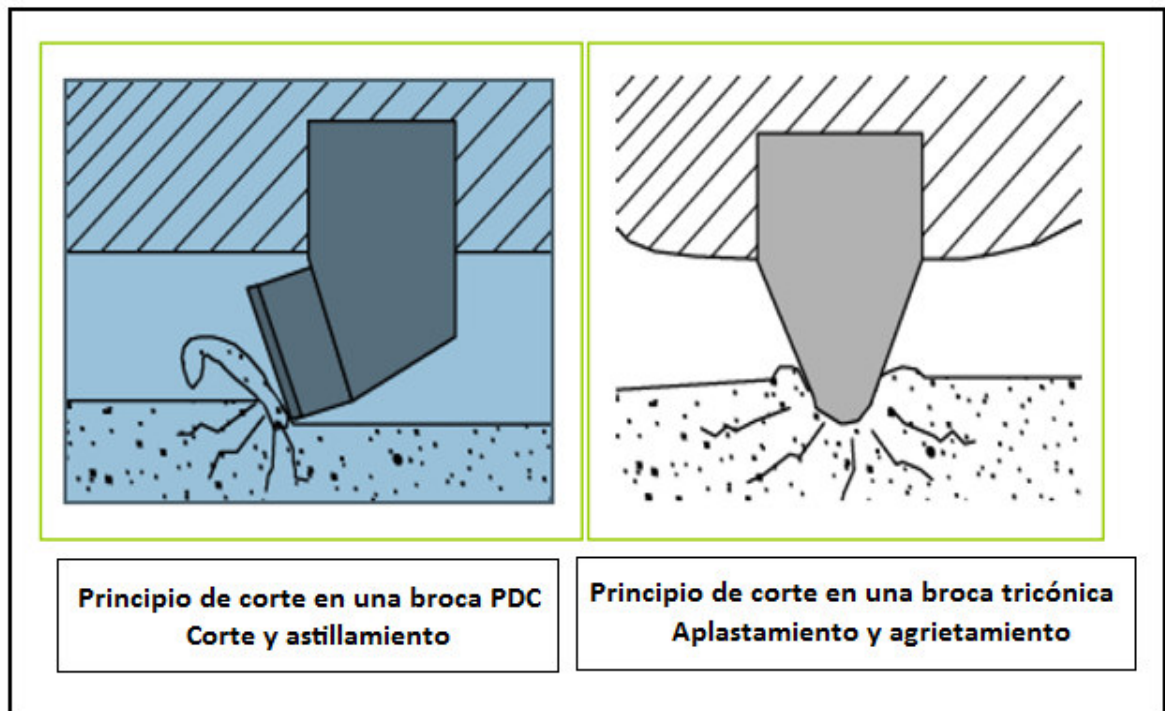


Figura 2.1 Diagrama esquemático mostrando los principios de fallamiento en brocas PDC y cónicas. Fuente: Modificada, AADE-05-NTCE-62

Ya que se ha demostrado que la tenacidad de fractura es inversamente proporcional a la resistencia tensil y compresiva, las rocas con valores bajos de K_{Ic} (con altos valores de resistencia tensil y compresiva) tendrán la tendencia a fallar mucho más rápido mediante un sistema de propagación de fracturas que esperando exceder la resistencia cortante o compresiva. Por lo tanto las brocas cónicas son recomendadas al momento de perforar rocas con alta resistencia compresiva (valores bajos de tenacidad de fractura) debido a que en este caso las fuerzas tensiles predominan sobre las fuerzas cortantes. En el caso contrario las brocas PDC son comúnmente utilizadas ya que han demostrado su eficiencia en la perforación de formaciones con rocas duras con comportamiento dúctil.

2.2.2 Caracterización de yacimientos naturalmente fracturados (13)

La evaluación de la geometría de las fracturas naturales de subsuelo ha sido un área de difícil desarrollo debido a los problemas de muestreo inherentes al pozo y las implicaciones de los métodos de investigación indirectos tales como la sísmica.

Debido a estas limitaciones en la capacidad de observación de las fracturas naturales, se requiere del desarrollo de métodos predictivos que permitan su caracterización. Una de estas aproximaciones consiste en el estudio de la mecánica de fracturas en rocas sedimentarias y más específicamente el crecimiento de las fracturas.

Las simulaciones basadas en principios geomecánicos para caracterización de fracturas, combinan el conocimiento físico del proceso de fracturamiento con la medición de un pequeño grupo de propiedades de la roca y las condiciones geológicas en los límites, para así predecir las propiedades del grupo de fracturas incluso en el caso en el que no se hayan desarrollado observaciones directas.

Estas aproximaciones han permitido la determinación válida de los atributos físicos de las fracturas y su relación. Un parámetro de importancia en este tipo de investigaciones es el crecimiento subcrítico de la fractura, el cual controla el espaciamiento, longitud, conectividad y apertura de las fracturas. Una de las maneras de describir el crecimiento subcrítico de la fractura es la siguiente relación empírica.

$$V = A \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^n \quad (2.2)$$

Donde V es la velocidad de propagación del crack, K_I es el modo I de factor de intensidad de esfuerzos, K_{IC} es la tenacidad de fractura y A es una constante. El exponente n es llamado índice subcrítico de fractura y es el que determinará el orden de la velocidad de propagación de fractura. La siguiente figura muestra los resultados de la simulación para diferentes valores de n .

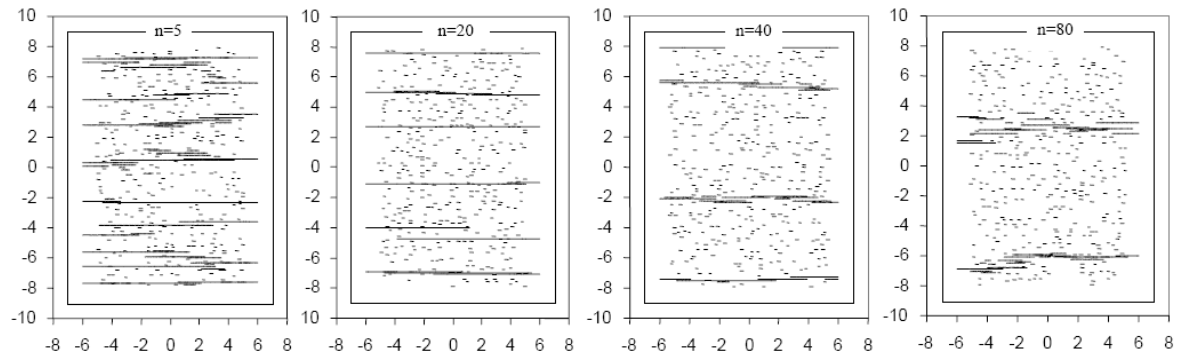


Figura 2.2 Resultados de la simulación YNF usando la propiedad de tenacidad de fractura. Fuente: SPE/ISRM 78207

En este caso se puede ver como la tenacidad de fractura hace parte de los parámetros necesarios para determinar la velocidad de propagación de fracturas, y más específicamente la relación de ésta con el factor de intensidad de esfuerzos. Si la razón entre K_I y K_{Ic} es menor a 1, se entiende que la velocidad de propagación de fractura será mínima ya que la intensidad de esfuerzos no será suficiente para lograr que las fracturas iniciales tengan un crecimiento significativo. En el caso contrario, donde la relación es mayor a 1, la velocidad de propagación de fractura será determinada principalmente por el índice subcrítico de fractura, que depende del tipo de roca y los cambios diagenéticos que ésta ha sufrido a través del tiempo.

2.2.3 Operaciones de Fracturamiento hidráulico

Diariamente se realizan miles de operaciones de fracturamiento alrededor del mundo para comunicar efectivamente el pozo con el yacimiento mediante fracturas relativamente cortas y anchas. Sin embargo, antes de cualquier operación se debe contar con una buena caracterización del material y así lograr el diseño apropiado que logre fracturas con la longitud y grosor requerido.

Propiedades como la tenacidad de fractura, porosidad, permeabilidad, módulo de Young y Poisson son importantes a la hora de caracterizar el

desempeño de los materiales y generar datos para el diseño de tratamientos de fracturamiento hidráulico en formaciones con buena permeabilidad, tales como las areniscas. (14)

Los tratamientos de fracturamiento son realizados de manera rutinaria en formaciones con relativamente alta permeabilidad para comunicar efectivamente el pozo con el yacimiento a través de fracturas relativamente pequeñas y gruesas, por eso es que se requiere de una caracterización bien definida del material para alcanzar el diseño adecuado de los procesos de estimulación.

Actualmente, la aplicación más extendida de la propiedad de tenacidad de fractura tiene que ver con el cálculo de la resistencia a la tensión ó resistencia a la tensión inducida, que es un parámetro de imprescindible en el diseño de operaciones de fracturamiento hidráulico. La siguiente ecuación muestra la relación entre la tenacidad de fractura y la resistencia a la tensión.

$$T_0 = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}} \quad (2.3)$$

Donde T_0 es la resistencia a la tensión de la roca, a_c es el tamaño del defecto en la masa rocosa y K_{Ic} es la tenacidad de fractura del material. La figura siguiente muestra el papel que juegan las fracturas en los procesos de fracturamiento hidráulico; en estos casos la tenacidad de fractura juega un papel importante ya que el buen diseño del proceso de fracturamiento índice directamente en la formación de interés. (15)

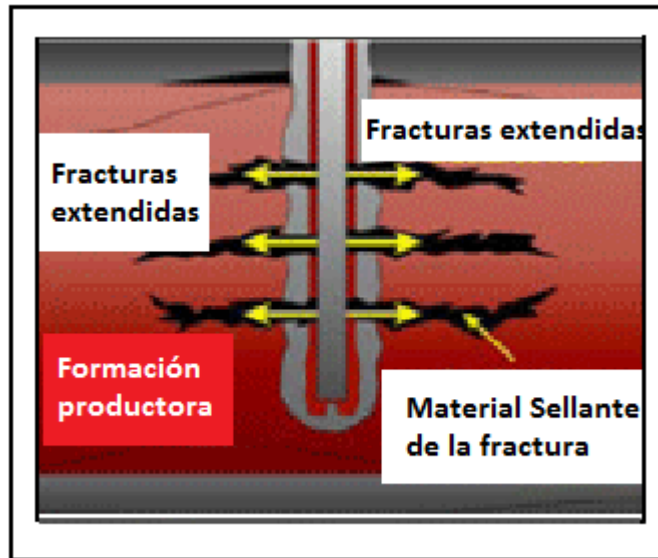


Figura 2.3 Fracturas en procesos de fracturamiento hidráulico

2.3 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA TENACIDAD DE FRACTURA (16; 17; 14)

En la definición de tenacidad de fractura se asume que la roca es homogénea y linealmente elástica, sin embargo estas condiciones son difíciles de encontrar en la práctica. Debido a estas condiciones de no linealidad asociada con el crecimiento de la fractura en la roca, un valor aparente de K_{Ic} es propuesto, el cual depende de la geometría de las muestras y las condiciones límites.

Incluso cuando la mecánica de fracturas elástica lineal es considerada imperfecta a la hora de describir la propagación de fracturas en la roca, los fundamentos de ésta son considerados atractivos a la hora de usar métodos de simulación numérica pues permiten resultados bastante aproximados en un tiempo razonable, ya que criterios más sofisticados requieren de un tiempo de iteración mucho mayor lo que los hace poco prácticos y generalmente no viables. Por lo que los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante la teoría elástica lineal son usados para obtener una

predicción razonable de la geometría de la fractura, sin embargo estos valores deben ser representativos de la tenacidad de fractura bajo condiciones in-situ para caracterizar los procesos en los que esta propiedad se ve envuelta.

A continuación se presentan diferentes factores que causan cambios considerables en los valores de tenacidad de fractura. Ya que los valores de tenacidad de fractura son normalmente calculados a partir de pruebas de laboratorio, determinar la tenacidad de fractura real de las muestras bajo unas condiciones específicas de operación se hace un proceso dispendioso y poco práctico debido a la variedad de los procesos en donde esta propiedad esta involucrada. De esta manera, los efectos de los siguientes parámetros en la tenacidad de fractura han intentado ser corregidos para cada uno de los procesos en donde se aplica el concepto; de esta manera las pruebas de laboratorio normalmente se realizan en rocas limpias y secas, y bajo condiciones estándares y posteriormente se realizan las correcciones necesarias dependiendo del proceso donde la tenacidad de fractura vaya a ser aplicada y las consideraciones que éste involucre.

2.3.1 Efectos de escalamiento en rocas homogéneas

Un problema en la determinación de K_{Ic} está relacionado con el comportamiento del extremo de la fractura en rocas que son consideradas homogéneas a gran escala. A pesa de que en la mecánica de fractura elástica lineal predice infinitos esfuerzos en el extremo del crack, en la realidad la roca no puede soportar estas condiciones, y una zona no lineal de microfracturas se desarrolla alrededor del extremo de la fractura. Si esta zona no lineal es grande comparada con la longitud del crack, la mecánica de fractura lineal elástica no puede ser aplicada sin una corrección debido a la longitud de fractura, en caso contrario los principios de éste área pueden ser utilizados.

El tamaño de la zona afectada puede estar en un rango bastante ancho que va desde algunos milímetros hasta alcanzar varios centímetros y es función del estado preexistente de esfuerzos y del tipo de roca. Sin embargo, durante las pruebas de tenacidad de fractura en laboratorio normalmente la zona afectada tiende a ser grande lo que complica la interpretación de datos y el efecto de escalamiento. Estas consideraciones hacen que en el trabajo de pruebas de laboratorio de tenacidad de fractura sea recomendado trabajar con especímenes grande con una fractura inducida de un tamaño considerable ya que en este caso la tenacidad de fractura se vuelve independiente del tamaño de la muestra.

2.3.2 Efecto de las heterogeneidades a gran escala

La existencia de heterogeneidades a gran escala en la formación ha estudiar puede ser un factor que contribuya al incremento en la tenacidad de fractura aparente. Los estudios que han intentado medir los valores de tenacidad de fractura in-situ para fracturamiento hidráulico han indicado que estos valores están entre uno y dos valores de magnitud más altos que los medidos en laboratorio en muestras pequeñas.

Experimentos de laboratorio utilizando tanto las teorías lineal y no-lineal han demostrado que este tipo de heterogeneidades y discontinuidades afectan la energía requerida para la propagación de la fractura, y consecuentemente incrementa los valores de tenacidad de fractura.

El grado de incertidumbre asociado con estas mediciones de tenacidad de fractura en subsuelo es bastante alto por lo que para calcular el valor real de K_{Ic} es necesario contar con la forma exacta de la fractura y una descripción precisa de los esfuerzos in-situ que afectan la formación.

2.3.3 Efecto de la presión y temperatura

Varias investigaciones han considerado el efecto de la presión de confinamiento en la tenacidad de fractura, donde siempre se ha encontrado un incremento de la tenacidad de fractura a medida que se le incrementa la presión de confinamiento. El efecto de la presión de confinamiento en la tenacidad de fractura puede ser atribuida a su influencia en la zona de comportamiento no lineal que se desarrolla cerca al extremo de la fractura, pese a esto no se ha encontrado una explicación detallada de este fenómeno.

Pruebas bajo condiciones incrementales de temperatura han demostrado que la tenacidad de fractura de las areniscas no varía considerablemente a valores de temperatura relativamente bajos ($T \approx 125^{\circ}\text{C}$). sin embargo a medida que la temperatura alcanza valores mayores se presenta un incremento considerable de los valores de tenacidad de fractura del material de un orden entre el 30 y 40%.

El efecto combinado del incremento de la tenacidad de fractura y el incremento de la temperatura en los valores de tenacidad de fractura presenta un comportamiento un poco más complejo, ya que presenta algunos rangos donde disminuye y otros donde se presenta un incremento considerable. Esto ha intentado ser explicado bajo diferentes teorías; por ejemplo, en el caso del aumento de la presión de confinamiento, ésta causa el cierre de las microfracturas existentes, haciendo que el material de roca se vuelva más tenaz, causando un incremento en la tenacidad de fractura. Sin embargo la mayoría de las areniscas se expanden como producto del incremento en la temperatura, aunque debido a que la expansión térmica bajo efectos de presión de confinamiento no puede ser absorbida por las microfracturas naturales que fueron cerradas por el efecto de la presión, nuevas microfracturas son creadas en el material de roca, causando una disminución en la tenacidad de fractura. El conjunto de estos dos fenómenos

produce un efecto combinado difícil de modelar de manera general y que es relativa al tipo específico de roca.

2.3.4. Efecto de la presión de poro

El incremento en la presión de poro normalmente causa una disminución en el esfuerzo efectivo que actúa que actúa en un plano potencial cortante de falla. Si el incremento en la presión de poro es lo suficientemente grande, las condiciones serán tales que la roca fallará ya sea por propagación a lo largo de un plano pre-existente o mediante la creación de un nuevo plano cortante, lo que se verá reflejado en un consumo de energía que resultará en un incremento en la tenacidad de fractura aparente.

Los efectos poroelásticos también influyen la magnitud del factor de intensidad de esfuerzos; su importancia depende, sin embargo, de la velocidad de propagación relativa a la velocidad de difusión de le fluido en la roca, por lo que dos efectos diferentes toman lugar. El primer efecto es demostrado por el contraste en la rigidez de la respuesta drenada y la no drenada del fluido filtrado en la roca; a medida que la velocidad de propagación de fractura se incrementa, la región alrededor del extremo de la fractura se vuelve más blanda debido a que es drenada. Esta zona blanda es parcialmente protegida por la región rígida (no drenada) más alejada del extremo de la fractura. Este mecanismo para retardar la propagación es asociado con un decremento en el factor de intensidad de esfuerzos.

El segundo efecto, aún más importante, es la reducción de el factor de intensidad de esfuerzos asociado con fugas; los incrementos en la presión de poro alrededor de la fractura alrededor de la fractura resultantes de las fugas causan una reducción en el grosor de la fractura y por ende del factor de intensidad de esfuerzos. Este efecto encuentra su punto máximo a pequeñas velocidades y desaparece a medida de la velocidad se incrementa.

2.3.5 Crecimiento de fractura subcrítico

Todos los fenómenos previamente descritos pueden resultar en una subestimación del valor aparente de tenacidad de fractura. Sin embargo, el crecimiento subcrítico de fractura normalmente está ligado a una sobreestimación de K_{Ic} , este concepto se relaciona a las fracturas que presentan propagación a un valor de intensidad de esfuerzos significativamente menor que el valor de tenacidad de fractura. Este fenómeno, significativo sólo a valores muy bajos de velocidad de propagación, es principalmente una función de el ambiente químico al que la roca está expuesto.

3. PROPIEDADES DE LAS ARENISCAS

3.1 DEFINICIÓN DE ARENISCAS

Las rocas sedimentarias clásticas (klastos = roto) se forman a partir de la acumulación, compactación y cementación de partículas y fragmentos de rocas (sedimentos). Estos sedimentos se originan mediante procesos de meteorización física o química y son trasladados por la gravedad, el hielo, el agua o el viento. (18)

La clasificación de las rocas clásticas se basa en la composición de los granos minerales y la textura; que incluye el tamaño, forma, orientación y empaquetamiento de los granos. Desde fines del siglo XIX los sedimentos han sido clasificados según el tamaño de las partículas, proponiéndose varias escalas granulométricas.

La escala universalmente aceptada es la Udden-Wenworth, la cual reconoce cuatro tamaños básicos de partículas: gravas (mayores de 2 mm), arenas (entre 2 y 1/16 mm), limos (entre 1/16 y 1/256 mm) y arcillas (inferiores a 1/256 mm).

Los sedimentos (materiales inconsolidados) tras el proceso de litificación, que incluye la compactación y cementación de los granos minerales, dan origen a una sedimentita (roca sedimentaria). De esta manera, en el caso de las arenas, éstas dan origen a las areniscas.

La arenisca proviene de granos gruesos, finos o medianos, bien redondeados; de textura detrítica o plástica. Las areniscas figuran entre las rocas consolidadas más porosas, y según el tamaño y la disposición de los

espacios vacíos o poros, las areniscas muestran diversos grados de permeabilidad.

La permeabilidad en este tipo de rocas es considerable, por lo que las formaciones de areniscas normalmente son el reservorio de grandes volúmenes de hidrocarburos alrededor del mundo. Esto ha hecho que un gran número de investigaciones hayan sido llevadas a cabo para caracterizar este material rocoso y de esta manera optimizar cada uno de los procesos en los que las areniscas se ven involucradas en su papel como formaciones de interés en la industria petrolera.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ARENISCAS (18; 6)

Determinar los elementos que conforman la textura de las areniscas, así como la composición mineralógica de su fracción granular, es de importancia identificar la muestra que se esté analizando, bajo alguno de los muchos esquemas de clasificación. Cabe aclarar que la composición mineral tanto de la matriz, del cementante y de los minerales accesorios y de alteración, no son determinantes para clasificar las areniscas. Existen alrededor de 50 esquemas de clasificación de arenisca diferentes, sin embargo el más usado es el método propuesto por Folk.

3.2.1 Clasificación de las areniscas a partir del criterio de Folk

Para clasificar las areniscas se utiliza la clasificación de Folk (1974). Esta clasificación se basa fundamentalmente en el porcentaje de matriz (material detrítico de tamaño menor a 30 micras) y en la naturaleza de los clastos, que se agrupan en tres tipos: cuarzo (Q), feldespatos (Fto) y fragmentos de roca (Fr).

En función del porcentaje de matriz se establecen dos tipos básicos de areniscas:

- Grauvacas, si la matriz representa más del 15% del volumen.
- Arenitas, si la matriz representa menos del 15% del total.

A su vez las arenitas se dividen en cuarzoarenitas, litoarenitas y arcosas en función de los porcentajes de cuarzo (Q), feldespato (Fto) y fragmentos de rocas (Fr). Para establecer esta clasificación se utiliza un diagrama triangular mostrado en la figura 3.1.

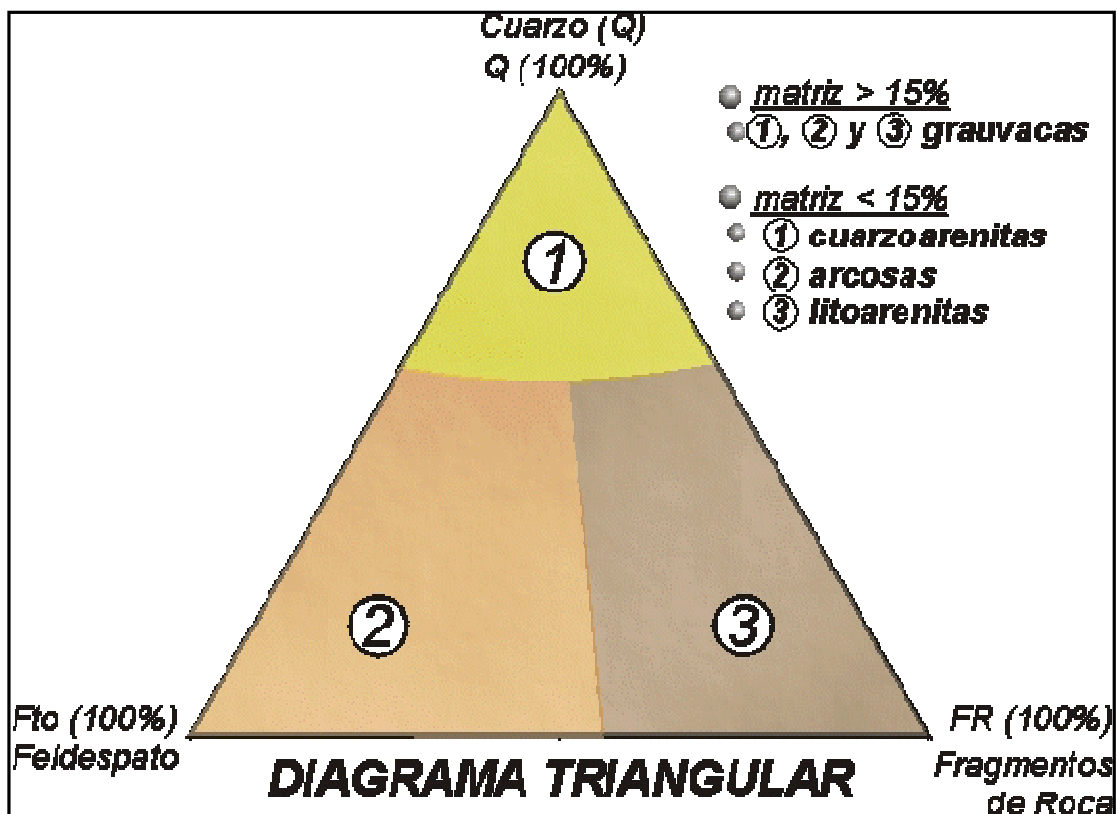


Figura 3.1 Diagrama de Folk

3.3 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS ARENISCAS

Como se ha tratado en capítulos anteriores; la relación entre el esfuerzo y deformación en las rocas depende de su constitución, características y las condiciones externas a las que se ve expuesta. De esta manera pueden manifestarse, para una carga constante, deformaciones con diferentes características y grados de intensidad. (13; 18)

Como material, la roca es discontinua, en todas las escalas, sus relaciones de esfuerzo-deformación son no-lineales e inelásticas, es decir, los ciclos carga-descarga resultan en histéresis. Además, las rocas experimentan la deformación permanente, cuando están sujetadas a las tensiones suficientemente altas. Estas deformaciones cambian sus características mecánicas drásticamente. Este comportamiento mecánico característico de rocas es consecuencia de su naturaleza discontinua, la fragilidad de sus sólidos constitutivos, y su capacidad de experimentar micro-fracturamiento para redistribuir tensiones de regiones de la alta concentración de la tensión.

A pesar de estas dificultades, se han hecho esfuerzos considerables para caracterizar el comportamiento mecánico de las rocas haciendo uso de la teoría elástica, lo cual no ha resultado en todos los casos. Sin embargo en el caso de las areniscas, varios experimentos han determinado un comportamiento cercano al lineal de las curvas de esfuerzo-deformación, donde la histéresis puede ser considerada insignificante para fines prácticos.

Esta es quizás una de las razones por las cuales, las areniscas son consideradas unos de los tipos de roca menos problemáticos en la industria petrolera; ya que su comportamiento, cercano al lineal simplifica los modelos mecánicos planteados tanto para condiciones dinámicas como estáticas.

Durante los últimos 25 años, la industria petrolera ha usado la arenisca Berea como una excelente opción para el desarrollo de pruebas en areniscas debido a la uniformidad de sus propiedades. Diferentes tipos de pruebas han sido desarrollados en este tipo de material rocoso, desde pruebas de sísmica que apoyan estudios de exploración hasta pruebas que involucran la simulación de métodos de recobro. La figura 3.3 muestra algunas muestras de arenisca Berea.



Figura 3.3 Bloques y corazones de la arenisca Berea.

Fuente: www.bereasandstonecores.com

Las publicaciones en áreas como ingeniería civil, minería e ingeniería de petróleos tienen gran documentación acerca de la arenisca Berea, lo que anima a los investigadores a comparar los resultados de sus pruebas con los disponibles y de esta manera optimizar sus procesos.

En las siguientes tablas se muestran algunas de las características generales de la arenisca Berea. La tabla 3.1 muestra la composición química de la

arenisca Berea, mientras que la tabla 3.2 muestra algunas propiedades mecánicas

Tabla 3.1 Composición química de la arenisca Berea

Sílica	SiO ₂	93.13%
Alumina	Al ₂ O ₃	3.86%
Óxido Férrico	Fe ₂ O	0.11%
Óxido Ferroso	FeO	0.54%
Óxido de Magnesio	MgO	0.25%
Óxido de Calcio	CaO	0.10%

Fuente: www.bereasantstonecores.com

Tabla 3.2 Algunas propiedades mecánicas de la Arenisca Berea

Velocidad de la onda P	3600 m/s
Velocidad de la onda S	2300 m/s
Factor de calidad sísmica	20
Módulo de Young	19 GPa
Relación de Poisson	0.38
UCS	90 MPa
Coefficiente de fricción interna	0.5
Esfuerzo tensil	1.2 MPa

Fuente: Seismology Laboratory – Liverpool University

En el caso de la tenacidad de fractura, varias fuentes fueron consultadas para determinar el valor de esta propiedad. En dos publicaciones fueron encontrados valores de tenacidad de fractura para arenisca Berea; la primera, publicada en 1988 por Thiercelin et al, considera un rango entre $720 \pm 100 \text{ psi}\sqrt{\text{in}}$ ($0.56 \pm 0.08 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). La otra publicación, publicada en 2004 por Labuz et al considera un valor de tenacidad de fractura de $680 \pm 80 \text{ psi}\sqrt{\text{in}}$

($0.53 \pm 0.06 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$). Para efectos de esta investigación, estos valores servirán como referencia para evaluar la validez de las pruebas que se realizarán en muestras de la arenisca Berea.

4. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA

En el caso de las rocas, la tenacidad de fractura abarca un amplio rango de valores, por ejemplo en el caso de rocas sedimentarios pueden encontrarse valores muy bajos ($<90 \text{ Psi}\sqrt{\text{in}}$ [$0.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$]) hasta valores moderadamente altos ($<2700 \text{ Psi}\sqrt{\text{in}}$ [$3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$]), sin que haya una dependencia definida del tipo de roca, ya que una arena por ejemplo puede tener un valor de tenacidad de fractura tanto más alto como más bajo que el de un shale adyacente.

La tenacidad de fractura es una propiedad de los materiales que debe ser evaluada experimentalmente. Aunque la industria ha desarrollado varios simuladores que a través de desarrollos numéricos optimizan los resultados obtenidos en el laboratorio, el desarrollo de pruebas que midan la tenacidad de fractura en especímenes de roca se hace imprescindible para conseguir valores de tenacidad de fractura válidos.

4.1 ORGANIZACIONES CON MÉTODOS PUBLICADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA

Dos organizaciones han publicado diferentes metodologías para la medición de tenacidad de fractura en areniscas, estas dos organizaciones son el ASTM (American Society for Testing and Materials) y el ISRM (Internacional Society of Rock Mechanics). El ASTM y el ISRM han desarrollado las normas y los métodos sugeridos usados actualmente por la industria para este tipo de pruebas.

4.1.1. American Society for Testing and Materials, ASTM

La ASTM internacional es una de las organizaciones más grandes de desarrollo de estándares técnicos para materiales, productos, sistemas y

servicios. ASTM internacional fue creada hace aproximadamente un siglo bajo el nombre de American Society for Testing and materials como una manera de mejorar y hacer más seguros los procesos de la industria.

Actualmente, el ASTM continua jugando un papel muy importante al direccionar las necesidades de estandarización en diferentes áreas ingenieriles siendo conocido por poseer muy buenas prácticas para el desarrollo y entrega de sus normas, con el ánimo de resolver los retos de estandarización.

Las normas desarrolladas por esta organización son el resultado del trabajo de más de 30000 miembros, que representan productores, usuarios, consumidores, gobiernos y académicos de más de 120 países, cuya participación ha hecho posible el desarrollo de varias áreas contribuyendo de manera determinante a la industria del petróleo con la publicación de varios procedimientos, normas y estándares de uso general tanto en laboratorio como en campo.

4.1.2 International Society of Rock Mechanics, ISRM

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas fue creada en 1962 y bajo sus parámetros se han publicado varios métodos sugeridos que han sido un marco de referencia para la estandarización de pruebas de laboratorio y procedimientos operacionales relacionados pueden ser aplicados a diferentes campos incluyendo la industria petrolera.

El ISRM es una organización relacionada con el estudio del comportamiento físico y mecánico de las rocas y las aplicaciones de este conocimiento para un mejor entendimiento de los procesos en el campo de la ingeniería y la geología.

Esta asociación promueve la colaboración internacional y el intercambio de ideas e información tener los profesionales en mecánica de rocas permitiendo el desarrollo de altos estándares en la práctica profesional de los ingenieros de rocas, de esta manera los trabajos relacionados con ingeniería civil, de petróleos y minería tienden a ser más seguros, más económicos y menos destructivos para el ambiente.

4.2 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA EN CARBUROS DE CEMENTO (19)

La ASTM ha publicado varios métodos estándar para la determinación de la propiedad de tenacidad de fractura en diferentes materiales, sin embargo antes de esta publicación no existía ninguna norma que pudiera ser aplicable al material rocoso. La norma B 771, publicada por el ASTM, se considera aplicable a carburos de cemento por lo que ha sido utilizada para determinar la tenacidad de fractura en múltiples investigaciones en mecánica de rocas.

Este método envuelve la aplicación de una carga sobre la apertura causada a una muestra tipo cilindro corto o barra corta, el cual contiene una ranura tipo chevron (forma en V). A medida que la carga se incrementa, una fractura inicia en el punto extremo del corte chevron y avanza lentamente de manera longitudinal, tendiendo a dividir el cilindro o barra en la mitad.

La carga avanza hasta un máximo en donde el grosor de la fractura es aproximadamente un tercio del diámetro de la muestra. Dos ciclos de carga y descarga son desarrollados durante la prueba para medir los efectos residuales provenientes de efectos macroscópicos sobre la muestra.

La tenacidad de fractura es calculada a partir del punto de máxima carga y el parámetro de esfuerzo residual el cual es evaluado a partir de los ciclos de carga y descarga desarrollados durante la prueba.

4.2.1. Configuración de la muestra

Tanto la muestra tipo cilindro corto como la muestra tipo barra corta (forma rectangular) son igualmente aceptables. La geometría de tanto el cilindro corto como la barra corta es mostrada en las figuras 4.1 y 4.2 respectivamente. La forma de los especímenes permite que la propagación de la fractura sea de una manera estable hasta que la muestra falle.

La tabla 4.1 muestra las dimensiones geométricas de la muestra tipo cilindro corto según las especificaciones geométricas de esta norma. La tabla 4.2 por su parte muestra las condiciones requeridas para la muestra tipo barra corta.

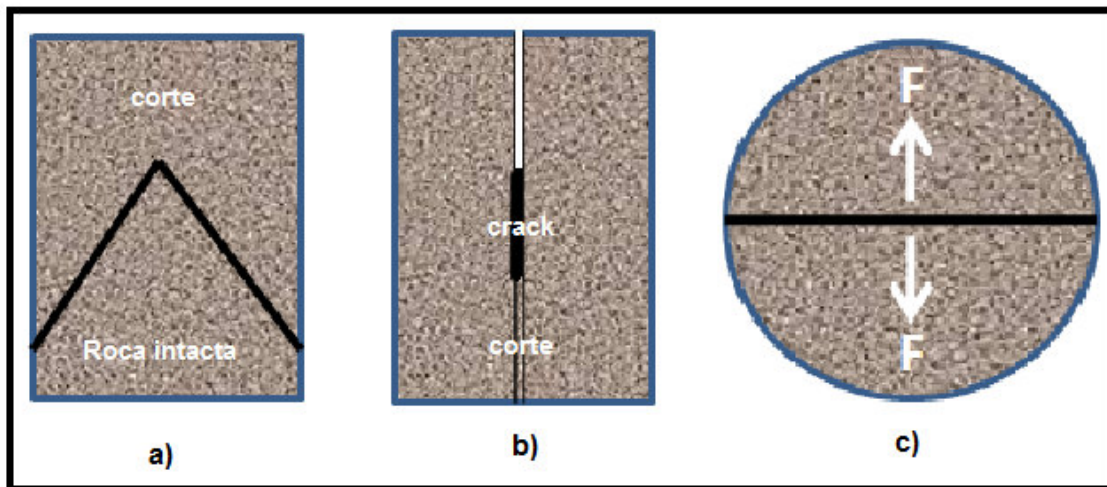


Figura 4.1 Geometría de los especímenes tipo cilindro corto. a) Corte transversal, b) Vista lateral, c) Vista superior

Tabla 4.1 Dimensiones geométricas de la muestra tipo cilindro corto.

Fuente: Modificado, ASTM B771

Parámetro geométrico	Valor (mm)	Tolerancia (mm)
Diámetro de la muestra, B	12.700	±0.025

Longitud de la muestra, W	19.050	± 0.075
Grosor del corte, T	0.381	± 0.025
Opción 1. Corte curvo		
Posición del extremo del corte, a_0	6.350	± 0.075
Ángulo del corte tipo chevron	58.0°	$\pm 0.5^\circ$
Opción 2. Corte recto		
Posición del extremo del corte, a_0	6.774	± 0.075
Ángulo del corte tipo chevron	55.2	$\pm 0.5^\circ$

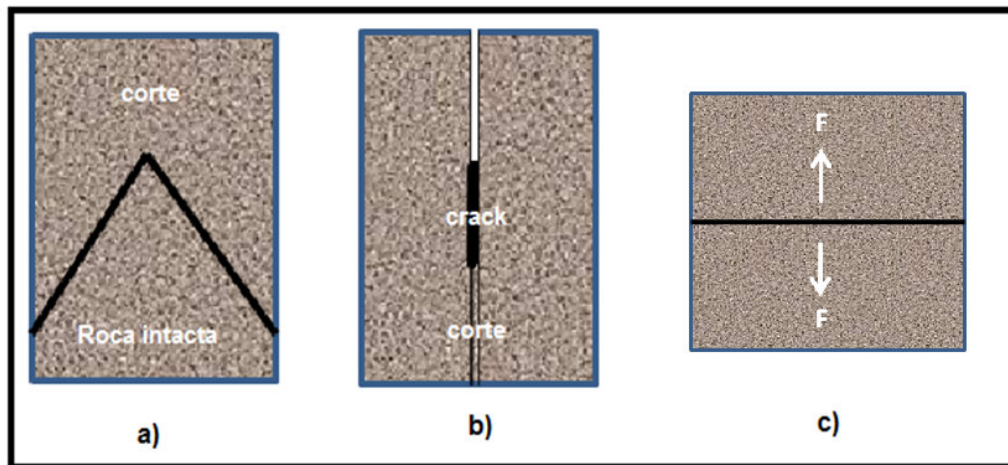


Figura 4.2 Geometría de los especímenes tipo barra corta. a) Corte transversal, b) Vista lateral, c) Vista superior

Tabla 4.2 Dimensiones geométricas de la muestra tipo barra corta.

Fuente: Modificado, ASTM B771

Parámetro geométrico	Valor (mm)	Tolerancia (mm)
Ancho de la muestra, B	12.700	± 0.025
Largo de la muestra, H	11.050	± 0.025
Longitud de la muestra, W	19.050	± 0.075
Grosor del corte, T	0.381	± 0.025

Opción 1. Corte curvo		
Posición del extremo del corte, a_0	6.350	± 0.075
Ángulo del corte tipo chevron	58.0°	$\pm 0.5^\circ$
Opción 2. Corte recto		
Posición del extremo del corte, a_0	6.774	± 0.075
Ángulo del corte tipo chevron	55.2	$\pm 0.5^\circ$

4.2.2. Equipos requeridos.

El procedimiento para realizar las pruebas sobre este tipo de muestras requiere del registro de la carga aplicada vs el desplazamiento de la apertura de la fractura.

Los equipos requeridos para la determinación de la tenacidad de fractura utilizando este método incluyen una cortadora de precisión para realizar el corte, además de varios arreglos en el montaje para asegurar que el ángulo del corte este dentro del rango de tolerancia permitido.

El equipo de carga ha utilizar debe tener la capacidad suficiente para aplicar la máxima carga requerida a la tasa necesaria. La realización la prueba mediante muestras tipo cilindro corto o barra corta requiere de la aplicación de una carga tensil sobre las muestras, por lo que el arreglo para la aplicación de ésta debe ser hecho a través de un sistema de enlace adecuado de tal manera que se minimicen los esfuerzo de inflexión y torsionales.

La prueba debe ser corrida bajo control de desplazamiento lo cual requiere del uso de transductores con señales eléctricas de salida para medir constantemente esta variable. El desplazamiento de la apertura del crack CMOD (por sus siglas en inglés) debe ser la variable de desplazamiento en ser registrada, mediante la adecuación de dispositivos de medición de

manera simétrica a cada uno de los lados de la fractura inducida. La figura 4.3 muestra el montaje de este tipo de pruebas. El mismo montaje aplica tanto para las muestras tipo cilindro corto como para las muestras tipo barra corta.

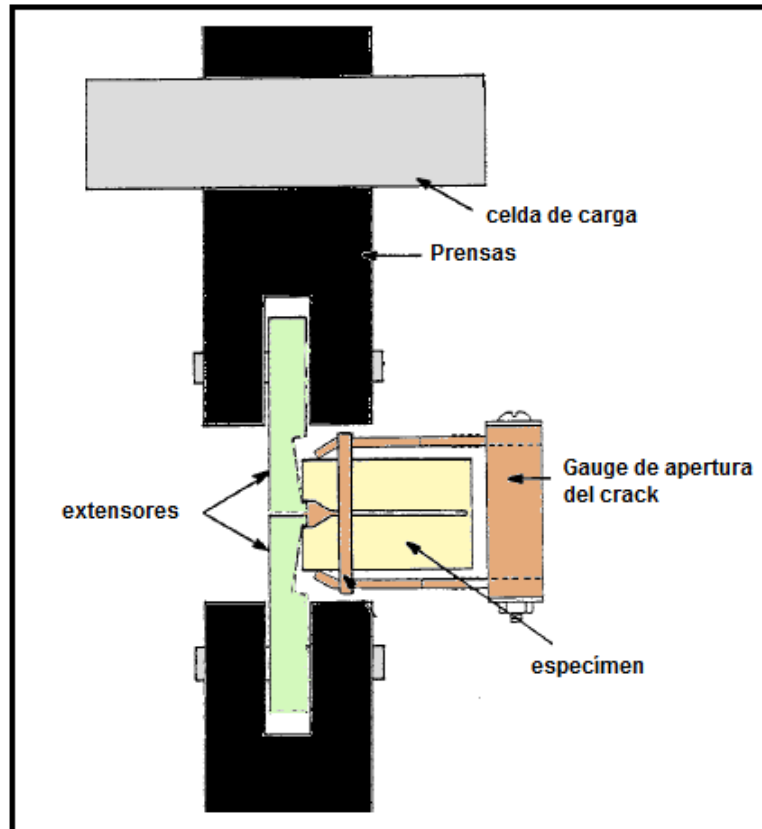


Figura 4.3 Arreglo para el método de prueba mediante especímenes tipo cilindro corto. Fuente: Modificado, ASTM B771.

4.2.3 Procedimiento

El procedimiento desarrollado por la ASTM para el desarrollo de la prueba, requiere de al menos tres muestras con el mismo diámetro, propiedades similares y la misma orientación respecto al eje del corazón, ya sea que la muestra se realice mediante muestras tipo cilindro corto o barra corta. Las dimensiones de cada una de las muestras deben estar de acuerdo a los lineamientos planteados en la tabla 4.1 o 4.2 según corresponda, lo que

debe ser tenido en cuenta al realizar los cortes en el corazón para la obtención de los prototipos para la prueba.

Posteriormente las superficies de cada una de las muestras obtenidas del corazón deben ser suavizadas y aplanadas hasta que las superficies de las muestras sean paralelas entre si. Al obtener la muestra intacta con la geometría requerida, se debe continuar con la creación de la fractura mediante uso de una cortadora con movimiento lineal o curvo, según haya sido escogido, y utilizando agua como fluido refrigerante.

El corte debe ser simétrico, y cumplir con los requerimientos definidos anteriormente en este capítulo, ya sea que el corte sea recto o curvo. El grosor del corte debe ser medido igualmente y su valor debe estar por debajo del valor máximo especificado en las tabla 4.1 y 4.2.

Posterior a la preparación de las muestras, se debe proceder a calibrar el equipo que se va a utilizar. El equipo de aplicación de carga debe ser calibrado junto con el equipo de medición de desplazamiento para establecer la concordancia entre uno y otro, y así asegurar que los registros obtenidos de carga vs. Desplazamiento son representativos.

El arreglo de carga debe ser montado cuidadosamente en el equipo de prueba, considerando un perfecto alineamiento entre los extensores de aplicación de carga tensil y los especímenes. Los dispositivos para la medición CMOD deben ser adecuados de tal manera que el sistema de transferencia no interfiera con la aplicación de la carga y que en caso que se presente el movimiento o desplazamiento de la muestra durante la prueba, este no interfiera con las medidas.

La aplicación de la carga durante la prueba debe ser tal, que la apertura del crack se realice a una tasa de 0.0025 a 0.0125 mm/s (0.0001 a 0.0005 in/seg). Deben realizarse dos ciclos de carga y descarga deben ser realizados durante la prueba finalmente la carga debe ser aplicada de manera regular hasta que la muestra falle. Si la muestra falla durante los

ciclos de carga y descarga los resultados de la prueba deben ser considerados inválidos.

Después de que se produzca la falla, se debe cesar la aplicación de la carga, se procede a retirar la muestra del aparato, si las dos mitades están aún unidas se deben separar por medio de una cuña. Se debe observar cuidadosamente el corte y su dirección de propagación para determinar si la fractura se propagó de una manera estable y si siguió el eje de simetría planteado por el corte tipo chevron. Si la desviación de la dirección de falla excede 0.25mm (0.010in), la prueba se considera inválida.

4.2.4. Cálculos

La tenacidad de fractura mediante este método es calculada a partir de la siguiente fórmula

$$K_{ICSR} = \frac{AF_c C_c (1+p)}{B^{\frac{3}{2}}} \quad (4.1)$$

Donde A es 22.0 y B es el diámetro (cilindro corto) o ancho (barra corta) de la muestra, F_c es la máxima carga soportada durante la prueba, C_c es un factor de corrección debido a las desviaciones en las dimensiones de la muestra y p es la desviación entre el comportamiento ideal lineal de la muestra y los resultados obtenidos en la gráfica de Carga vs, Desplazamiento.

4.3 MÉTODO SUGERIDO PARA DETERMINAR LA TENACIDAD DE FRACTURA MEDIANTE EL USO DE ESPECÍMENES TIPO CHEVRON INCLINADO (CB) (20)

La ISRM ha publicado dos trabajos acerca de la determinación de la tenacidad de fractura mediante pruebas de laboratorio, y aunque no son considerados normas son métodos sugeridos que han demostrado su aplicabilidad en diferentes estudios alrededor del mundo.

El principal propósito de los métodos sugeridos por la ISRM es proporcionar métodos para la determinación de la tenacidad de fractura que alcancen valores precisos y exactos. Esto se presenta debido a que los métodos

trabajados con anterioridad, arrojan resultados que normalmente no son comparables, implicando que los valores medidos de tenacidad de fractura no representan una propiedad del material.

En 1988 la ISRM publicó un artículo con dos métodos sugeridos para determinar la tenacidad de fractura del material de roca mediante el uso de muestras provenientes de corazones; debido a que las rocas están disponibles en esta forma los especímenes utilizados para desarrollar estas pruebas necesitan un mínimo de preparación.

El primer método sugerido es conocido como “Método sugerido para la determinación de la tenacidad de fractura mediante especímenes tipo chevron inclinado”. Esta prueba usa material de roca en forma de corazón, cuyo eje debe estar orientado ya sea paralelo o perpendicular a cualquier característica de anisotropía tales como planos de debilidad. Los especímenes trabajados bajo este método tienen un corte tipo chevron (en forma de V) perpendicular al eje del corazón.

Esta metodología presenta dos niveles de prueba; el nivel de prueba I que requiere sólo de la medición de la carga máxima, mientras el nivel de prueba II requiere de un continuo control de las medidas de carga y desplazamiento durante el desarrollo del experimento.

4.3.1 Geometría de la muestra

La geometría de la muestra tipo chevron inclinado es mostrado en la figura 4.4. Esta geometría del corte chevron causa la propagación de la fractura empezando en el extremo de la V y procede de manera transversal al eje del corazón de una manera estable hasta el punto donde la tenacidad de fractura es evaluada.

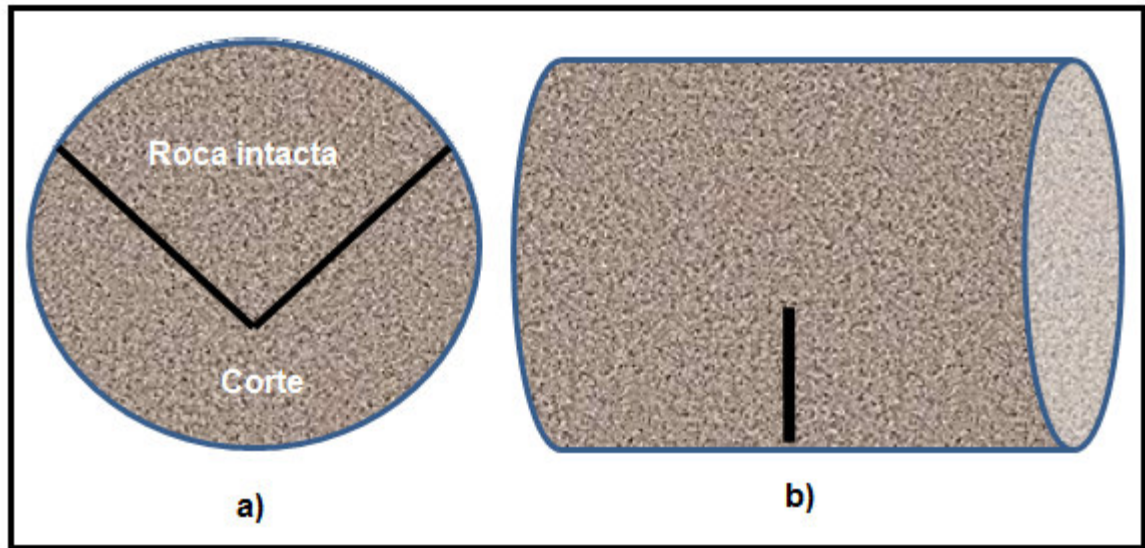


Figura 4.4 Geometría de los especímenes tipo chevron inclinado. a) Corte transversal, b) vista frontal.

La tabla 4.3 muestra las dimensiones requeridas de la muestra bajo las especificaciones geométricas del método.

Tabla 4.3 Especificaciones geométricas especímenes tipo chevron inclinado

Parámetro geométrico	Valor	Tolerancia
Diámetro de la muestra, D	D	>10 x Tamaño de grano
Longitud de la muestra, L	4D	>3.5D
Distancia del soporte, S	3.33D	$\pm 0.02D$
Angulo de inclinación del corte, θ	90.0°	$\pm 1.0^\circ$
Posición del extremo del corte	0.15D	$\pm 0.10D$
Grosor del corte	<0.03D o 1mm	

Fuente: Modificada "Fracture Toughness Suggested Methods", iSRM 1987.

4.3.2 Equipos requeridos

Los equipos requeridos para la determinación de la tenacidad de fractura utilizando este método incluyen una sierra de alta precisión para realizar el corte requerido, los flancos del corte deben ser rectos por lo que la sierra debe incluir un mecanismo para que realice cortes lineales, además varios arreglos deben ser incluidos en el montaje de la sierra para asegurar que el ángulo del corte este dentro del rango de tolerancia permitido.

El equipo de carga ha utilizar debe tener la capacidad suficiente para aplicar la máxima carga requerida a la tasa necesaria, además el equipo de carga debe ser calibrado según las normas que apliquen. El nivel de prueba I requiere sólo de la medición de la carga máxima, por lo que el equipo debe tener un dispositivo de control de carga. Muchos de los equipos disponibles en la industria para este tipo de prueba son portátiles. El nivel de prueba II requiere de la medición continua de carga y desplazamiento por debajo de la máxima carga, y en este caso el equipo de carga debe contar con un dispositivo de control de desplazamiento.

La realización de esta prueba requiere de la aplicación de una carga compresiva sobre la muestra, lo cual requiere de un arreglo que minimice al máximo los efectos de fricción. Además otros arreglos especiales deben ser añadidos para facilitar la ubicación exacta de la muestra en el equipo, que incluye el espaciamiento simétrico de los rodillos de desplazamiento respecto el rodillo de aplicación de la carga y al corte de la muestra, y el posicionamiento perpendicular de los rodillos respecto al eje de la muestra. La figura 4.5 muestra el principio de la prueba mostrada por este método y la ubicación de cada uno de los arreglos mencionados anteriormente.

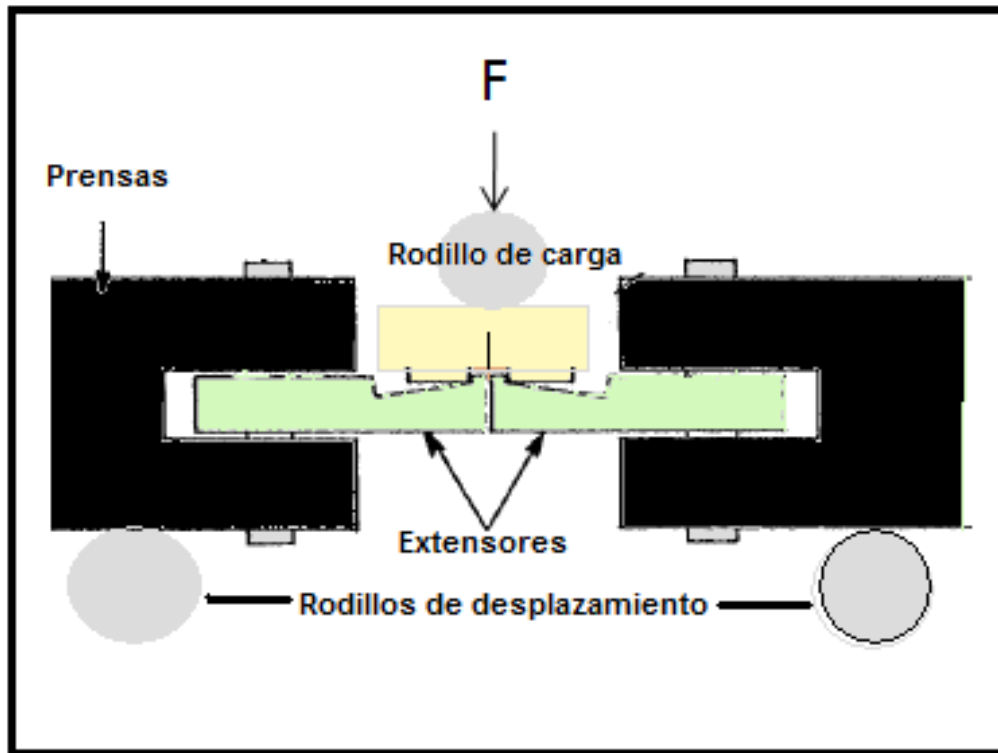


Figura 4.5 Arreglo de carga del método de prueba mediante especímenes Chevron inclinado. Fuente : Modificada "Fracture Toughness Suggested Methods", ISRM 1987.

En el caso del nivel de prueba II, que requiere de la medición del desplazamiento se requiere del uso de transductores con señales eléctricas de salida. El desplazamiento del punto de carga (LPD) debe ser la primera variable de desplazamiento en ser medida en la muestra, mientras que el desplazamiento de la apertura del crack CMOD (por sus siglas en inglés) puede ser usado como un complemento del LPD. Solo bajo casos extremos el CMOD puede ser la única variable de desplazamiento medida durante la prueba. El desplazamiento del punto de carga puede ser determinado mediante la medición del desplazamiento relativo de dos puntos del frente de la fractura respecto al punto de contacto entre la muestra y el rodillo de carga, lo que puede ser logrado utilizando transductores de tipo transformadores lineales diferenciales variables o un clip gauge. Este tipo de arreglo también puede ser usado para medir el CMOD en caso de que se

requiere. Vale aclarar que la linealidad de los transductores o el clip gauge debe estar en un rango de error menor al 0.5%.

Este método recomienda la calibración del equipo de medición de desplazamiento mediante el uso de especímenes de “prueba” con propiedades similares a las de la roca que va a ser utilizada para las pruebas.

La obtención de los resultados de la prueba requiere de un sistema de medición digital de tal manera que permita la recolección de datos con la sensibilidad necesaria, en algunos casos es utilizada la creación directa de la gráfica de Carga vs. LPD durante el nivel de prueba II, lo que permite de manera directa la corrección por no linealidad.

4.3.3 Procedimiento

El procedimiento recomendado por el ISRM para el desarrollo de la prueba, requiere de un grupo de muestras con el mismo diámetro, propiedades similares y la misma orientación respecto al eje del corazón. Las dimensiones de cada una de las muestras deben estar de acuerdo a los lineamientos planteados en la tabla 4.3, lo que debe ser tenido en cuenta al realizar los cortes en el corazón para obtener la relación entre diámetro y longitud necesaria en cada uno de los especímenes.

Posteriormente las superficies de cada una de las muestras obtenidas del corazón deben ser suavizadas y aplanadas hasta que la longitud de cada muestra no difiera en más de 0.5mm al ser medida a lo largo del diámetro. Al obtener la muestra intacta con la geometría requerida, se debe continuar con la creación de la fractura mediante uso de una sierra con movimiento lineal y utilizando agua como fluido refrigerante.

El corte debe ser simétrico, es decir, debe estar ubicado a distancias iguales del final de las caras y debe estar orientado en dirección perpendicular al eje del corazón, el ángulo de 90° que debe tener el corte chevron no debe tener una desviación mayor a 1°, sin embargo estas condiciones son difíciles de

chequear antes de la prueba. El grosor del corte debe ser medido igualmente y su valor debe estar por debajo del valor máximo especificado en la tabla 4.3.

Posterior a la preparación de las muestras, se debe proceder a calibrar el equipo que se va a utilizar. El nivel de prueba I sólo requiere de la calibración del equipo de carga, lo cual debe ser hecho antes de la realización de cada serie de pruebas. Para el caso del nivel de prueba II todos los dispositivos utilizados en la medición del desplazamiento deben ser chequeados antes de cada serie de pruebas, si un prototipo de prueba con propiedades conocidas está disponible puede ser de gran utilidad para realizar la calibración de todo el equipo incluyendo el sistema de grabación en coordenadas X-Y. En cada uno de los casos los valores disponibles y los obtenidos mediante la calibración no deben diferir en más de un 1%, para que la calibración sea considerada aceptable.

El arreglo de carga debe ser montado cuidadosamente en el equipo de prueba, teniendo en cuenta medidas de seguridad que eviten el daño del equipo, el arreglo de carga, los gauges de desplazamiento en caso de que la muestra falle prematuramente de una manera brusca e inesperada. Los dispositivos para la medición LPD deben ser adecuados de tal manera que el sistema de transferencia esté alineado apropiadamente. En el nivel de prueba II, los gauges de desplazamiento deben estar centrados y montados de tal manera que el movimiento o desplazamiento del disco no interfiera con las medidas.

Para el nivel de prueba 1, el ensayo debe ser corrido bajo el control de la carga aplicada hasta que la muestra falle. La tasa promedio de intensidad de carga durante la prueba no debe ser menor de $0.25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{sec}$ o tal que la falla ocurra dentro de los 10 segundos después a que la carga sea aplicada. En el caso del nivel de prueba 2, el ensayo debe ser corrido bajo control del desplazamiento y tanto el desplazamiento como la carga deben ser medidos, además un mínimo de cuatro ciclos de carga y recarga deben ser corridos; al

menos uno de los ciclos debe ser corrido antes de la carga máxima y otro después de ésta. La tasa de desplazamiento debe exceder el valor mínimo determinado por LPD o CMOD $> 0.006K_{CA}/(E\sqrt{D})$ m/seg, donde K_{CA} es la tenacidad de fractura definida posteriormente y E es el módulo de Young del material, además como resultado se debe obtener una gráfica de carga vs desplazamiento donde se vea el comportamiento del material en cada uno de los ciclos. En ambos casos, los resultados deben ser descartados si la fractura se desvía del plano de simetría definido por el corte chevron en más de 0.05D.

4.3.4. Cálculos

La tasa de desplazamiento en la prueba realizada bajo control de desplazamiento debe exceder el límite calculado mediante:

$$LPD \text{ ó } CMOD > \frac{0.006K_{CB}}{E\sqrt{D}} (m/sec) \quad (4.1)$$

Donde K_{CB} es la tenacidad de fractura calculada posteriormente y E es el modulo de Young del material.

Para el nivel de prueba I la tenacidad de fractura debe ser calculada usando la siguiente fórmula:

$$K_{CB} = \frac{A_{min}F_{máx}}{D^{1.5}} \quad (4.2)$$

Donde, A_{min} es calculado a partir de los parámetros geométricos de la muestra través de la siguiente fórmula:

$$A_{min} = [1.835 + 7.15a_0/D + 9.85(\frac{a_0}{D})^2]S/D \quad (4.3)$$

$F_{máx}$ está en kN y el diámetro de la muestra D está en cm, obteniendo un valor de tenacidad de fractura en MN/ \sqrt{m} ya que el factor A_{min} es adimensional. En este caso es recomendado trabajar con unidades del SI.

La corrección por no linealidad realizada mediante los resultados del nivel de prueba II, usa el valor de tenacidad de fractura calculado por la ecuación (4.2) y un factor de corrección obtenido mediante el análisis de la pendientes de la gráfica de Carga vs LPD.

La experiencia ha demostrado que los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante este método pueden ser considerados conservadores en términos de diseño, debido que los defectos analizados en este caso son mucho menores que todas las demás dimensiones estructurales y mucho mayores que la microestructura característica del material.

4.4 MÉTODO SUGERIDO PARA DETERMINAR LA TENACIDAD DE FRACTURA MEDIANTE EL USO DE ESPECÍMENES TIPO CILINDRO CORTO (SR) (20)

Esta prueba tiene la finalidad de medir la tenacidad de fractura en material rocoso mediante el uso de especímenes provenientes de corazones, cuyo eje está orientado perpendicular o paralelamente a cualquier característica anisotrópica. Este método usa una muestra llamada cilindro corto con un corte tipo chevron a lo largo del eje del corazón contemplando dos niveles de prueba, el nivel I que se relaciona considerando un comportamiento lineal y el nivel II que considera una corrección de la prueba para el caso de no linealidad. El desarrollo de la prueba y su montaje son muy similares a la metodología propuesta por la ASTM para cilindros cortos o barras cortas, sin embargo se presentan algunas diferencias en la geometría de las muestras y el tratamiento de los resultados.

4.4.1 Geometría de la muestra

La geometría de la muestra tipo cilindro corto es mostrado en la figura 4.6. Esta geometría del corte tipo chevron causa la propagación de la fractura empezando en el extremo de la V y procede a lo largo del eje del corazón de una manera estable hasta el punto donde la tenacidad de fractura es evaluada.

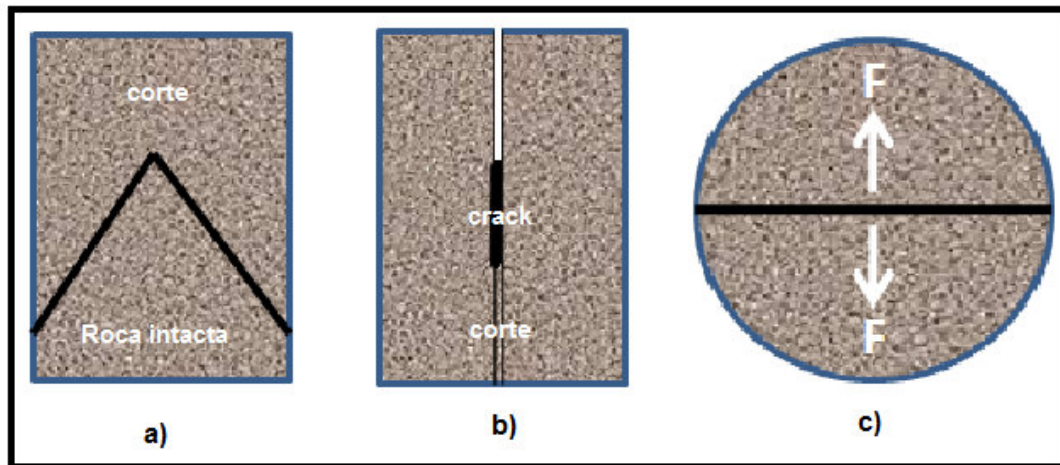


Figura 4.6 Geometría de los especímenes tipo cilindro corto. a) Corte transversal, b) corte lateral, c) Vista superior

La tabla 4.4 muestra las dimensiones requeridas de la muestra bajo las especificaciones geométricas del método.

Tabla 4.4 Especificaciones geométricas especímenes tipo cilindro corto

Parámetro geométrico	Valor	Tolerance
Diámetro de la muestra	D	>10 x Grain size
Longitud de la muestra, w	1.45D	$\pm 0.02D$
Longitud del corte	0.97D	$\pm 0.02D$
Angulo de inclinación del corte, θ	54.6°	$\pm 1.0^\circ$
Posición del extremo del corte	0.48D	$\pm 0.02D$
Grosor del corte	<0.03D o 1mm	

Fuente: Modificada "Fracture Toughness Suggested Methods", iSRM 1987.

4.4.2 Equipos requeridos

Los equipos requeridos para la determinación de la tenacidad de fractura utilizando este método incluyen una sierra de alta precisión para realizar el corte requerido, los flancos del corte deben ser rectos por lo que la sierra

debe incluir un mecanismo para que realice cortes lineales, además varios arreglos deben ser incluidos en el montaje de la sierra para asegurar que el ángulo del corte este dentro del rango de tolerancia permitido.

El equipo de carga ha utilizar debe tener la capacidad suficiente para aplicar la máxima carga requerida a la tasa necesaria, además el equipo de carga debe ser calibrado según las normas que apliquen. El nivel de prueba I requiere sólo de la medición de la carga máxima, por lo que el equipo debe tener un dispositivo de control de carga. Muchos de los equipos disponibles en la industria para este tipo de prueba son portátiles. El nivel de prueba II requiere de la medición continua de carga y desplazamiento por debajo de la máxima carga, y en este caso el equipo de carga debe contar con un dispositivo de control de desplazamiento.

La realización la prueba mediante especímenes tipo cilindro corto requiere de la aplicación de una carga tensil sobre las muestras, por lo que el arreglo para la aplicación de ésta debe ser hecho a través de un sistema de enlace adecuado de tal manera que se minimicen los esfuerzo de inflexión y torsionales. Además otros arreglos especiales deben ser añadidos para facilitar la ubicación exacta de la muestra en el equipo y permitir una correcta transferencia de la carga a la muestra.

El cilindro debe acomodarse de tal manera que exista una línea de contacto bien definida entre éste y los puntos de aplicación de carga, por lo que requiere de la adición de dos dispositivos ubicados simétricamente a cada lado del corte de tal manera que los extensores puedan ser localizados. En el caso del nivel de prueba II se debe contar con un acoplamiento que permita acomodar los gauges para tomar las mediciones del desplazamiento. Las propiedades elásticas de los dispositivos usados como conexión entre la muestra y los extensores deben ser similares a las del material de roca que se esté probando para evitar la acción de fuerzas interfaciales demasiado altas durante la prueba. La figura 4.7 muestra el principio de la prueba

mostrada por este método y la ubicación de cada uno de los arreglos mencionados anteriormente

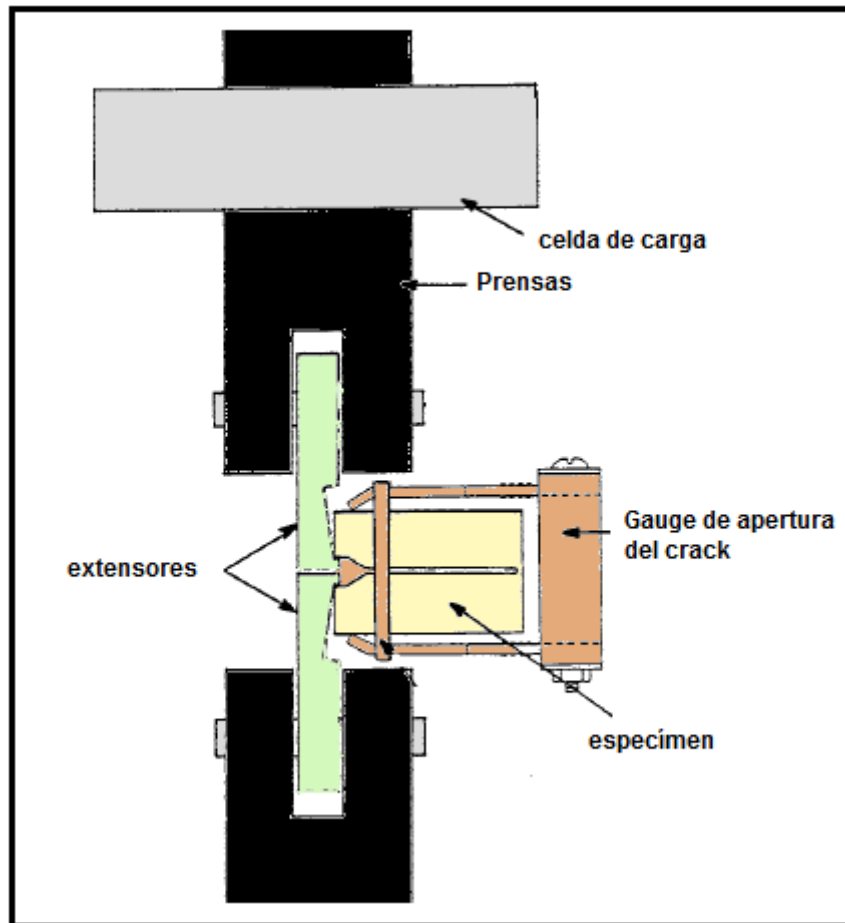


Figura 4.7 Arreglo para el método de prueba mediante especímenes tipo cilindro corto. Fuente: Modificada “Fracture Toughness Suggested Methods”, ISRM 1987.

Si se requiere de la medición de desplazamiento se recomienda el uso de transductores de señales eléctricas. El desplazamiento de la apertura del crack (CMOD) debe ser la variable medida, utilizando ya sea clip gauges o transductores de tipo transformadores lineales diferenciales variables (LVDT). En el caso de utilizar clip gauges, el sistema debe estar precisamente ubicado extendiéndose simétricamente sobre la apertura del crack empleando un par de dispositivos localizados en la muestra como puntos de referencia de desplazamiento y que sirvan de soporte a los brazos

del clip gauge. En el caso de utilizar transductores LVDT, éstos deben medir la separación de las líneas de contacto entre los extensores y los puntos de referencia ubicados en el cilindro, las señales deben ser sumadas con el fin de minimizar los efectos de la rotación y la torsión.

Este método recomienda la calibración del equipo de medición de desplazamiento mediante el uso de especímenes de “prueba” con propiedades similares a las de la roca que va a ser utilizada para las pruebas.

La obtención de los resultados de la prueba requiere de un sistema de medición digital de tal manera que permita la recolección de datos con la sensibilidad necesaria, en algunos casos es utilizada la creación directa de la gráfica de Carga vs. CMOD durante el nivel de prueba II, lo que permite de manera directa la corrección por no linealidad.

4.4.3 Procedimiento

El procedimiento recomendado por el ISRM para el desarrollo de la prueba, requiere de un grupo de muestras con el mismo diámetro, propiedades similares y la misma orientación respecto al eje del corazón. Las dimensiones de cada una de las muestras deben estar de acuerdo a los lineamientos planteados en la tabla 4.3, lo que debe ser tenido en cuenta al realizar los cortes en el corazón para obtener la relación entre diámetro y longitud necesaria en cada uno de los especímenes.

Posteriormente las superficies de cada una de las muestras obtenidas del corazón deben ser suavizadas y aplanadas hasta que la longitud de cada muestra no difiera en más de 0.5mm en 100 mm al ser medida a lo largo del diámetro. Al obtener el cilindro intacto con la geometría requerida, se debe continuar con la creación de la fractura mediante el uso de la sierra mencionada anteriormente y utilizando agua como fluido refrigerante.

El grosor del corte debe ser medido y constatar que el valor esté por debajo del valor máximo especificado en la tabla 4.3. El corte debe ser simétrico, es

decir, debe estar ubicado a distancias iguales del final de las caras y debe estar orientado en dirección paralela al eje del corazón, el ángulo de 54.6° que debe tener el corte chevron no debe tener una desviación mayor a 1° , sin embargo estas condiciones son difíciles de chequear antes de la prueba, por lo que normalmente se revisa esta condición después de la prueba para verificar la validez de la muestra analizada.

Los dispositivos donde se localizarán los extensores y el clip gauge deben ser ubicados de tal manera paralela y equidistante del plano central del corte, lo cual es conseguido mediante el uso de una barra espaciadora con fijadores que se ajusten firmemente al corte y que sirvan como límites de los dispositivos mientras estos se adhieren a la muestra. El cemento usado para la instalación de éstos accesorios debe ser lo suficientemente resistente y delgado.

Posterior a la preparación de las muestras, se debe proceder a calibrar el equipo que se va a utilizar. El nivel de prueba I sólo requiere de la calibración del equipo de carga, lo cual debe ser hecho antes de la realización de cada serie de pruebas. Para el caso del nivel de prueba II todos los dispositivos utilizados en la medición del desplazamiento deben ser chequeados antes de cada serie de pruebas, si un prototipo de prueba con propiedades conocidas está disponible puede ser de gran utilidad para realizar la calibración de todo el equipo incluyendo el sistema de grabación en coordenadas X-Y. En cada uno de los casos los valores disponibles y los obtenidos mediante la calibración no deben diferir en más de un 1%, para que la calibración sea considerada aceptable. La muestra debe ser montado cuidadosamente en el equipo de prueba, teniendo en cuenta medidas de seguridad que eviten el daño del equipo, el arreglo de carga y los gauges de desplazamiento en caso de que la muestra falle prematuramente de una manera brusca e inesperada. La aplicación de carga debe ser perpendicular al corte y por lo tanto al eje de corazón, por lo que el arreglo de carga debe soportar el peso de la muestra para que no se presente ningún tipo de inclinación debido a la acción de la

gravidad. En el caso del nivel de prueba II, los gauges de desplazamiento deben ser montados de tal manera que el movimiento o deformación del cilindro no interfiera con la medición.

Para el desarrollo de las pruebas los parámetro de intensidad de esfuerzo son similares a los descritos para el método sugerido anterior. Para el nivel de prueba 1 requiere que el ensayo sea corrido bajo el control de la carga aplicada hasta que la muestra falle. La tasa promedio de intensidad de carga durante la prueba no debe ser menor de $0.25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{sec}$ o tal que la falla ocurra dentro de los 10 segundos después a que la carga sea aplicada. Para el nivel de prueba número 2 se requiere que tanto el desplazamiento como la carga deben ser medidas, además un mínimo de 4 ciclos de carga y recarga deben ser corridos; al menos uno de los ciclos debe ser corrido antes de la carga máxima y otro después de ésta. La prueba debe dar como resultado una gráfica de Carga vs. Desplazamiento (CMOD). La tasa de desplazamiento debe estar por encima del valor calculado a partir de la siguiente expresión: $\text{CMOD} > 0.017K_{\text{SR}}/(E\sqrt{D}) \text{ m/seg}$, donde K_{SR} es la tenacidad de fractura obtenida bajo este método y E es el módulo de Young de el material. Al igual que en los métodos vistos anteriormente, los resultados de la prueba deben ser considerados nulos si la fractura causada se desvía del plano de simetría marcado por el corte tipo chevron en más de $0.05D$.

4.4.4. Cálculos

La tasa de desplazamiento en la prueba realizada bajo control de desplazamiento debe exceder el límite calculado mediante:

$$\text{CMOD} > \frac{0.017K_{\text{SR}}}{E\sqrt{D}} (\text{m/seg}) \quad (4.4)$$

Donde K_{SR} es la tenacidad de fractura calculada posteriormente y E es el modulo de Young del material.

Para el nivel de prueba I la tenacidad de fractura debe ser calculada usando la siguiente fórmula:

$$K_{SR} = \frac{24.0F_{m\acute{a}x}}{D^{1.5}} \quad (4.5)$$

Donde la lectura de la carga en el momento de la falla corresponde a $F_{m\acute{a}x}$ está en kN y el diámetro de la muestra D está en cm, obteniendo un valor de tenacidad de fractura en MN/ \sqrt{m} ya que el factor 24.0 es adimensional. En este caso es recomendado trabajar con unidades del SI.

Debido a la diferencia entre los valores medidos y los nominales, el siguiente factor de corrección puede ser calculado:

$$C_K = \left(1 - \frac{0.6\Delta w}{D} + \frac{1.4\Delta a_0}{D} - 0.01\Delta\theta\right) \quad (4.6)$$

Donde Δw , Δa_0 y $\Delta\theta$ representan la diferencia entre el valor medido y el valor nominal. Si $0.99 < C_K < 1.01$ entonces la ecuación (4.8) es válida, en caso contrario la tenacidad de fractura debe ser calculada utilizando el factor de corrección de la siguiente manera:

$$K_{SR} = \frac{24.0C_K F_{m\acute{a}x}}{D^{1.5}} \quad (4.7)$$

La corrección por no linealidad realizada mediante los resultados del nivel de prueba II, usa el valor de tenacidad de fractura calculado por la ecuación (4.2) y un factor de corrección obtenido mediante el análisis de la pendientes de la gráfica de Carga vs CMOD.

La experiencia ha demostrado que los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante este método pueden ser considerados conservadores en términos de diseño, debido que los defectos analizados en este caso son mucho menores que todas las demás dimensiones estructurales y mucho mayores que la microestructura característica del material.

4.5. MÉTODO SUGERIDO PARA DETERMINAR LA TENACIDAD DE FRACTURA MEDIANTE EL USO DE ESPECÍMENES EN FORMA DE DISCOS CON CORTE TIPO CHEVRON BRAZILIAN TEST (CCBND). (21)

Éste método, el tercero en las publicaciones del ISRM, fue publicado en 1995 como una opción adicional para la determinación de tenacidad de fractura en rocas y como un complemento al conjunto de especímenes para investigación de la tenacidad de fractura teniendo en cuenta la anisotropía de la roca ya que la orientación de las fracturas inducidas de los tres especímenes sugeridos pueden ser fácilmente arregladas de tal manera que sean ortogonales entre sí, utilizando la misma muestra de roca.

Este método sólo contempla un nivel de prueba, por lo que no se tiene en cuenta el efecto de la no-linealidad en los valores de tenacidad de fractura obtenidos. Busca la determinación de la tenacidad de fractura a partir de muestras de roca y aparece como complemento a los dos métodos anteriores en el caso de investigaciones referentes a la anisotropía de la tenacidad de fractura, ya que la geometría de los especímenes puede ser arreglada fácilmente de tal manera que sean ortogonales entre sí cuando son tomados del mismo corazón. Este método sólo contempla un nivel de prueba, por lo que no se tiene en cuenta el efecto de la no-linealidad en los valores de tenacidad de fractura obtenidos.

4.5.1 Geometría de la muestra

El método consiste en la aplicación de una carga de tal manera que el corte tipo chevron cause la propagación del crack en el extremo del alineamiento en V y proceda radialmente de manera estable hasta el punto donde la tenacidad de fractura es evaluada. La figura 4.8 muestra la geometría de la muestra CCBND.

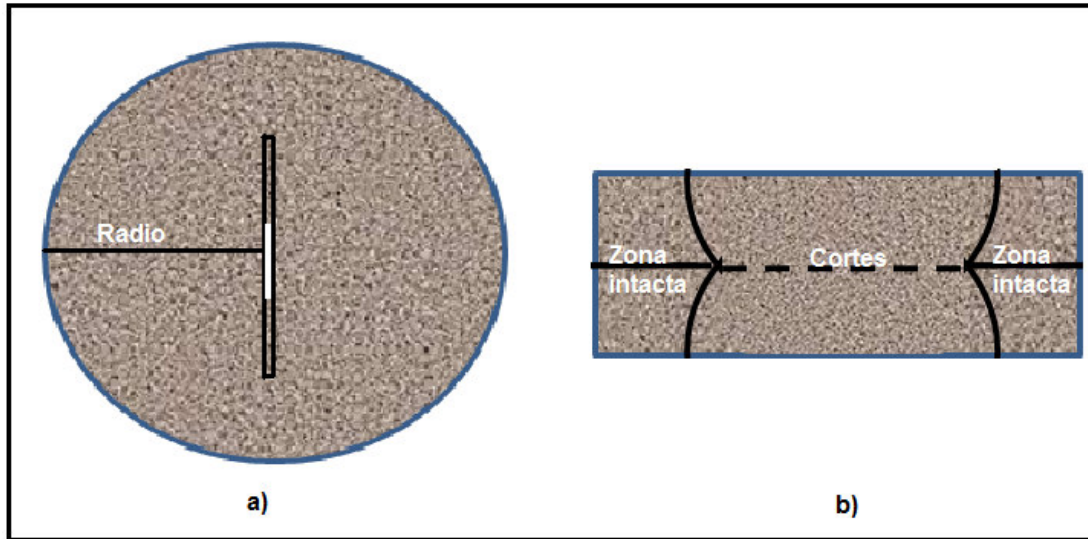


Figura 4.8 Geometría de los especímenes tipo CCNBD. a) Vista frontal, b) Corte transversal

Este método requiere que todas las dimensiones geométricas del disco sean convertidas a parámetros adimensionales con respecto al radio y al diámetro. La siguiente tabla muestra la relación entre las dimensiones geométricas estándar para los especímenes CCNBD

Tabla 4.5 Especificaciones geométricas especímenes CCNBD

Descripción	Valores	Expresión adimensional
Diámetro de la muestra, D (mm)	75.0	
Grosor de la muestra, B (mm)	30	$\alpha_B = B/R = 0.8$
Longitud inicial del corte, a_0 (mm)	9.89	$\alpha_0 = a_0/R = 0.2637$
Longitud final del corte, a_1 (mm)	24.37	$\alpha_1 = a_1/R = 0.65$
Diámetro de la sierra, D_s (mm)	52.0	$\alpha_s = D_s/D = 0.6933$
Profundidad del corte, h_c (mm)	16.95	

Y^*_{\min} (adimensional)	0.84	
-----------------------------	------	--

Fuente: Modificada "Fracture Toughness Determination by CCNBD Specimens" ISRM 1995.

4.5.2 Equipos requeridos

La realización de la prueba requiere la preparación de un set de especímenes con características similares y la misma orientación respecto al eje del corazón. La creación del corte requiere del uso de una sierra de diamante de corte lineal que no exceda 1.5 mm de espesor, además varios accesorios pueden ser adecuados con el fin de garantizar que el corte sea hecho en el centro y que cumpla con las especificaciones geométricas señaladas anteriormente. El equipo de aplicación de esfuerzo debe tener la capacidad para el pico de carga requerido. En este caso el esfuerzo se aplica de manera vertical por lo que los platos de carga superior e inferior deben ser rígidos y paralelos entre sí para asegurar una carga concentrada. Algunos accesorios simples pueden ser usados para ayudar a ubicar los especímenes en la maquina de prueba, sin embargo deben ser de fácil remoción después de que las muestras hayan sido aseguradas.

La medición del desplazamiento del punto de carga (LPD) y de la apertura del crack (CMOD) puede ser realizada como una manera de verificar el punto en el que el material de roca falla, pero no es necesaria para el cálculo de la tenacidad de fractura. En caso de que estas mediciones sean realizadas, es importante realizar calibraciones a cada uno de los equipos de medición de desplazamiento usados antes de correr cada una de las pruebas.

4.5.3 Procedimiento

La prueba puede ser realizada bajo control de desplazamiento o carga. La tasa de intensidad de esfuerzo aplicada debe ser mayor a $0.25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{seg}$ o tal que falla ocurra dentro de los 20 segundos siguientes al comienzo de la aplicación de la carga y al menos dos ciclos de carga-descarga deben ser

hechos a un 20% de la carga máxima para asegurar el contacto entre los platos de carga y el disco. El montaje de esta prueba es bastante sencillo ya que no requiere de ningún arreglo de carga, sólo se debe ubicar la muestra entre los dos platos de tal manera que el corte sea perpendicular a éstos. La figura del montaje es mostrada a continuación.

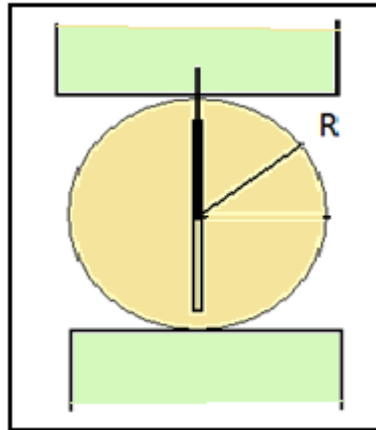


Figura 4.9 Montaje prueba en muestras tipo CCNBD. Fuente: Modificada “Fracture Toughness Determination by CCNBD Specimens” ISRM 1995.

Finalmente después de realizar los ciclos de carga y descarga, la aplicación de la carga se realiza de manera constante sobre la muestra hasta alcanzar la falla de ésta. Si después de esto la muestra aún no se ha dividido en dos mitades, se debe aplicar carga progresiva hasta que se logre la partición. Finalmente se retira la muestra del equipo de carga y se observa el plano de falla resultante para determinar si cumple con las condiciones de simetría correspondientes.

4.5.4. Cálculos

La tenacidad de fractura debe ser calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$K_{Ic} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{B \cdot \sqrt{D}} * Y_{min}^* \quad (4.8)$$

Donde Y_{min}^* es el valor de intensidad de estrés crítica para el material, el cual es un factor adimensional determinado mediante el uso de tablas teniendo en cuenta las dimensiones geométricas α_B , α_0 y α_1 . Después de la publicación

de la metodología, varios autores han hecho algunas modificaciones a la ecuación 4. Esto debido a las desviaciones en los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante este método, comparados con los obtenidos mediante los métodos anteriores.

Investigaciones recientes han demostrado que los valores obtenidos de tenacidad de fractura obtenidos mediante este método, haciendo uso de las correcciones, son bastantes cercanos al valor real de la propiedad del material en el caso de rocas quebradizas. Además la experiencia ha mostrado que los valores obtenidos son considerados conservativos para análisis de diseño.

4.5.5 Modificaciones realizadas al método de determinación de tenacidad de fractura en muestras tipo CCNBD.

Dos artículos han sido publicadas proponiendo correcciones a este método, ya que los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante este método están por debajo de los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante los otros métodos propuestos.

Varias explicaciones fueron propuestas, algunas referenciadas al cálculo de Y_{\min}^* , por lo que en el 2004 Q.Z. Wang (22) publicó un artículo proponiendo una nueva manera de determinar este valor mediante la creación de una nueva lista de tablas dependientes en gran medida del valor de α_B . Sin embargo, la implementación de esta modificación no produjo cambios sustanciales en los resultados finales de tenacidad de fractura mediante la realización de estas pruebas. Debido a esto, en 2006 M.J. Iqbal (23) publicó los resultados de un nuevo estudio que compilaba la metodología propuesta por el ISRM y la corrección propuesta por Wang.

Como resultado de esta investigación, se descubrió un error aparentemente tipográfico en la fórmula para el cálculo de la tenacidad de fractura. La fórmula real planteada por Iqbal correspondería a:

$$K_{ic} = \frac{P_{\max}}{B \cdot \sqrt{R}} * Y_{\min}^* \quad (4.9)$$

La fórmula propuesta difiere de la publicada por el ISRM en el denominador, donde el término dentro de la raíz corresponde al diámetro mientras que en esta corrección se utiliza el radio.

Durante esta investigación se corrieron pruebas utilizando dos métodos; el método con muestras tipo CCNBD y el método con muestras tipo cilindro corto. Durante el análisis de los datos de las pruebas tipo CCNBD se determinó el valor de Y_{\min}^* utilizando tanto la metodología propuesta por el ISRM como la planteada por Wang. Los valores de tenacidad de fractura obtenidos mostraron una mejor correlación en el caso en el que se utilizaron las tablas publicadas por el ISRM mientras que los valores calculados mediante las tablas propuestas por Wang presentaron mayor dispersión y mayor desviación respecto a los resultados obtenidos mediante el método de cilindro corto.

Como resultado de esta investigación, este artículo de corrección sugiere determinar el valor de Y_{\min}^* mediante las tablas publicadas por el ISRM y utilizar la corrección en la fórmula de calcular propuesta en el artículo, donde el valor del diámetro dentro de la raíz es sustituido.

Investigaciones recientes han demostrado que los valores obtenidos de tenacidad de fractura obtenidos mediante este método, haciendo uso de las correcciones, son bastantes cercanos al valor real de la propiedad del material en el caso de rocas quebradizas. Además la experiencia ha mostrado que los valores obtenidos son considerados conservativos para análisis de diseño.

4.6 SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE TENACIDAD DE FRACTURA EN ARENISCAS

Debido a que la tenacidad de fractura es una propiedad del material que no tiene una relación determinada con el tipo de roca y es indispensable al diseñar diferentes procesos en la industria petrolera, este proyecto busca la

selección de un proceso metodológico para la determinación de esta propiedad de manera práctica, rápida, confiable y con el equipo disponible en los laboratorios de mecánica de rocas.

De esta manera se pretende determinar el proceso metodológico más adecuado, que sirva como guía para determinar la tenacidad de fractura de una manera práctica cada vez que el diseño de un proceso lo requiera.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los principales aspectos de los procedimientos metodológicos mostrados a lo largo de éste capítulo.

Tabla 4.6 Cuadro comparativo de los métodos para la determinación de la tenacidad de fractura

<i>Ítem de comparación</i>	<i>Metodología</i>	<i>Metodologías</i>		
	<i>ASTM</i>	<i>ISRM</i>		
	Cilindro corto o Barra corta	Chevron inclinado	Cilindro corto	CCNBD
Tamaño de la muestra	Pequeño	Largo	Pequeño	Pequeño
Aparatos de preparación	Depende del tipo de corte	Simples	Complejo	Simple
Montaje del equipo	Complejo	Complejo	Complejo	Simple
Equipo de carga	Tensil	Compresivo	Tensil	Compresivo
Método de carga	Carga tensil	Torsión	Carga Tensil	Carga compresiva
Requerimientos del equipo de carga	Alto	Alto	Alto	Ordinario
Tiempo de prueba	Corto	Depende del nivel de prueba	Depende del nivel de prueba	Corto
Repetitividad de los datos	Razonable	Razonable	Razonable	Excelente
Corrección por no-linealidad	No	Si	Si	No

Teniendo en cuenta la anterior tabla comparativa, son varias las ventajas que presenta el método desarrollado en muestras tipo CCNBD respecto a los demás publicados; estas ventajas incluyen menos restricciones en los equipos de prueba, mayor tolerancia en el tratamiento de los especímenes, mayor capacidad en los casos en los que se requieren cargas altas y menor dispersión de los resultados.

Aunque este método no considera una corrección por no linealidad, los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante esta metodología pueden ser considerados confiables para efectos de diseño, ya que la corrección por no linealidad no es representativa si se compara con el ahorro en tiempo y la practicidad de la prueba.

En el caso específico de las areniscas, esta prueba tiene varios puntos a favor. En el caso de areniscas no consolidadas se ha demostrado que la prueba tiene gran confiabilidad y en el caso de las areniscas consolidadas el hecho de que esta prueba permita la aplicación de cargas más altas respecto a las otras pruebas, la hace una muy buena opción a la hora de realizar mediciones en muestras de arenisca con un alto grado de consolidación.

Cómo resultado de esta investigación se ha llegado a la conclusión que desde el punto de vista práctico, la metodología para la determinación de tenacidad de fractura por medio de muestras tipo CCNBD es la más adecuada para determinar la tenacidad de fractura en areniscas, en el capítulo siguiente se mostrarán las pruebas de laboratorio que se realizaron en orden de validar la metodología y comprobar su aplicabilidad en areniscas.

5. METODOLOGÍA SELECCIONADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN ARENISCAS

Mediante el proceso metodológico siguiente se pretende determinar la tenacidad de fractura en areniscas. El principal uso de esta propiedad es la clasificación y caracterización de la roca respecto a su resistencia a la propagación de fracturas.

En este caso se usa material de roca en forma de corazones, teniendo el eje del corazón orientado ya sea paralela o perpendicularmente a cualquier característica anisotrópica y utilizando muestras del tipo discos de prueba brasilera con corte tipo chevron (muestras CCNBD)

Este tipo de prueba sólo considera un nivel de prueba y sólo se requiere registrar la carga máxima. Para determinar la tenacidad de fractura mediante este método es aconsejable la preparación y prueba de al menos tres muestras en cada caso.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

La geometría de las muestras del tipo disco de prueba brasilera con corte tipo chevron (CCNBD) es ilustrada en la figura 5.1. El corte tipo chevron causa propagación de la fractura empezando al extremo de el alineamiento en V y procediendo radialmente hacia afuera de una manera estable hasta el punto donde la tenacidad de fractura es evaluada.

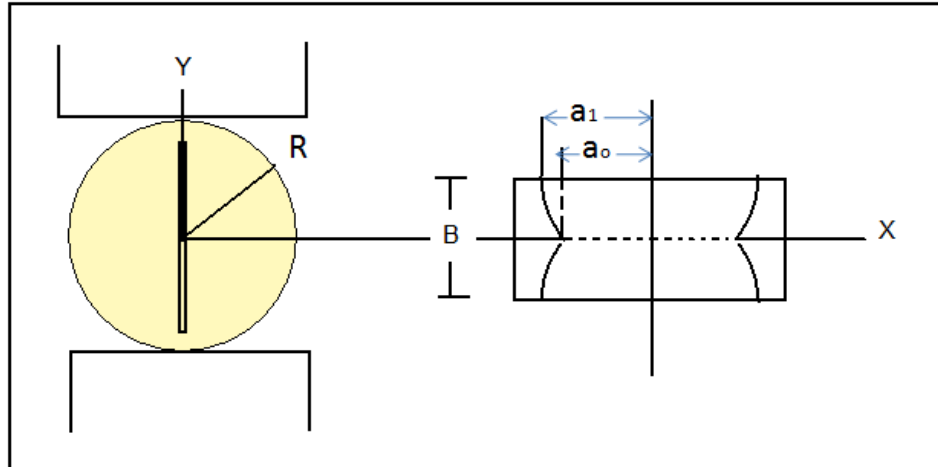


Figura 5.1 Geometría de la muestra CCNBD. Fuente: Modificado “Determining Mode I Fracture Toughness” ISRM

Todas las dimensiones geométricas de las muestras deben ser convertidas a parámetros adimensionales respecto al radio (R), al diámetro (D) del disco y al diseño del corte. Los parámetros adimensionales son α_0 , α_1 , α_B y α_s , definidos de la siguiente manera:

$$\alpha_0 = \frac{a_0}{R} \quad (5.1)$$

$$\alpha_1 = \frac{a_1}{R} \quad (5.2)$$

$$\alpha_B = \frac{B}{R} \quad (5.3)$$

$$\alpha_s = \frac{D_s}{D} \quad (5.4)$$

Las dimensiones geométricas estándares sugeridas para este tipo de discos se encuentran especificadas en la tabla 5.1. Es posible elegir otras dimensiones geométricas sin embargo en función de tener un test válido, las dimensiones seleccionadas de α_1 y α_B deben satisfacer las restricciones mostradas en la tabla 5.2. La figura 5.2 muestra el rango válido de datos gráficamente.

Tabla 5.1 Especificaciones geométricas muestras CCNBD

Descripción	Valores	Expresión adimensional
Diámetro del disco, D (mm)	75.0	
Grosor del disco, B (mm)	30	$\alpha_B = B/R = 0.8$
Longitud inicial del corte, a_0 (mm)	9.89	$\alpha_0 = a_0/R = 0.2637$
Longitud final del corte, a_1 (mm)	24.37	$\alpha_1 = a_1/R = 0.65$
Diámetro de la sierra, D_s (mm)	52.0	$\alpha_s = D_s/D = 0.6933$
Profundidad del corte, h_c (mm)	16.95	
Y^*_{min} (adimensional)	0.84	

Fuente: Modificado "Determining Mode I Fracture Toughness" ISRM

Tabla 5.2 Condiciones para los parámetros adimensionales α_1 y α_2

α_1	\geq	0.4
α_1	\geq	$\alpha_B/2$
α_B	\leq	1.04
α_1	\leq	0.8
α_B	\geq	$1.1729 \alpha_1^{1.6666}$
α_B	\geq	0.44

Fuente: Modificado "Determining Mode I Fracture Toughness" ISRM

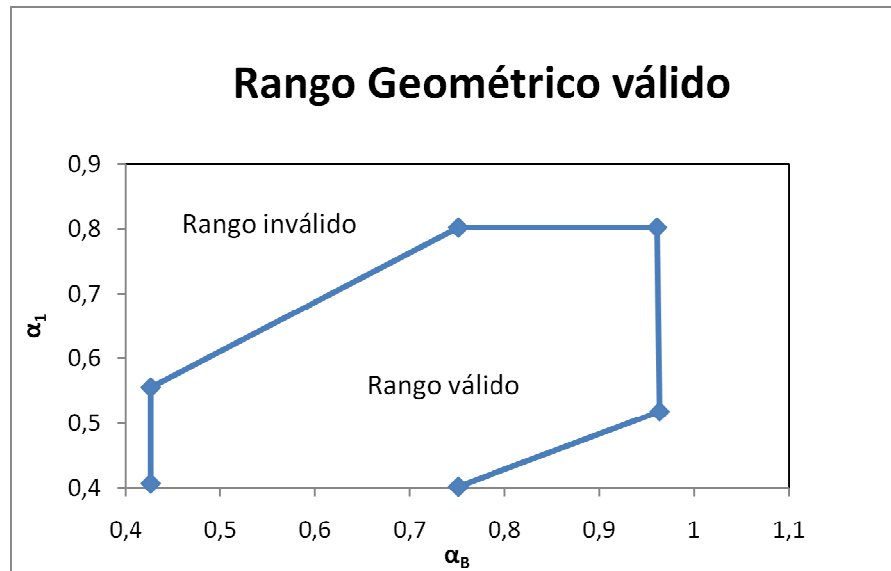


Figura 5.2 Rango de dimensiones geométricas válidas para muestras CCNBD. Fuente: Modificado “Determining Mode I Fracture Toughness” ISRM

Para aplicaciones prácticas la longitud inicial de la fractura a_0 puede ser escogida arbitrariamente entre los valores correspondientes a $(0.20 - 0.30)R$.

5.2 EQUIPOS REQUERIDOS

5.2.1 Equipo de preparación de muestras

Partiendo de la muestra de roca a analizar en forma de corazón, se requiere de una cortadora para extraer los discos de la longitud requerida y una pulidora que permita el arreglo de las superficies inferiores y superiores de cada una de las muestras.

Se necesita una sierra circular de diamante para cortar la fractura requerida. Los flancos del corte deben estar derechos por lo que la sierra debe poseer movimiento lineal, además se deben implementar algunos arreglos para que al realizar el corte se asegure que éste esté exactamente ubicado en el centro del disco y cumpla con las especificaciones geométricas dentro del rango de tolerancia. Estos arreglos normalmente incluyen “stops” para evitar que la cuchilla de la cortadora produzca un corte más profundo de lo

deseado y el montaje necesario para sujetar el disco durante la creación de la fractura.

5.2.2. Equipos de prueba y arreglos de carga.

El equipo utilizado durante la prueba debe tener la capacidad suficiente para el pico de carga requerido y debe poder aplicar la carga a la tasa recomendada. Además debe ser calibrado a intervalos de tiempo regulares cumpliendo con los parámetros establecidos en las normas disponibles para calibración de equipo.

En el nivel de prueba presentado para este método (nivel de prueba I), sólo se requiere registrar la máxima carga, por lo que debe ser usada una maquina de prueba en la cual la tasa de carga pueda ser controlada. Este equipo puede ser portátil.

El arreglo de carga debe coincidir con el mostrado en la figura 5.1, donde el plato superior e inferior deben ser paralelos para asegurar una concentración de carga perfectamente vertical ubicada sobre el mismo eje del corte.

5.2.3. Dispositivos para el alineamiento de la muestra

No se requiere de dispositivos especiales para el montaje del CCNBD. Sin embargo, algunas ayudas simples pueden ser usadas para simplificar el montaje. Esto puede incluir un simple escuadra para asegurar que los platos de carga están ubicados perpendicularmente a la orientación de la fractura, además dos cuñas pequeñas pueden ser usadas al mismo tiempo ubicándolas en cada uno de los lados de la muestra y así evitar que la muestra se mueva.

El diseño de cada uno de estos dispositivos para facilitar el montaje, debe ser tal que puedan ser fácilmente removidos cuando el disco haya sido asegurado.

Se deben realizar revisiones de la perpendicularidad de la orientación de la fractura respecto a los platos de carga antes de correr cada prueba con un máximo de error permitido de 0.5%.

5.2.4. Equipo de medición de desplazamiento

El desplazamiento del punto de carga (LPD) y el desplazamiento de la apertura de la fractura (CMOD) pueden ser medidos durante la prueba para verificar los datos obtenidos mediante el equipo de carga, sin embargo esto no es necesario para el cálculo de tenacidad de fractura en esta etapa. El equipo para medir estas variables debe usar señales eléctricas de salida y el parámetro primario de desplazamiento medido debe ser el LPD.

Un arreglo recomendado para las mediciones de desplazamiento consiste en el uso de dos transductores de tipo transformadores lineales diferenciales variables (LVDT) montados en dos soportes magnéticos. Estos deben estar localizados en ambos lados del disco y ubicados perpendiculares a los platos de carga tan cerca a el punto de carga como sea posible.

El equipo para medición de desplazamiento debe tener la capacidad de medir con una precisión de 0.005mm.

5.2.5. Registro de datos

Se requiere de un sistema de registro de datos análogo o digital que pueda recopilar datos de fuerza y desplazamiento con la precisión especificada en los numerales anteriores. Un equipo de prueba que mida exclusivamente la carga máxima es también aceptable desde que posea una buena precisión en el registro de datos.

5.3 PROCEDIMIENTO

5.3.1. Selección y preparación de las muestras

Una muestra de prueba es definida como un grupo de piezas de corazón (especímenes) con el mismo diámetro, el mismo grosor, propiedades

similares y la misma orientación de respecto al eje de corazón para los cuales la tenacidad de fractura es evaluada.

Antes de empezar la preparación de las muestras, el corazón de donde las muestras van a ser extraídas debe ser marcado referencialmente usando un marcador a prueba de agua, de tal manera que los ejes del corazón y los ángulos de rotación de las muestras sean conocidos.

Los corazones a partir de los cuales se obtienen cada una de las muestras para el desarrollo de esta prueba no deben contener fluidos, si esto ocurre, debe llevarse a cabo primero un proceso de limpieza de fluidos a base de tolueno. Posterior a la limpieza con tolueno, la muestra debe secarse en un horno convencional a 80°C durante 24 horas seguido de un proceso de desecado para eliminar la humedad.

5.3.1.1. Obtención y preparación de los discos intactos

El corazón debe ser cortado de acuerdo al grosor deseado tanto del disco como del corte, usando una sierra de diamante y utilizando agua limpia como fluido refrigerante. La preparación del grosor del disco no tiene que seguir exactamente el diseño original, por lo que una desviación hasta del 10% es recomendada.

Las superficies de cada uno de los discos extraídos del corazón, deben ser aplanadas y pulidas guardando la perpendicularidad respecto al eje del disco. Una desviación de menos de 0.25mm en 10mm es permitida. Debe realizarse un proceso de paralelización de las superficies si este requerimiento no es cumplido. Posterior al pulimiento de las superficies se debe marcar la orientación deseada de la fractura con un marcador a prueba de agua.

5.3.1.2. Realización del corte

El grosor del corte no debe exceder 1.5mm, por lo que antes de realizar el corte se debe verificar el grosor de la sierra y la precisión de esta al realizar los cortes sobre material de roca.

El corte debe ser hecho con dos cortes en cada una de las superficies del disco a lo largo del eje de rotación del disco sobre el mismo plano de corte diametral, el cual corresponde a la orientación de fractura diseñada y marcada anteriormente. El arreglo mostrado en la figura 5.3. muestra el disco ubicado horizontalmente con la superficie de frente al disco de corte.

Antes de cada corte, se debe realizar una revisión para asegurar que el corte es exactamente en el centro de la superficie del disco tanto horizontal como verticalmente, lo que se logra haciendo coincidir el disco de corte con la marca central sobre la superficie del disco. El error permitido en el alineamiento central del corte es de 0.5mm.

El eje central del disco debe coincidir con el plano de rotación del disco de corte para asegurar la perpendicularidad entre el plano de corte y las superficies del disco. El error permitido en este lineamiento es de 0.25mm en 100mm.

Alinear perpendicularmente la superficie de la muestra y el disco de corte de tal manera que se produzca un contacto leve entre éstas. El primer corte es hecho moviendo la roca hacia el disco de corte hasta la profundidad de corte diseñada, h_c , la cual puede ser calculada a partir de los parámetros de diseño de la siguiente manera:

$$h_c = \left(\alpha_s - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_1^2} \right) * R \quad (5.5)$$

$$h_c = \left(\alpha_s - \sqrt{\alpha_s^2 - \alpha_0^2} \right) * R + \frac{B}{2} \quad (5.6)$$

Después de este corte, el disco junto con el arreglo son removidos del montaje utilizado para el corte y volteado 180° de tal manera que la otra

superficie del disco de frente al disco de corte. Después de revisar el alineamiento central y la perpendicularidad del plano de corte, el disco es cortado hasta la misma profundidad h_c del primer corte.

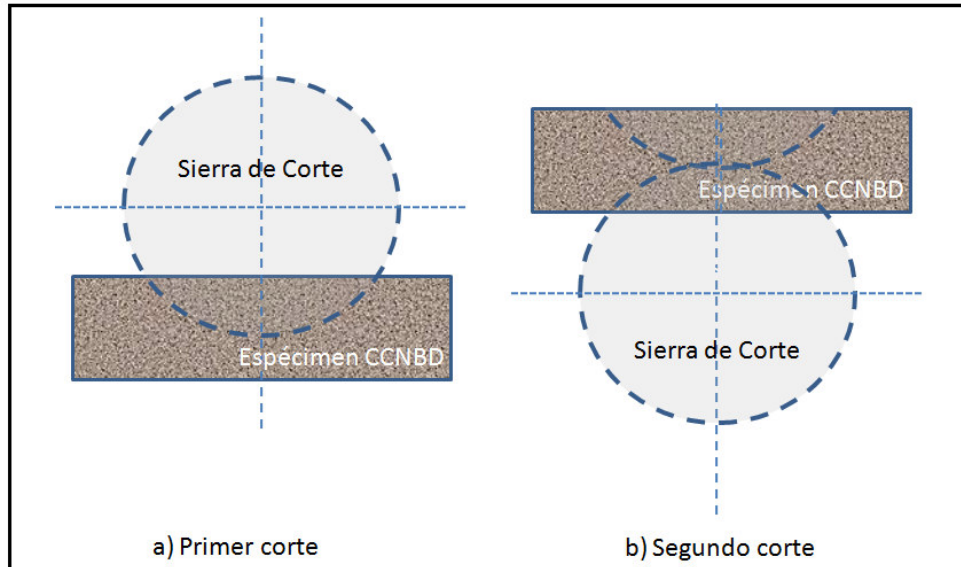


Figura 5.3 Procedimiento de Corte

5.3.1.3 Procedimientos después del corte

El ángulo del plano de corte chevron respecto al corazón de referencia debe ser registrado de tal manera que tanto el plano de fractura como su dirección de propagación respecto al fábric del material y a las facies del bloque del que se extrajeron las muestras sean conocidas. Este ángulo debe coincidir con la dirección prevista de carga (dirección de propagación de fractura) la cual puede ser orientada respecto a las características anisótropicas de las rocas (paralelo, perpendicular o a un ángulo definido)

Después de realizar los cortes, la muestra debe ser retirado del montaje y la arena atrapada dentro del corte debe ser removida.

Finalmente se dibujarán dos líneas en ambos lados del disco a lo largo del plano de corte. Las dos líneas de carga que estarán en contacto con los platos superior e inferior pueden ser obtenidos mediante la unión de los cuatro puntos finales de las líneas dibujadas. A lo largo de estas dos líneas

de carga, la superficie no debe presentar ninguna anomalía para de esta manera asegurar un contacto simétrico de la muestra con los planos de carga. Estas líneas deben ser paralelas al eje del disco y la perpendicularidad a las superficies del disco debe cumplir con las condiciones mencionadas anteriormente; 0.25mm en 100mm.

Cada una de las muestras debe pasar por un proceso de secado después del corte, por lo que deben ponerse en el horno durante 24 horas a una temperatura de 104° para remover el agua absorbida durante la preparación. En esta etapa, deben ser medidas las dimensiones geométricas del disco con una sensibilidad de 0.1mm. Estas dimensiones son el diámetro (D) y grosor (B), así como la longitud máxima de la fractura $2a_1$. D debe ser medido promediando dos diámetros a 180° de espaciamiento cerca a ambas superficies de los discos. Por otro lado B debe ser determinado promediando cuatro valores obtenidos al medir la distancia entre los puntos finales de dos diámetros trazados ortogonalmente y $2a_1$ debe ser la media de los dos valores medidos en ambos lados del disco.

Después de realizar estas mediciones, la geometría debe ser convertida a las expresiones adimensionales α_1 y α_B definidas en las ecuaciones 5.2 y 5.3 respectivamente. Las muestras deben ser rechazadas si éstos valores adimensionales no cumplen con los requerimientos especificados en la tabla 5.2.

5.3.2. Calibración

La celda de carga debe ser chequeada a intervalos de tiempo regulares. En caso tal que el desplazamiento del punto de carga (LPD) y la apertura de la fractura sean medidos, el equipo de desplazamiento debe ser revisado y calibrado antes de la realización de cada serie de pruebas.

5.3.3. Montaje

La muestra debe ser cuidadosamente instalado en el equipo de prueba de tal manera que la transferencia de carga esté alineada apropiadamente, por lo que algunos dispositivos pueden ser empleados para facilitar el montaje del disco cumpliendo con los requisitos de perpendicularidad del plano de fractura respecto a los platos de carga. Una pequeña carga debe ser aplicada para sostener la muestra en la posición adecuada, chequeando las líneas de contacto de los platos superiores e inferiores para asegurar que un contacto total está siendo ejercido entre los platos y la superficie del disco.

El posicionamiento de la muestra y la selección de los puntos límites deben ser hechos de tal manera que no se presente ningún tipo de daño en el equipo o en los gauges de desplazamiento en caso tal de que la muestra falle prematuramente de una manera inesperada.

5.3.4. Realización de la prueba

La prueba puede ser corrida bajo control de desplazamiento o de carga. La historia de carga debe ser registrada hasta que el disco falle. La tasa promedio de intensidad de carga durante la prueba no debe ser menos a $0.25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{sec}$ o tal que la falla ocurra dentro de los 20 segundos siguientes a la aplicación inicial de la carga.

Al menos dos ciclos de carga y descarga deben ser desarrollados a un punto de carga que represente el 20% de la carga máxima para asegurar un contacto perfecto entre los platos de carga y la muestra.

La carga máxima sobre la muestra debe ser registrada con un error menor al 1% y en el caso en que se realicen mediciones LPD o CMOD, éstos deben ser determinados con una precisión de 0.001mm.

En caso de que la muestra falle pero no se rompa, debe aplicarse carga hasta que el disco se divida en dos, y así la simetría del corte tipo chevron pueda ser revisada.

Los resultados deben ser considerados inválidos si la fractura se desvía de el plano simétrico de fractura en más de 0.05D dentro de 0.5D desde el centro de la superficie del disco.

Después de la prueba, la dimensión geométrica $2a_0$ debe ser medida a partir de la muestra rota y convertida a la expresión adimensional α_0 .

5.4 CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA TENACIDAD DE FRACTURA

La tenacidad de fractura de la muestra debe ser calculada mediante la siguiente fórmula.

$$K_{ic} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{B\sqrt{R}} * Y_{min}^* \quad (5.7)$$

Donde $P_{m\acute{a}x}$ representa la máxima carga durante la prueba, B y R son el grosor y el radio del disco respectivamente y Y_{min}^* es el valor crítico adimensional de intensidad de esfuerzos para la muestra, el cual es determinado mediante las dimensiones geométricas α_1 , α_B y α_0 .

$$Y_{min}^* = u * e^{v*\alpha_1} \quad (5.8)$$

Donde u y v son constantes determinadas a partir de α_0 y α_B . Estos valores pueden ser consultados a partir de las tablas del anexo 1, si las valores de α_0 y α_B se encuentran en la tabla los valores de u y v pueden ser determinados directamente, de otro modo se debe realizar una interpolación lineal para calcular estos valores.

Los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante este método son considerados conservadores para análisis de diseño, ya que los defectos analizados son mucho más pequeños que las dimensiones estructurales y mucho más largos que la microestructura característica del material.

6. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO

Con la intención de validar la metodología propuesta para la determinación de la tenacidad de fractura en areniscas se realizaron pruebas de laboratorio en muestras obtenidas a partir plugs de la arenisca “Berea”. Los resultados fueron analizados y correlacionados con los valores de tenacidad de fractura disponibles en la bibliografía para este tipo de rocas.

6.1 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

La arenisca Berea es un conocido tipo de roca usada comúnmente en la investigación de la industria del petróleo, debido a su homogeneidad y la disponibilidad de datos relacionados con sus propiedades, es por eso que fueron escogidas para la validación de la metodología seleccionada para la determinación de tenacidad de fractura en areniscas.

Las pruebas se realizaron utilizando los laboratorios de mecánica de rocas del PoroMechanics Institute (PMI) de la Universidad de Oklahoma y del Instituto Colombiano del Petróleo.

6.1.2 Preparación de muestras

Un total de ocho muestras fueron preparadas, cinco de éstas en los laboratorios del PoroMechanics Institute y tres en el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo.

Los especímenes analizados en el PMI fueron obtenidos de un core proveniente del un bloque de la arenisca Berea mediante el corazonamiento con una broca de 4 pulgadas usando agua como fluido refrigerante.

Las superficies de los cinco especímenes fueron pulidas y suavizadas hasta cuando el grosor deseado fue alcanzado. Las figuras 6.1 a 6.5 muestran los diámetros y grosores finales obtenidos en cada una de las muestras.

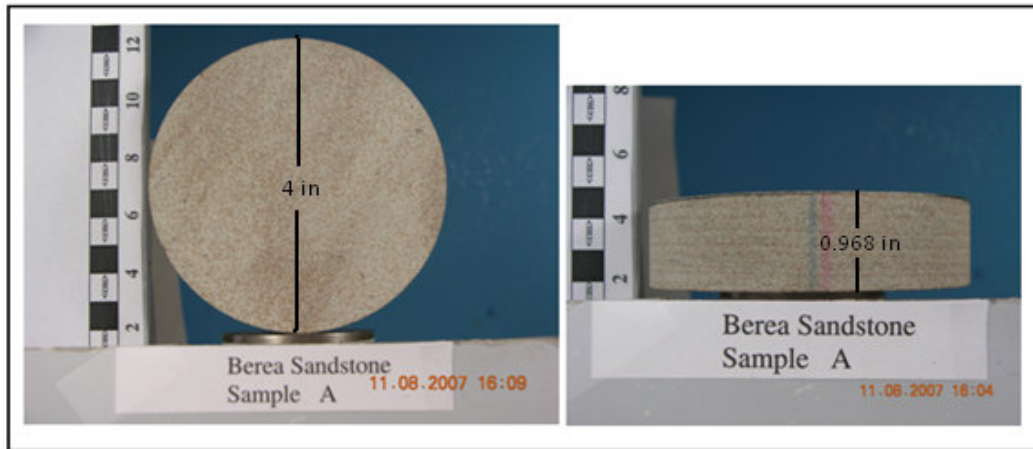


Figura 6.1 Diámetro y grosor de la muestra PMI - A

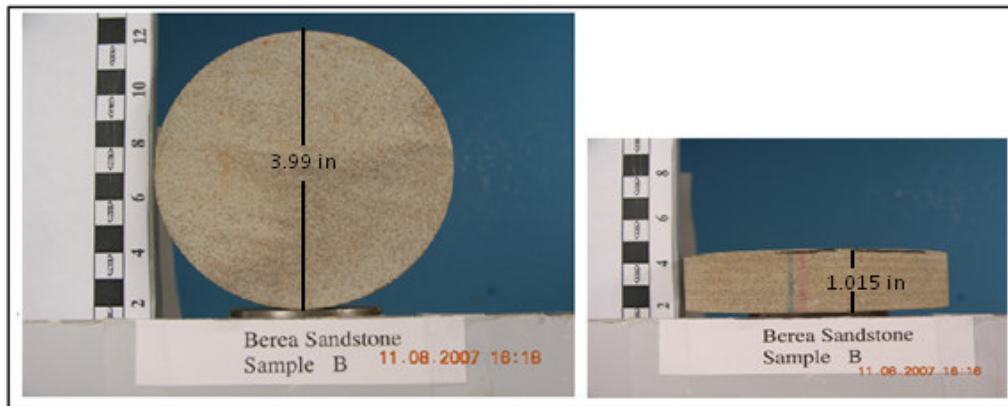


Figura 6.2 Diámetro y grosor muestra PMI-B

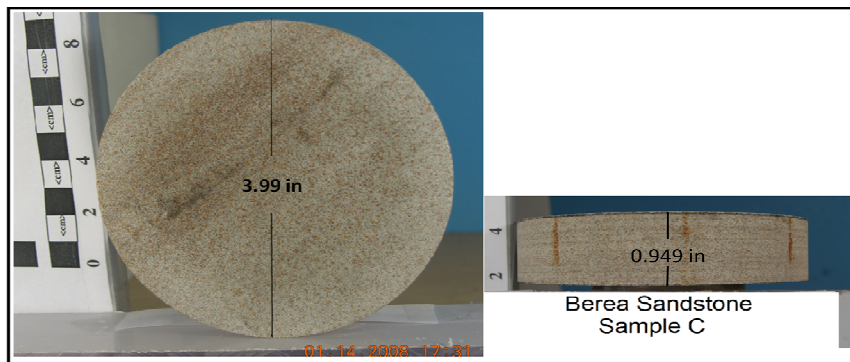


Figura 6.3 Diámetro y grosor muestra PMI-C

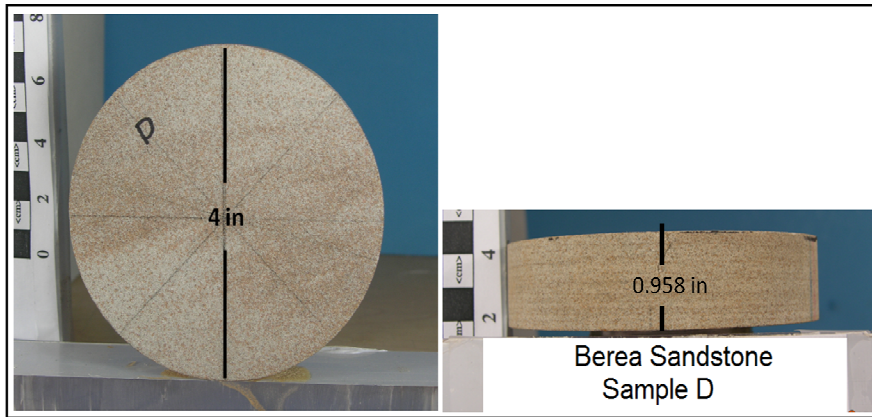


Figura 6.4 Diámetro y grosor muestra PMI-D

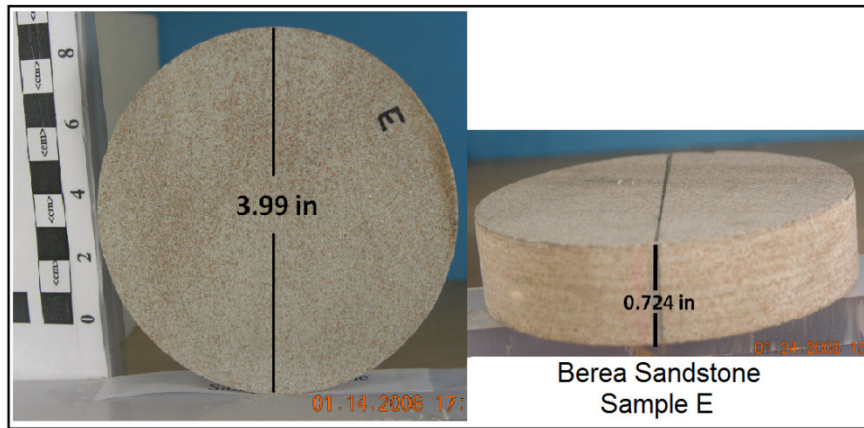


Figura 6.5 Diámetro y grosor muestra PMI-E

Las muestras trabajadas en el Instituto Colombiano del Petróleo fueron obtenidas a partir de un plug de la arenisca “Berea”. El plug de aproximadamente 3 pulgadas de longitud y un diámetro de 1.5 pulgadas fue cortado en tres partes iguales. Posteriormente las superficies de cada una de estas partes fueron aplanadas y suavizadas hasta alcanzar el grosor de disco requerido para cumplir con las especificaciones geométricas determinadas por la metodología. Las figuras 6.6 a 6.8 muestran las dimensiones finales de estas muestras.

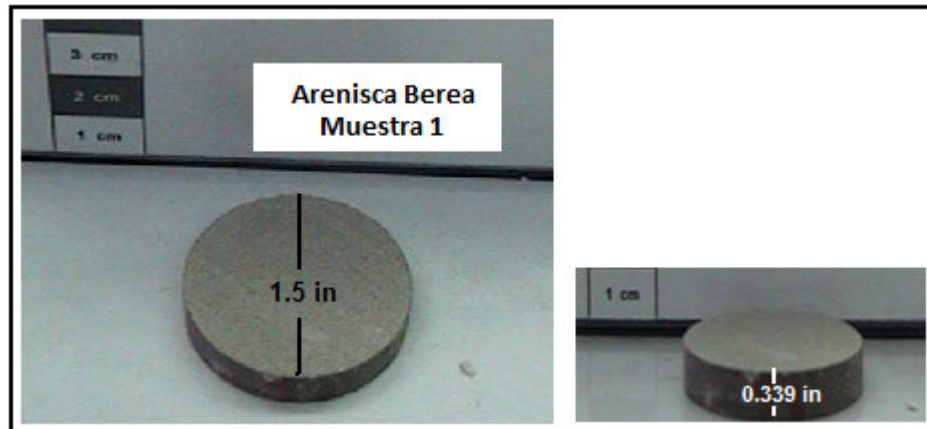


Figura 6.6 Diámetro y grosor muestra ICP-1

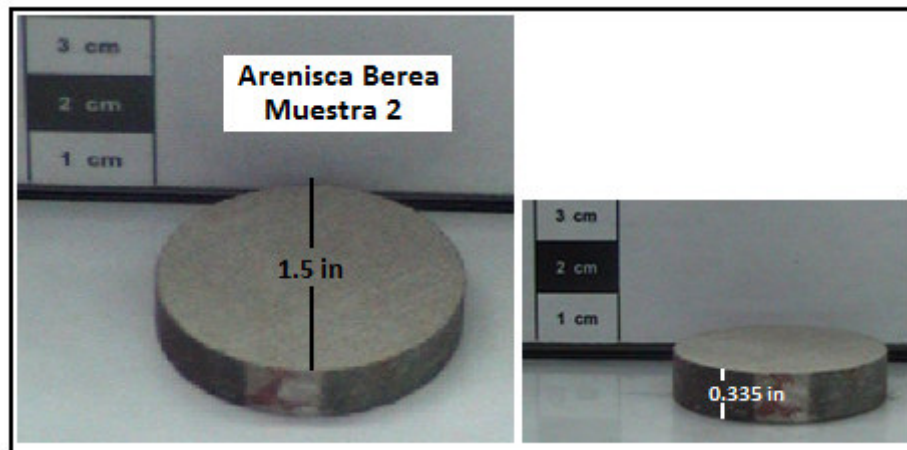


Figura 6.7 Diámetro y grosor muestra ICP-2

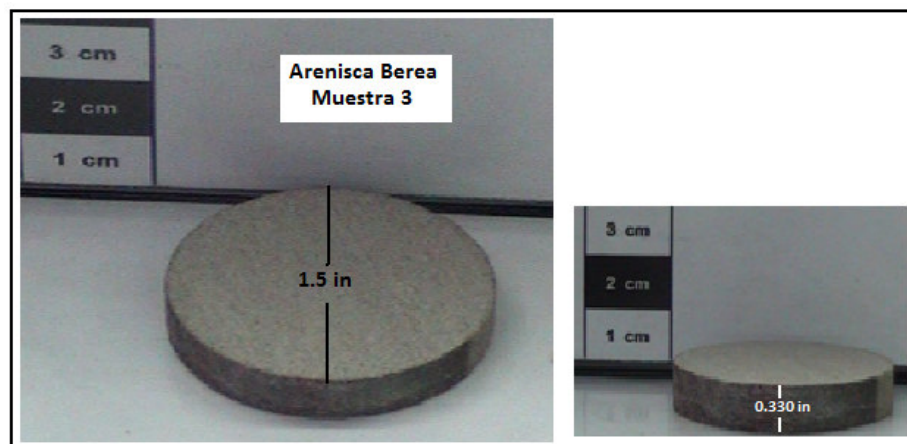


Figura 6.8 Diámetro y grosor muestra ICP-3

El proceso de corte fue diferente para cada grupo de muestras. Las muestras de 4 pulgadas de diámetro con un grosor aproximado de 1 pulgada, fueron cortados utilizando agua como fluido refrigerante. La muestra A fue cortado con una sierra de 4 pulgadas, sin embargo bajo estas condiciones los valores adimensionales α_1 y α_2 no satisficieron las restricciones geométricas planteadas en la tabla 5.2. Por esta razón, en los cortes de los discos siguientes fueron hechos usando una sierra de 3 pulgadas, además algunas modificaciones fueron hechas en el montaje de la sierra de corte para evitar movimientos indeseados que causarán desviaciones en los cortes.

Posterior a la creación de la fractura en las muestras, éstas fueron ubicadas en el horno para secar el agua que estuvo en contacto con la muestra durante el corte. Finalmente se colocaron dos piezas cuadradas de vidrio en una de las superficies de cada una de las muestras, éstos fueron localizados de manera paralela y centrada a 0.25 pulgadas de cada uno de los lados del corte; este proceso requirió del uso de epóxico para pegar el vidrio a la superficie de la muestra. Entre estas dos piezas de vidrio se localizará el clip gauge para medir la apertura de la fractura.

En el caso de las muestras de una y media pulgada de diámetro, el corte debió ser hecho con una herramienta de motor utilizando discos de carburo de 1 pulgada de radio. Esto debido al tamaño de la muestra, ya que no existen discos disponibles de este tamaño que puedan ser usados en la máquina cortadora. En este caso no se colocaron las piezas de vidrio para ubicación del clip gauge, ya que la medición de la apertura de la fractura no es indispensable en la metodología seleccionada y la localización de estos fragmentos podría causar problemas a la hora de realizar el montaje de la prueba debido al tamaño de la muestra.

La tabla 6.1 muestra las dimensiones finales de cada una de las muestras preparadas además de la conversión de éstas dimensiones a parámetros adimensionales.

Tabla 6.1 Dimensiones de las muestras tipo CCNBD

Muestra	Diámetro (in)	Grosor (in)	α_0	α_1	α_B
PMI – A	4.00	0.968	0.308	0.865	0.484
PMI – B	3.99	1.015	0.241	0.603	0.507
PMI – C	3.99	0.949	0.354	0.558	0.475
PMI – D	4.00	0.958	0.326	0.546	0.479
PMI – E	3.99	0.724	0.304	0.561	0.362
ICP – 1	1.5	0.339	0.436	0.413	0.452
ICP – 2	1.5	0.335	0.442	0.413	0.447
ICP – 3	1.5	0.330	0.452	0.413	0.440

Las siguientes figuras muestran el arreglo final en cada grupo de muestras.

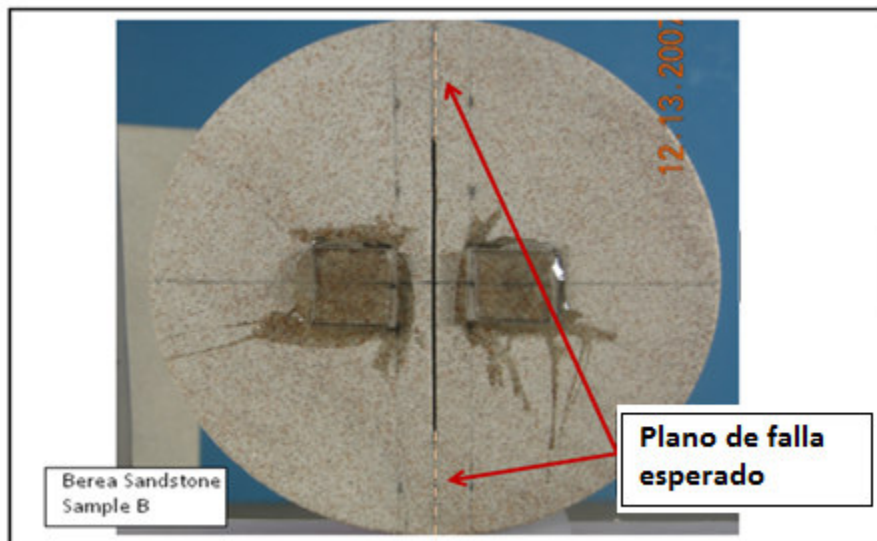


Figura 6.9 Arreglo final grupo de muestras de 4 in de diámetro

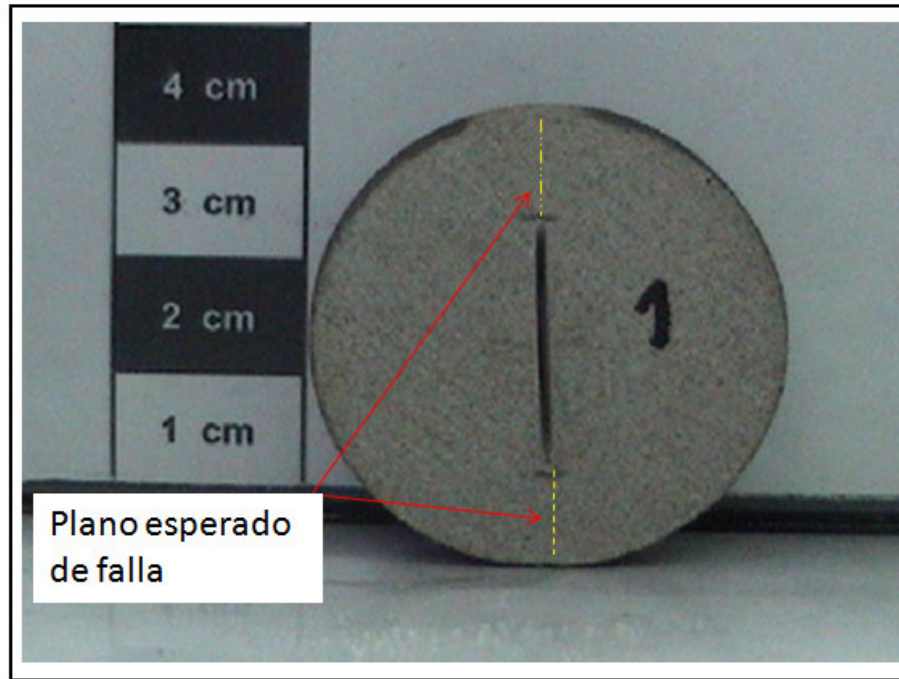


Figura 6.10 Arreglo final grupo de muestras de 1.5 in de diámetro

6.1.2 Montaje de la prueba y aplicación de la carga

Antes de cada prueba donde el desplazamiento de la apertura de la fractura fue medido (grupo de muestras PMI), el clip gauge fue calibrado correlacionando Voltaje vs. Desplazamiento. Los datos de desplazamiento fueron tomados cada 0.005in entre 0.005 y 0.05in. Esta medida es útil a la hora de analizar los datos obtenidos para obtener una buena correlación para los cálculos de desplazamiento de apertura de la fractura.

La aplicación de la carga sobre las muestras se hizo por medio de equipos de aplicación de carga tipo MTS, "Rock Mechanics Test System". El laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad de Oklahoma cuenta con el equipo MTS – 819 mientras que en el laboratorio perteneciente al ICP se utilizó el equipo MTS – 815. Estos dos equipos, mostrados en la figura 6.11, tienen los mismos principios de funcionamiento para efectos de aplicación de carga sobre las muestras CCNBD.

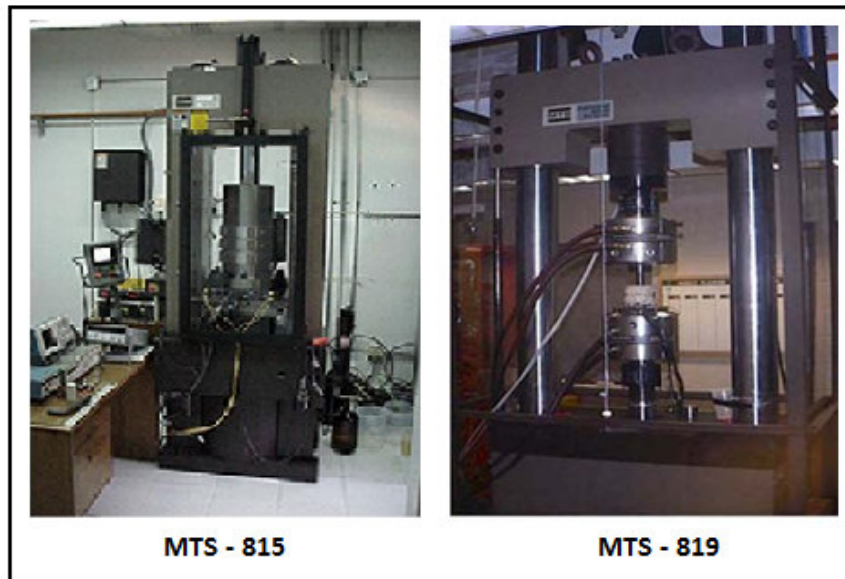


Figura 6.11 Equipos utilizados para la aplicación de carga

El montaje de las muestras dentro del equipo de aplicación de carga es mostrado en la figura 6.12. Aunque el montaje muestra algunas diferencias para cada uno de los casos, éstas no afectan el resultado final ya que la aplicación de carga se hace de la misma manera, sobre el eje de la fractura. La figura 6.12 muestra el montaje de las muestras de 4 pulgadas de diámetro realizado en el equipo MTS – 819. Por su parte, la figura 6.13 muestra el montaje realizado con algunas diferencias sobre el montaje, como la ubicación de trozos de espuma entre los dos platos de carga y el uso de mandíbulas no planas. Los trozos de espuma evitan que el peso total de la mandíbula superior recaiga sobre la muestra antes de la aplicación de la carga y así impedir que la muestra falle antes del comienzo de la prueba. Por otro lado, el uso de estas mandíbulas no interfiere en la respuesta de la muestra a la aplicación de la carga desde que el corte esté ubicado perfectamente en el centro de la mandíbula.

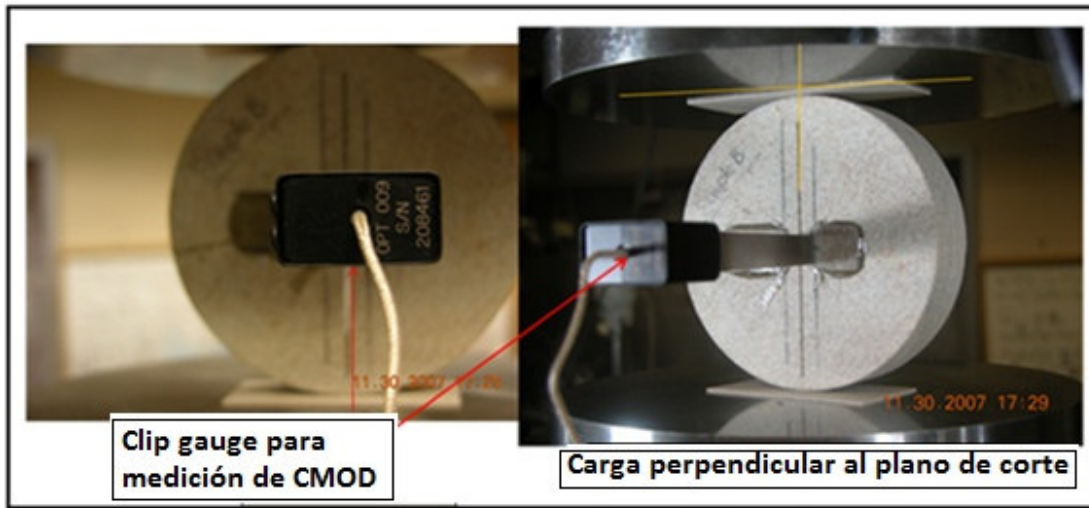


Figura 6.12 Montaje final de muestras en MTS – 819

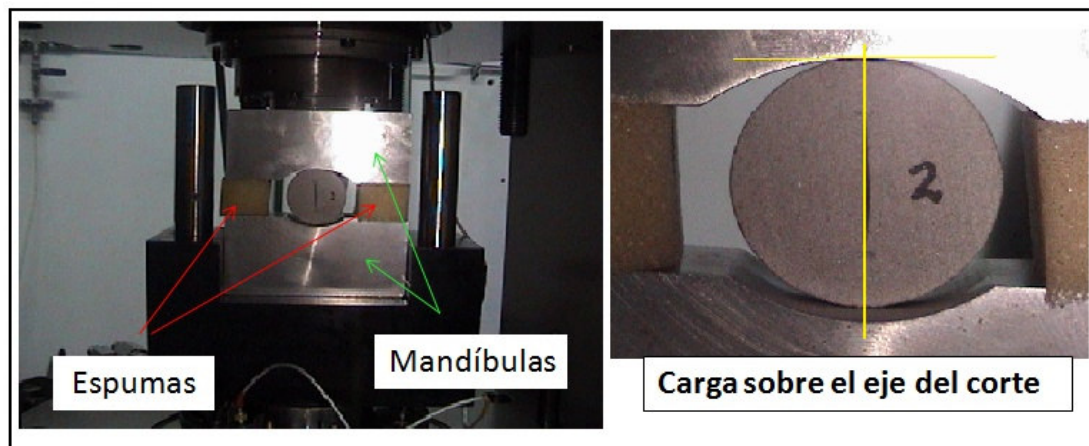


Figura 6.13 Montaje final de muestras en MTS – 815

6.1.3 Adquisición de los datos

Durante las pruebas realizadas en las muestras de 4 pulgadas de diámetro, se midieron dos parámetros, la carga aplicada por la MTS – 819 y el desplazamiento del clip gauge. La tasa de aplicación de carga en este caso fue de 2500Lbf/min (11.12 KN/seg), sugerida por el ISRM para este tipo de prueba. En ambas variables medidas, los datos fueron compilados y

registrados 4 veces por segundo de manera que la carga máxima pudiera ser determinada con precisión.

En el caso de las muestras de 1.5 pulgadas de diámetro, sólo se midió la carga aplicada por la MTS – 815. La tasa de aplicación de carga fue de 112lbf/min (0.25KN/min), esta fue determinada a partir del dato de esfuerzo tensil del material y las dimensiones geométricas de las muestras. En este caso la tasa sugerida por el ISRM no fue tomada en cuenta debido al tamaño de las muestras; ya que si hubiese sido usada, las muestras hubieran fallado muy rápido lo que hubiera dificultado la determinación de la fuerza justo antes de la propagación de la fractura.

Básicamente, los datos registrados durante las pruebas consisten en un grupo de valores de carga, tiempo y desplazamiento del clip gauge (este último en el caso de las muestras PMI). Estos datos permiten determinar la carga máxima durante la prueba, que es el esfuerzo máximo que soportó la muestra sólo un momento antes de que se presentara la falla.

6.1.4 Resultados de las pruebas

Algunas anomalías se presentaron en la preparación de los discos y desarrollo de las pruebas, de algunas de las muestras con las que se trabajó. Debido a esto, los datos obtenidos para estas muestras se consideraron inválidos o poco confiables para el cálculo de la tenacidad de fractura.

En el caso de las muestras tratadas en el laboratorio de mecánica de rocas del PMI, se presentaron problemas en dos de las cinco muestras probadas.

La muestra PMI – A no satisfacía las condiciones geométricas de los discos CCNBD, además después de la realización de la prueba se pudo observar que el corte tuvo una desviación considerable del eje de simetría propuesto inicialmente. Estas son consideradas las razones por las cuales durante el desarrollo de la prueba la falla no empezó en el eje del corte tipo chevron, lo cual pudo ser observado posterior a la prueba mediante el video de grabación de la prueba. Los resultados de la prueba fueron totalmente

desechados debido a éste último punto, ya que la falla de la muestra empezó en dos líneas paralelas a cada uno de los lados del corte. La figura

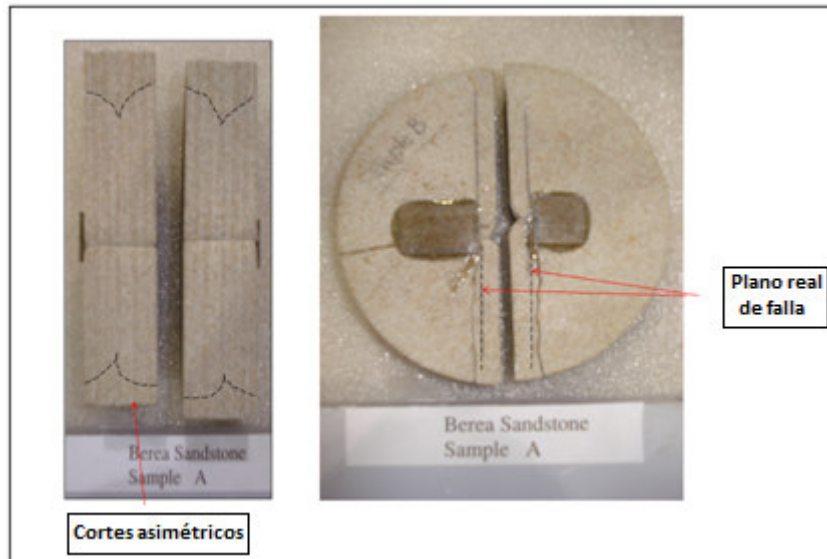


Figura 6.14 Muestra PMI – A después de la prueba

La muestra PMI – 2 satisfizo las condiciones geométricas, esta vez el corte fue hecho con una cuchilla circular de 3 pulgadas de diámetro, por lo que el corte no fue tan profundo como en el caso de la muestra PMI – 1, de esta manera se cumplieron con las condiciones de los factores adimensionales sugeridos en la tabla 5.2. Sin embargo durante la prueba, la roca falló pero no se separó en dos por lo que no pudo verificar la simetría del corte y la dirección de propagación de fractura. De todas maneras, los datos obtenidos mediante esta prueba fueron tenidos en cuenta para los cálculos de tenacidad de fractura ya que las características externas de la roca no mostraron ninguna desviación respecto a las dimensiones sugeridas por el método.



Figura 6.15 Muestra PMI – B después de la prueba

La muestra PMI – C estuvo dentro del rango de condiciones geométricas, el corte fue hecho con la misma cuchilla usada para la muestra anterior. La siguiente figura muestra la esta muestra después de la prueba; se puede observar que la desviación en el corte fue mínima y el plano de propagación de falla fue el deseado. La carga fue aplicada hasta que la muestra falló y después de esto una carga progresiva fue aplicada nuevamente para romper la muestra y de esta manera verificar si el corte fue hecho de la manera correcta. Algunas fracturas paralelas al corte pueden ser observadas en la siguiente gráfica, pero éstas aparecieron después de que la muestra falló por lo que no pueden ser consideradas como una fuente de error.

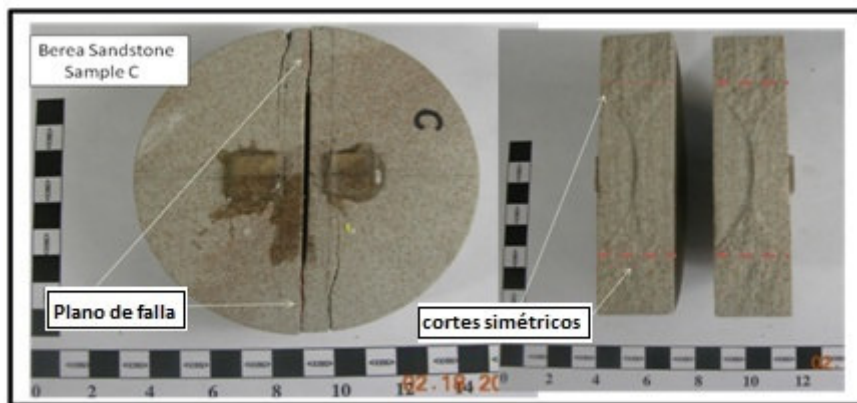


Figura 6.16 Muestra PMI – C después de la prueba

La muestra PMI – D satisfizo las condiciones geométricas, el corte fue hecho con la misma cuchilla utilizada en las muestras B y C. El corte cumple con los requerimientos de simetría de la metodología, además dos fracturas con orientación paralela al corte, similares a los encontrados en la muestra C, pudieron ser observados. Estos no se consideran representativos porque aparecieron después de que se presentara el fallamiento de la muestra. La figura 6.17 muestra esta muestra después de la realización de la prueba.

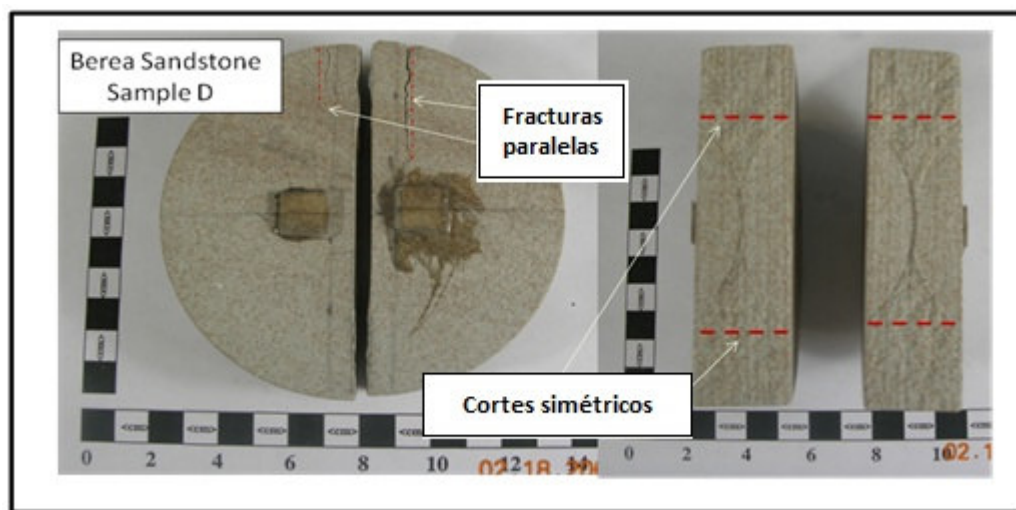


Figura 6.17 Muestra PMI – D después de la prueba

La última muestra trabajada en el PMI fue hecha con la pieza restante del corazón utilizado para extraer las muestras anteriores. El grosor del disco no estaba dentro de las dimensiones sugeridas, sin embargo esta muestra fue probada ya que estaba cerca de los requerimientos y puede ser una manera de determinar el efecto de las desviaciones del grosor de la muestra al aplicar la metodología. El corte parece simétrico, sin embargo esto no pudo ser completamente corroborado ya que el plano de falla resultó afectado al aplicar carga por segunda vez después de que la muestra había fallado, para lograr separar las dos mitades del disco. La figura 6.18 muestra la muestra E después de la prueba y la ruptura que se presentó en el plano de falla.

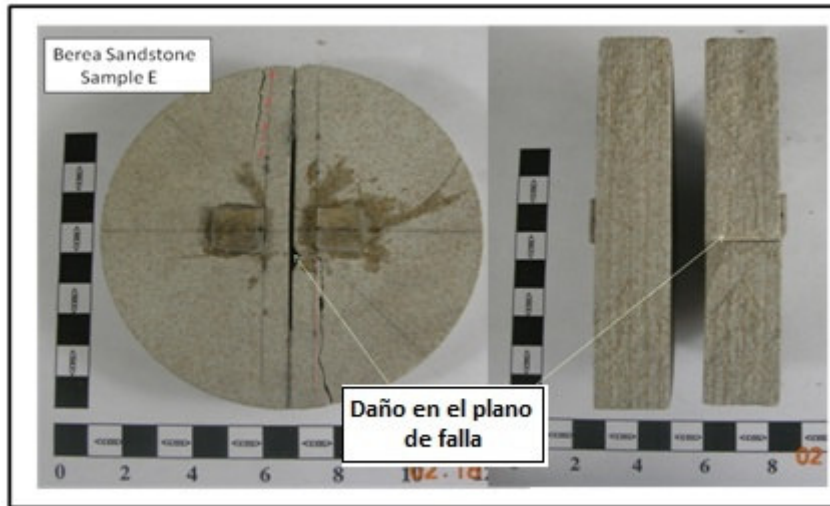


Figura 6.18 Muestra PMI – E después de la prueba

Por su parte, de las tres pruebas desarrolladas en el ICP una presentó problemas, ya que falló durante el montaje de la muestra en el equipo de carga antes de la aplicación de esfuerzos. Esto sucedió debido a que la muestra no resistió el peso de las mandíbulas que se utilizaron para sostenerla en el arreglo de carga. A continuación se muestra el estado final de la muestra ICP – 1 después de que fallara durante el montaje.

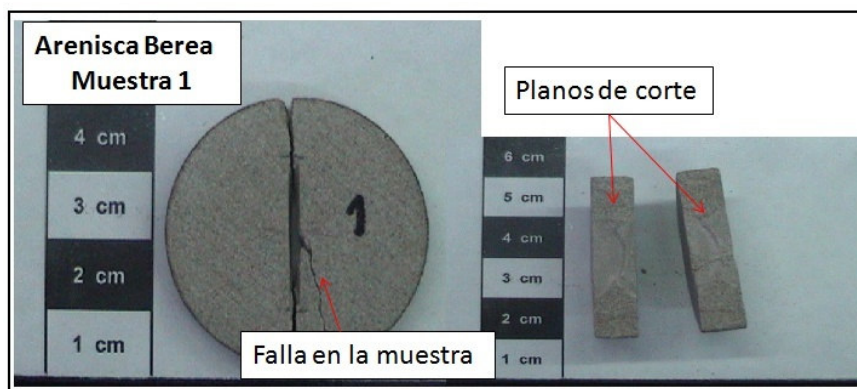


Figura 6.19 Muestra ICP – 1 después de la prueba

Para la realización de la prueba en la segunda muestra trabajada en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, se tomaron algunas precauciones

para evitar que fallara antes de lo previsto. En este caso la muestra fue cuidadosamente ubicada en el equipo de carga de tal manera que entre éste y el disco se presentara un contacto mínimo que no ejerciera una presión capaz de hacer fallar la muestra antes de la aplicación de la carga. Los datos pudieron ser registrados, sin embargo debido a que la prueba se realiza bajo control de carga y no de desplazamiento; la carga aplicada después de que se presentó la falla en la muestra, causó daños considerables en el disco lo que no permitió determinar si el corte realizado en la muestra cumplió con los requerimientos de simetría o no. La figura 6.20 muestra el disco después de la prueba.

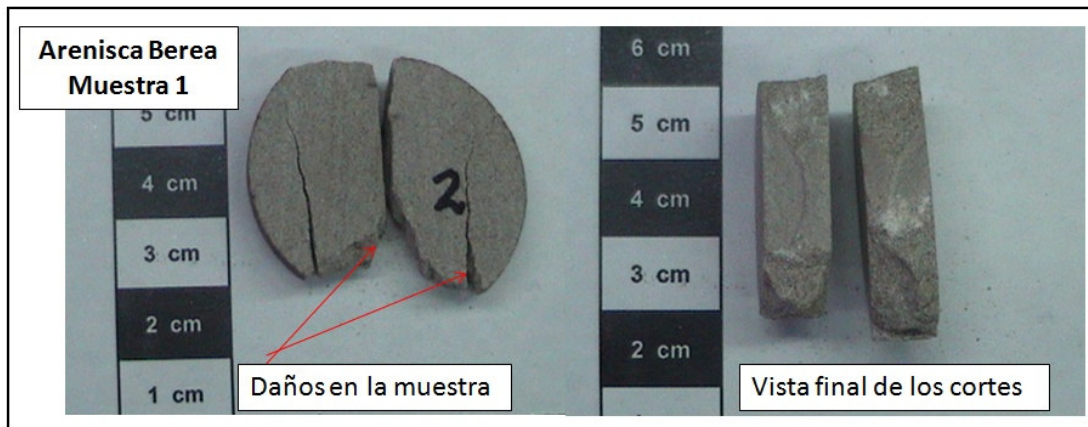


Figura 6.20 Muestra ICP – 2 después de la prueba

El desarrollo de la última prueba para el grupo de muestras de 1.5 pulgadas fue similar al de la segunda prueba trabajada en el ICP. El montaje fue realizado cuidadosamente para evitar que la muestra fallara antes de la aplicación de la carga. De igual manera al aplicar la carga, y posterior a que se presentara la falla, la muestra sufrió un daño considerable lo que impidió determinar la simetría del corte. En esta oportunidad se intentó evitar este incidente mediante el control de tanto la carga como el desplazamiento, sin embargo el tamaño de la muestra hace que después de que se presente la propagación de la fractura, a pequeñas aplicaciones de carga se presente un

daño considerable en la muestra. En la figura 6.21 se puede apreciar el resultado final de la prueba.

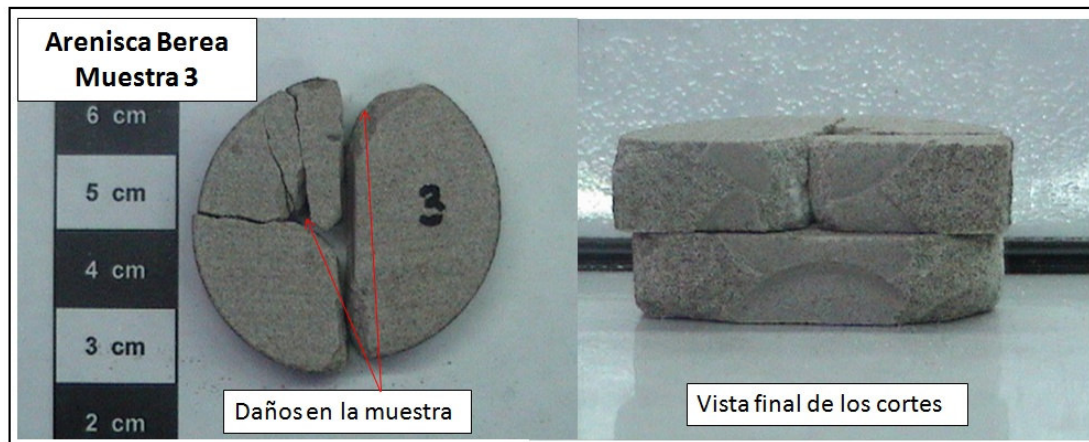


Figura 6.21 Muestra ICP – 3 después de la prueba

6.2 CÁLCULO DE TENACIDAD DE FRACTURA

El grupo de datos obtenidos en cada una de las pruebas fue procesado para determinar la carga máxima soportada por la muestra antes de que se presentara la falla. Las figuras 6.22 a 6.27 muestran las gráficas de Carga vs. Tiempo, la carga máxima corresponde al punto más alto de ésta gráfica. Este es el dato que debe ser registrado para el cálculo posterior de tenacidad de fractura.

En el caso de las pruebas realizadas en las muestras de 4.0 pulgadas también fueron registrados de desplazamiento de la apertura del crack, esto sirve como una herramienta para confirmar el punto donde se presentó la falla.

Utilizando los parámetros adimensionales registrados en la tabla 6.1 fueron calculados los valores de la intensidad de esfuerzos crítico, Y_{\min}^* , mediante el uso de la ecuación (5.8) y las tablas del anexo 1.

A partir de la determinación de la carga máxima resistida por cada una de las muestras durante las pruebas, la geometría del disco y el valor de intensidad

de esfuerzo crítico calculado; es calculada la tenacidad de fractura utilizando la ecuación (5.7). La tabla 6.2 reporta los datos de tenacidad de fractura calculados para las muestras consideradas como válidas, además de los valores calculados de Y_{min}^* .

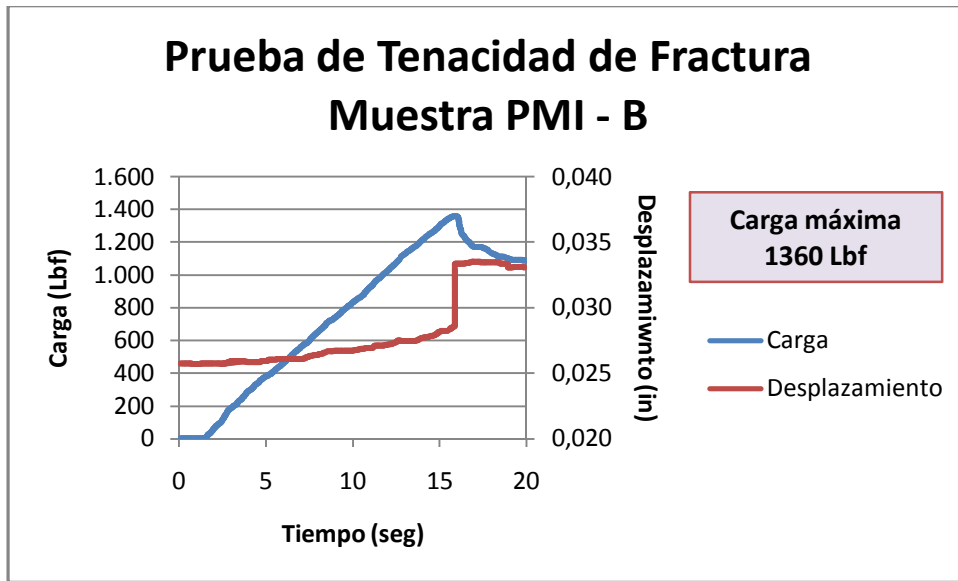


Figura 6.22 Gráfica de resultados prueba de tenacidad de fractura. Muestra PMI - B

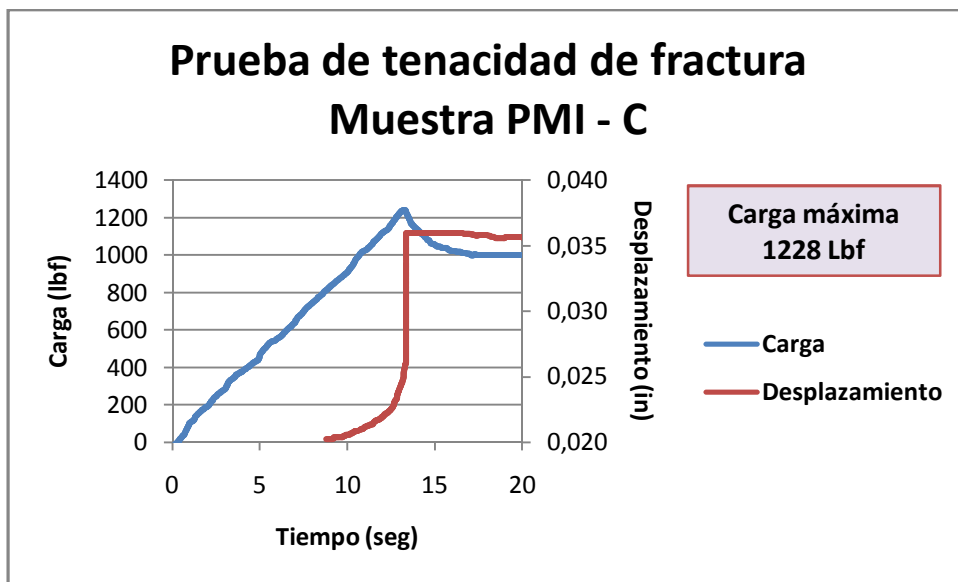
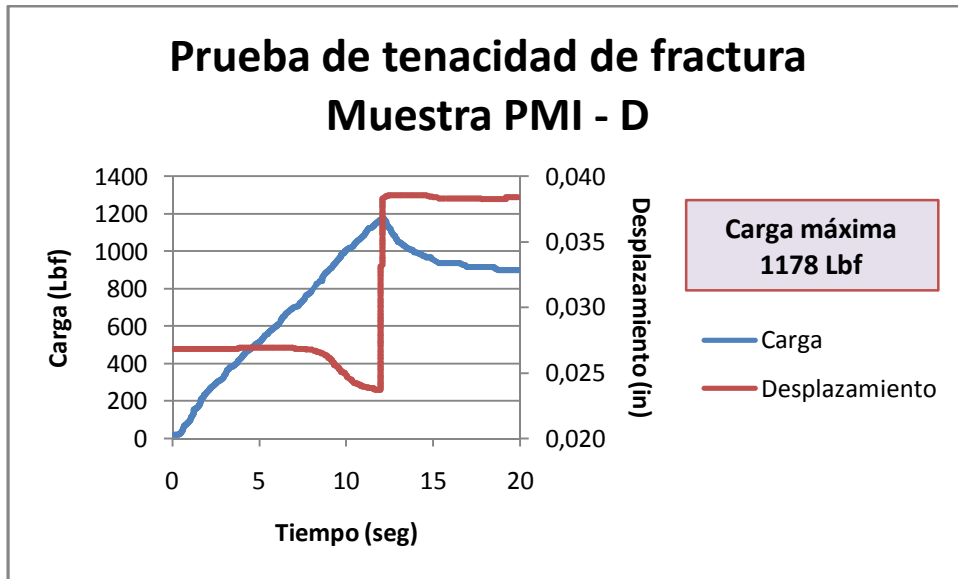
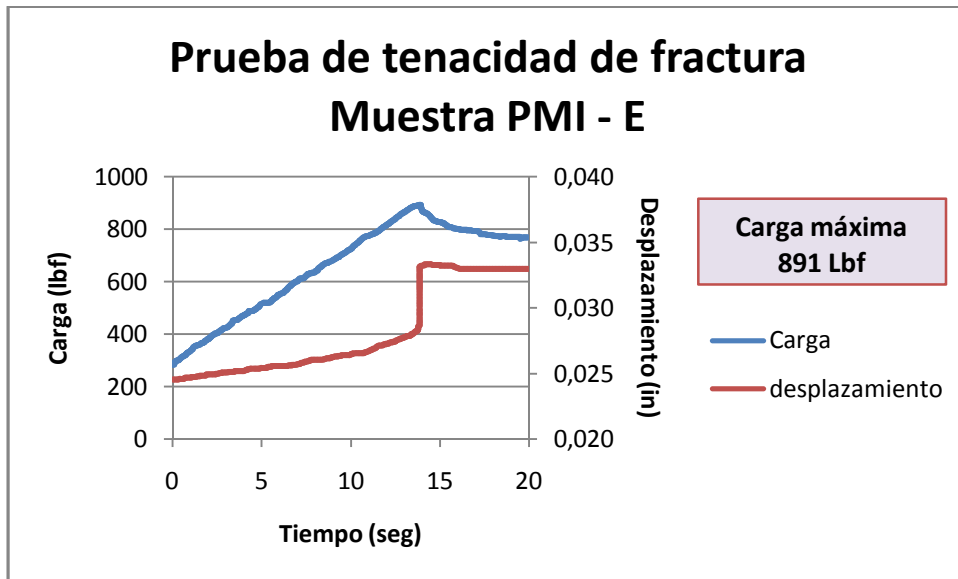


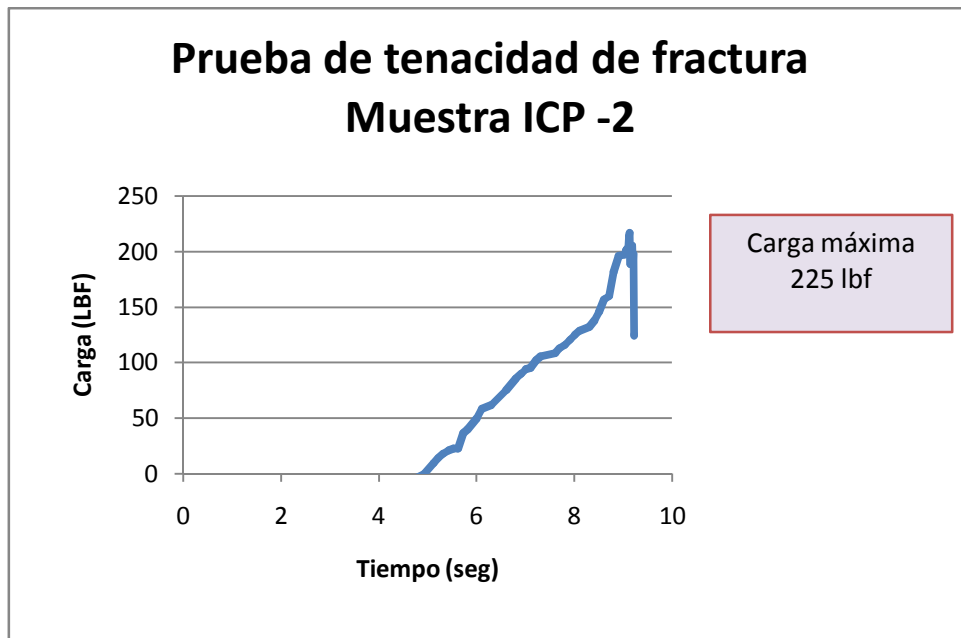
Figura 6.23 Gráfica de resultados prueba de tenacidad de fractura. Muestra PMI - C



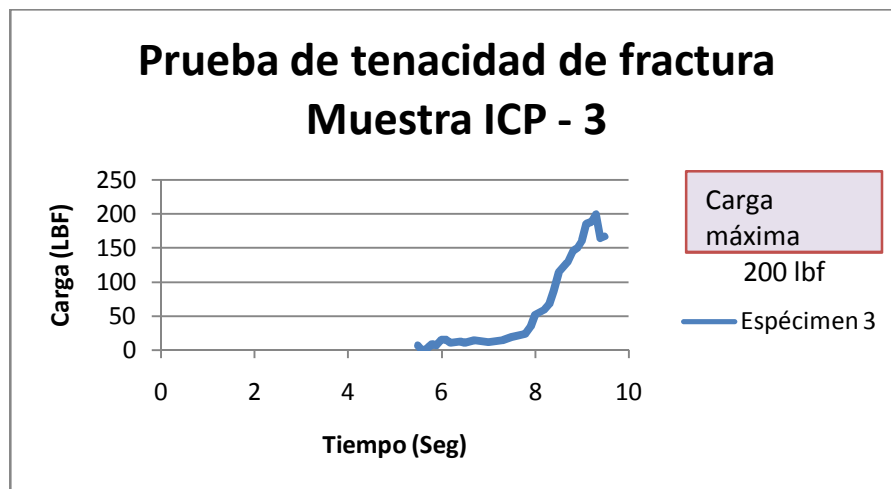
**Figura 6.24 Gráfica de resultados prueba de tenacidad de fractura.
Muestra PMI – D**



**Figura 6.25 Gráfica de resultados prueba de tenacidad de fractura.
Muestra PMI – E**



**Figura 6.26 Gráfica de resultados prueba de tenacidad de fractura.
Muestra ICP – 2**



**Figura 6.27 Gráfica de resultados prueba de tenacidad de fractura.
Muestra ICP – 3**

Tabla 6.2 Parámetros y cálculo de tenacidad de fractura de las muestras válidas

MUESTRA	D(in)	B(in)	Y_{min}^*	$P_{máx}$ (lbf)	$P_{máx}$ (KN)	K_{Ic} (Psi \sqrt{in})	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
PMI – B	3.99	1.015	0.8197	1360	6.052	776.6	0.604
PMI – C	3.99	0.949	0.8022	1228	5.464	734.0	0.570
PMI – D	4.00	0.958	0.7404	1178	5.242	643.8	0.500
PMI – E	3.99	0.724	1.3943	891	3.964	1213.3	0.943
ICP – 2	1.50	0.335	0.8022	217	0.650	836.6	0.650
ICP – 3	1.50	0.330	0.8231	200	0.629	809.5	0.629

6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados incluye un estudio conjunto de los valores de tenacidad de fractura obtenidos y las características del grupo de muestras analizado.

Analizando los parámetros que envolvió la preparación de muestras y el tratamiento de los datos, puede concluirse que las muestras PMI – B, PMI – C, PMI – D, PMI – E, ICP – 2 e ICP – 3 pueden ser analizadas en su respectivo grupo de datos; por otro lado la muestra PMI – E fue evaluada como un caso especial de desviación de los requerimientos geométricos. Las muestras PMI – A e ICP – 1 no deben ser consideradas en el análisis de resultados debido a las inconsistencias que se presentaron durante la realización de las pruebas. En el primer caso, además que el corte del disco no satisfizo las condiciones geométricas sugeridas, durante la prueba la fractura se propagó visiblemente en un plano diferente al demarcado por el corte tipo chevron por lo que los resultados deben ser considerados totalmente inválidos. En el caso de la muestra ICP – 1, el análisis de la

prueba resulta imposible ya que no se pudieron recolectar datos debido a que la muestra fallo antes de que se registrara la aplicación de la carga.

Cada grupo de muestras debió ser considerado inicialmente de manera independiente, para estudiar la repetitividad de los datos y su desviación respecto a la media.

Para el análisis del grupo de muestras trabajadas en el laboratorio de mecánica de rocas del PMI, se analizaron las muestras B, C y D. La muestra E no fue inicialmente tomada en cuenta ya que además de no cumplir con los requerimientos geométricos, puede verse como el valor de tenacidad de fractura calculado en este caso difiere en un alto porcentaje de las muestras analizadas anteriormente.

Este grupo de muestras presenta un buen comportamiento de los datos, ya que después de calcular la media se pudo observar que ninguno de los valores de tenacidad de fractura calculados presenta una desviación mayor al 10% respecto a la media. El caso especial de la muestra PMI – E permite observar el efecto de un relativamente “pequeño” cambio en la geometría de la muestra, que representó un incremento considerable en el valor de Y^*_{min} . A partir de la fórmula (5.7) se puede determinar la importancia de este parámetro, ya que es un factor directo para el cálculo de tenacidad de fractura. A partir de eso puede concluirse la importancia de estar dentro del rango de dimensiones geométricas permitido, ya que una leve desviación puede provocar un cambio sustancial en los resultados finales; en el caso de la muestra PMI – E, las discrepancias con los requerimientos geométricos se tradujeron en una desviación del 70% respecto a la media de los demás datos de este grupo de muestras.

En el caso de las muestras trabajadas en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, es lamentable que sólo se pudiera contar con 2 datos ya que la tercera muestra falló durante el montaje. Sin embargo los valores de tenacidad de fractura obtenidos presentan una buena correlación entre ellos con una desviación menor al 5% respecto a la media del grupo de muestra.

Para definir la validez de la metodología aplicada a los grupos de muestras trabajado, debemos comparar los valores de tenacidad de fractura disponibles en la industria con los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante la realización de las pruebas. En el capítulo 3 se referenciaron dos fuentes bibliográficas que tienen registro de valores de tenacidad de fractura en arenisca Berea: los valores se encuentran entre $0.45\text{-}0.60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (620-780 MPa). Si se comparan los datos del grupo de muestra PMI e ICP con los datos teóricos puede observarse una mayor precisión de los datos trabajados; con el primer grupo de muestras, aunque los datos trabajados en el segundo caso se alejan relativamente poco del rango de aceptación.

La diferencia principal entre los dos tipos de muestras fue básicamente el tamaño, aunque las dimensiones de las muestras y el diseño del corte estuvo entre los parámetros adimensionales sugeridos por el método, las muestras trabajadas en el ICP son casi tres veces más pequeñas que las muestras trabajadas en el PMI. La diferencia en el tamaño de las muestras radicó en la imposibilidad de encontrar “full cores” de arenisca Berea en Bucaramanga, por lo que se recurrió a plugs de Berea de $1 \frac{1}{2}$ pulgada de diámetro.

La metodología bajo las que se trabajaron las muestras, sugiere un diámetro alrededor de los 75mm (3 in), de tal manera que el grosor de la muestra esté por encima del grosor crítico. Esto puede ser explicado teniendo en cuenta que los especímenes que tienen proporciones estándares pero diferentes tamaños absolutos producen diferentes valores de tenacidad de fractura. Esto resulta porque el estado de esfuerzos adyacente a la fractura cambia con el grosor del espécimen hasta que el grosor excede un valor crítico determinado. En el momento en que el grosor excede este valor crítico, el valor de la tenacidad de fractura se vuelve relativamente constante y este valor es considerado la propiedad de tenacidad de fractura el material. La figura 6.28 muestra el comportamiento de la propagación de fractura respecto al grosor de la muestra. Esto corrobora el comportamiento de los resultados de las muestras de $1 \frac{1}{2}$ pulgada, donde los valores de tenacidad

de fractura estuvieron por encima de los valores teóricos debido al efecto el plano de esfuerzos. El plano de esfuerzos es una condición en la cual el estado de esfuerzos es tal que dos de los esfuerzos principales son siempre paralelos a un plano dado y son constantes en la dirección normal, la contraparte del plano de deformación es el plano de deformación que es la condición en la cual el desplazamiento de todos los puntos del cuerpo son paralelos a un plano dado y los valores del desplazamiento no dependen de la distancia perpendicular al plano; este plano de deformación es logrado cuando el material alcanza un grosor suficiente, que en el caso de la metodología trabajada estaría alrededor de las tres pulgadas. (9; 8)

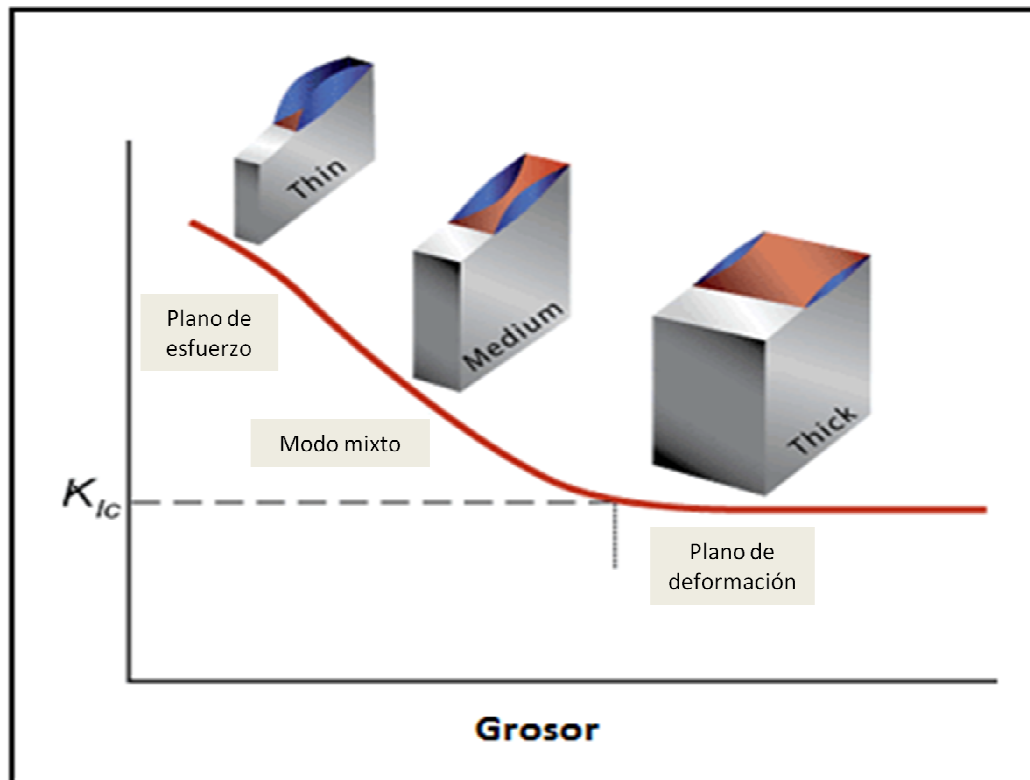


Figura 6.28 Comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos crítico con el grosor del material. Fuente: Modificada NDT Resource Center. www.ndt-ed.org

A través de los resultados de las pruebas, varias conclusiones pueden ser determinadas; el proceso metodológico empleado muestra coherencia con los valores de tenacidad de fractura teóricos, además el análisis de las desviaciones mostró la fuerte dependencia de este método respecto al cumplimiento de los parámetros de geometría. Esto corrobora la importancia de la preparación de las muestras y la realización de los cortes, para determinar un valor real de la propiedad de tenacidad de fractura que sea útil en el diseño de procesos relacionados con el comportamiento de las fracturas en areniscas.

CONCLUSIONES

1. La tenacidad de fractura es una de las variables más importantes cuando son realizadas investigaciones relacionadas con la mecánica de fracturas en material rocoso. Esta es una propiedad del material y define la concentración de esfuerzos máxima que puede soportar un material que contiene una fractura, antes de que ésta se propague.
2. Varias investigaciones han sido realizadas con el fin de buscar la mejor manera de determinar esta propiedad; y se ha llegado a la conclusión que la las pruebas de laboratorio proporcionan los resultados más confiables.
3. Cuatro metodologías han sido publicadas para la determinación de la tenacidad de fractura mediante pruebas de laboratorio; a partir de un análisis comparativo de los principales parámetros de las diferentes pruebas se llegó a la conclusión que el método más adecuado es el que usa muestras tipo CCNBD, que son básicamente discos con un corte tipo chevron (en forma de V). Este método fue elegido debido a su practicidad, ya que permite la determinación de la tenacidad de fractura de una manera rápida, económica, confiable a partir de un equipo de laboratorio básico.
4. En base a los resultados de las pruebas realizadas en muestras de la arenisca Berea, se pudo comprobar la confiabilidad del proceso metodológico escogido; los valores de tenacidad de fractura obtenidos presentan buenos niveles de precisión y exactitud. Los valores presentaron coherencia respecto a los teóricos y no se presentaron desviaciones significativas entre los resultados de las muestras consideradas como válidas.

5. Los valores de tenacidad de fractura obtenidos mediante este proceso metodológico pueden ser considerados conservadores para efectos de diseño.
6. El grosor de las muestras representa un parámetro de importancia en la realización de pruebas para la determinación de tenacidad de fractura; ya que en el caso de muestras por debajo del grosor estándar, el modo de propagación de fractura cambia debido a la concentración de esfuerzos.
7. Se comprobó la influencia de la preparación de las muestras y la correcta realización de los cortes en los resultados finales de tenacidad de fractura, ya que las desviaciones que se presentaron fueron en muestras cuyas especificaciones geométricas estaban fuera del rango de aceptación.

RECOMENDACIONES

1. El uso de cualquier método para la determinación de la tenacidad de fractura requiere de muestras con unas condiciones geométricas bien definidas, por lo tanto se deben cumplir rigurosamente estos requerimientos para de esta manera obtener valores que representen la propiedad del material.
2. Es muy importante que el grosor de las muestras esté de acuerdo a los requerimientos especificados. Esto evita un aumento en el valor real de la tenacidad de fractura debido a los efectos de modo mezclado de fractura.
3. Se recomienda preparar algunas muestras extra; de esta manera en caso dado que se presente alguna falla, se puede contar con suficiente datos para la comparación de los resultados de tenacidad de fractura.

BIBLIOGRAFÍA

1. **E., Fjaer.** *Petroleum Related Rock Mechanics.* 1996.
2. **Osorio, Gildardo.** *Curso de geomecánica.* Medellin : s.n., 2006.
3. **García, Ricardo.** *Determinacion de UCS en shales a partir de módulos de indentación.* Bucaramanga : s.n., 2008.
4. **Lopera, Francisco.** *Mecánica de fracturas y su aplicación al estudio de arcillas.* 2003.
5. **Palacion, Jinna.** *Teoría poroelástica en la estabilidad de pozo.* Bucaramanga : s.n., 2008.
6. **Sondergeld, Carl.** *Seminario: "Rock Failure and Stress and Strain".* universidad de Oklahoma : s.n., 2008 .
7. **Martin, A.** *Crack tip plasticity in soft formations.* s.l. : SPE, 2000. 63171.
8. **labuz, J F.** *Mode II fracture toughness under plane-strain.* s.l. : Engineering Fracure Mechanics, 2006.
9. **Roylance, David.** *Introduction to Fracture Mechanics.* 2001.
10. **Holder, Jon.** *Effective fracture toughness in hydraulic fractures.* s.l. : SPE, 1994. 25491.
11. **Scklarz, H.** *Fracture toughness crieteria in drill pipe.*
12. **Prazad, Umesh.** *Fracture toughness and its use in drill bit selection.* s.l. : AADE _ NTC, 2001.
13. **Olson, Jon.** *Fracture Mechanics Properties in reservoir charaterization.* s.l. : SPE/ISRM. 780207.

14. **Thiercelin, M.** *Influence of fracture toughness on the geometry of Hydraulic fractures.* s.l. : SPE, 1998.
15. **Contreras, Oscar.** *Gradiente de fracture en Mirador.* Bucaramanga : s.n., 2008.
16. **al, Funatsu et.** *Combined effect of P & T on fracture toughness calculations,*Journal of Rock Mechanics and Mining science. 2007.
17. **Dressen, G.** *Effect of loading rate in Mode I fracture toughness.* s.l. : Rock Mechanics Science, 2003.
18. **Sepúlveda, Maria.** *Curso de geología general,*Universidad Nacional de Colombia, 2002.
19. **ASTM.** *Standard test method for Fracture toughness in cemented carbides.* 1994. B-771.
20. **ISRM.** *Suggested Methods for determining the fracture toughness in rocks.* 1987.
21. **Fowell.** *Suggested method for Determining mode I fracture toughness using CCNBD specimens.* s.l. : ISRM, 1995.
22. **Wang.** *Stress intensity factor for CCNBD samples.* s.l. : Elsevier, 2004.
23. **Iqbal, M J.** *Experimental Calibration of stress intensity factors for CCNMD specimens.* s.l. : Journal of Rock Mechanics .
24. **Cabrera,** *Aplicaciones en Mecánica de rocas, 2003*
25. **Rodgeirs, J,** *fracture toughness in soft sandstones. 2001*
www.bereasantstonecores.com
www.gtcs.com
www.ISRM.com

www.ASTM.com

www.pmi.ou.edu

www.wikipedia.com