

ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA EN LA FRACTURA EN ROCAS POR UN MÉTODO INDIRECTO



CRISTIAN SNEIDER MUÑOZ MUÑOZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

2016

**ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA EN LA FRACTURA
EN ROCAS POR UN MÉTODO INDIRECTO**

CRISTIAN SNEIDER MUÑOZ MUÑOZ

Trabajo de grado para optar al título

INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director

ZULY HIMELDA CALDERÓN

PhD. ingeniera de petróleos

Co director

JENNY MABEL CARVAJAL

M.sc. ingeniería de petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Señor Jesucristo por su amor inmensurable y su paz inagotable.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional.

*A la M.sc. Jenny Mabel Carvajal por su ayuda en esta última etapa de mi formación
como profesional.*

*Al ingeniero del ICP Julio Andrés Forero Angarita Forero por su inagotable inventiva y
oportuna solución en los diferentes contratiempos transcurridos a lo largo de la
investigación.*

*A la PhD. Zuly Himelda Calderón Carrillo por su compañía a lo largo de mi formación
profesional.*

En general a mis amigos y allegados por su constante motivación.

Gratitud define lo que sale de mi corazón.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. DESCRIPCIONES DEL PROYECTO	15
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo principal.....	15
1.1.2 Objetivos específicos:	15
1.2 Formulación del problema.....	15
1.2.1 Identificación del problema	15
1.2.2 Justificación para solucionar el problema.....	16
1.2.3 Justificación de la solución.....	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Mecánica de fracturas.....	17
2.2 Modos de fractura.	18
2.3 El balance elástico y energético en las fracturas.	19
2.4 Definición de la resistencia a la fractura.....	25
3. METODOLOGIAS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA FRACTURA (KIC)	27
3.1 Metodologías por tracción para determinar KIC	27
3.1.1 Fisuras bajo tensión uniforme	27
3.1.2 Fisuras bajo tensión distribuida no uniforme:	28
3.1.3 Geometrías experimentales:.....	29
3.2 Metodología por indentación para determinar KIC.....	31
3.2.1 Metodología fractura por indentación (IF):	32
3.3 Metodología por fatiga para determinar KIC.....	33
4. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA OBTENER EL KIC	35
4.1 Hipótesis nula.....	35
4.2 Definición de experimentos	35
4.2.1 Indentación Vickers.....	35
4.3 Identificación de la población.	36
4.4 Modelo experimental	38
4.5 Condiciones de ensayos	39

4.5.1Preparación de muestras.....	39
4.5.2 Especificaciones del ensayo.....	42
4.5.3 Obtención de datos.....	46
4.5.4 Cálculos para determinar parámetros de interés.....	48
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR KIC	50
5.1 Preparación de muestras	50
5.2 Desarrollo del ensayo.....	54
5.2.1 Proceso de indentación	55
5.3 Resultados de los ensayos	59
5.4 Análisis de resultados	67
6. CONCLUSIONES	72
7. RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFIA.....	74

Lista de figuras

Figura 1. Parámetros principales que analiza la mecánica de la fractura. ...	17
Figura 2. Modos de falla.....	18
Figura 3. Placa infinita de unidad y de espesor con una grieta de longitud $2c$ bajo tensión de tracción.	19
Figura 4. Ruta atómica causada por la grieta.....	22
Figura 5. Esquema de fisura bajo tensión uniforme	27
Figura 6. Esquema de fisura bajo tensión.....	28
Figura 7. Esquema flexión 4 puntos.....	29
Figura 8. Esquema flexión biaxial	30
Figura 9. Esquema doble torsión	31
Figura 10. Esquema típico de una indentación	31
Figura 11. Huella indentación Vickers.....	32
Figura 12. Punta Vickers.....	36
Figura 13. Formación La Luna (4).....	37
Figura 14. Formación La Luna (2).....	37
Figura 15. Formación La Luna (3).....	37
Figura 16. Formación Rosa Blanca.....	38
Figura 17. Desbastadora.....	40
Figura 18. Comparador de caratula	41
Figura 19. Pulidora de caras EFG- 450.....	41
Figura 20. Dispositivos para soporte y sujeción de las muestras.....	42
Figura 21. Analizador de texturas y acople punta Vickers	43
Figura 22. Indentador.....	43
Figura 23. Punta Vickers.....	43
Figura 24. Rectificación de la punta Vickers en un patrón de dureza	44
Figura 25. Interface software Exponet	47
Figura 26. Microscopio digital Hirox	47
Figura 27. Estado de entrada muestras Luna 02 al ICP	50
Figura 28. Estado de entrada muestras Luna 02 al ICP	50
Figura 29. Estado de entrada muestras Luna 03 al ICP	51
Figura 30. Estado de entrada muestras Luna 04 al ICP	51
Figura 31. Estado de entrada muestras Rosa Blanca al ICP	51
Figura 32. Muestra Luna 02 en condiciones necesarias para ensayo	53
Figura 33. Muestra Luna 03 en condiciones necesarias para ensayo	53
Figura 34. Muestra Luna 04 en condiciones necesarias para ensayo	53
Figura 35. Muestra Rosa Blanca en condiciones necesarias para ensayo ..	54
Figura 36. Malla aplicada a cada muestra para distribución de ensayos en ella	54
Figura 37. Especificaciones de indentación	55
Figura 38. Grafica generada por una indentación	56

Figura 39. Huella Vickers en muestra Rosa blanca	56
Figura 40. Diagonales en huella Vickers en muestra Luna 3	57
Figura 41. Huella Vickers en muestra Luna 2	57
Figura 42. Area huella Vickers en muestra Luna 4	58
Figura 43. Huella Vickers en una muestra de la formación Luna 2 invalida por presencia de descaramiento.....	59
Figura 44. Huella Vickers en una muestra de la formación Luna 4 invalida por levantamiento.....	60
Figura 45. Relación entre KIC Y E	68
Figura 46. Hv Curva de regresión ajustada.....	69
Figura 47. BI Curva de regresión ajustada.....	70
Figura 48. E Curva de regresión ajustada.....	70

Lista de tablas

Tabla 1. Información geologica de las muestras.	38
Tabla 2. Modelo experimental de número de ensayos	39
Tabla 3. Diseño experimental para las condiciones de indentación	45
Tabla 4. Diseño experimental para las condiciones de indentación con un solo parámetro de variación	45
Tabla 5 Calculo de la diagonal de indentación	46
Tabla 6. Descripción de muestras después de pasar por el proceso de corte	52
Tabla 7. Longitud de grietas en una muestra de la formación Luna 2	58
Tabla 8. Resultados de parámetros y KIC de los ensayos validos	61
Tabla 9. Resumen relación multivariable de los parámetros de estudio.....	68

RESUMEN

TÍTULO: Estimación experimental de la resistencia a la fractura en rocas por un método indirecto.*

AUTOR: Cristian Sneider Muñoz Muñoz.**

PALABRAS CLAVES: resistencia a la fractura, fracturamiento, yacimiento no convencional, indentación por fractura grietas, indentación Vickers.

DESCRIPCIÓN: En el mundo actual, la industria de los hidrocarburos ve en el desarrollo de nuevas tecnologías, para la explotación de yacimientos no convencionales, una solución a la demanda energética mundial; en este sentido, las características geomecánicas pueden llegar a tener importancia significativa para su modelamiento y entre estas se destaca la resistencia a la fractura la cual se describe en su forma abreviada como "KIC" y significa coeficiente de la resistencia a la fractura este es un parámetro relevante para la extracción de crudos no convencionales, así como en el análisis petrofísicos de los sistemas fracturados y en los procesos de estimulación de pozos.

Con el propósito de analizar el comportamiento de las fracturas en cada uno de los procesos en los que se ven involucradas las rocas, este proyecto pretende seleccionar un proceso metodológico práctico, rápido, económico y fácil de implementar, para calcular KIC; considerando que su determinación a través de métodos tradicionales puede ser ardua, se propone una ruta alternativa llamada fractura por indentación (IF) la cual ha sido ampliamente aceptada y estudiada por diferentes autores entre estos, Weisbrod & Rittel (2000), Plaza(2003), Evans & Charles(1976), Niihara et al.,(1982).

El ensayo IF aporta información valiosa de la muestra evaluada y no la destruye; dicho ensayo se basa en una prueba por penetración llamada indentación Vickers mediante el cual se obtiene unas grietas en la muestra de estudio y aplicando una relación matemática finalmente se obtiene el KIC.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director Ph. D. Zuly Himelda Calderon Carrillo co director Jenny Mabel Carvajal Jimenez.

ABSTRACT

TITLE: Experimental estimation of the resistance to fracture rocks by an indirect method.*

AUTHOR: Cristian Sneider Muñoz Muñoz.**

KEYWORDS: resistance to fracture, fracturing, unconventional reservoir, fracture indentation cracks, Vickers indentation.

DESCRIPTION: In today's world, the oil and gas industry sees in the development of new technologies for the exploitation of unconventional reservoirs, a solution to the global energy demand; In this sense, the geomechanical features can have significant importance for modeling and between the fracture toughness which is described in its abbreviated form as "KIC" stands out and means coefficient of resistance to fracture this is a extracting relevant for raw parameter unconventional and the petrophysical analysis of fractured systems and processes well stimulation.

In order to analyze the behavior of fractures in each of the processes that are involved rocks, this project aims to select a practical, fast, economical and easy to implement, to calculate KIC methodological process; whereas its determination through traditional methods can be arduous, a route alternative called fracture indentation (IF) which has been widely accepted and studied by different authors among them, Weisbrod & Rittel (2000), Plaza (2003) proposed Evans & Charles (1976), Niihara et al., (1982).

The IF test provides valuable information for the evaluated sample and does not destroy it; this test is based on a penetration test called Vickers indentation by which a crack is obtained in the study sample and applying a mathematical relationship finally KIC is obtained.

* Draft Grade

** Faculty of Physical and Chemical engineering. Petroleum engineering school. Director Ph . D. Zuly Calderon Carrillo Himelda co-director Mabel Jenny Jimenez Carvajal.

INTRODUCCIÓN

En el mundo actual, la industria de los hidrocarburos demanda alternativas de costo eficientes y rápidas para la caracterización mecánica de las litologías del subsuelo, Los conceptos relacionados específicamente con la mecánica de fractura han generado una creciente atención en los últimos años, entre estas se destaca la resistencia a la fractura la cual se describe en su forma abreviada como “KIC” y significa coeficiente de la resistencia a la fractura este es un parámetro relevante para la extracción de crudos no convencionales, así como en el análisis petrofísicos de los sistemas fracturados y en los procesos de estimulación de pozos.

Con el propósito de analizar el comportamiento de las fracturas en cada uno de los procesos en los que se ven involucradas las rocas, este proyecto pretende seleccionar un proceso metodológico práctico, rápido, económico y fácil de implementar, para calcular KIC; considerando que su determinación a través de métodos tradicionales puede ser ardua, se propone una ruta alternativa llamada fractura por indentación (IF) que ha sido ampliamente aceptada y estudiada. Diversos autores han propuesto ecuaciones basados en la teoría mecánica de la fractura lineal para determinar KIC por medio del método IF tal como se describe en: Weisbrod & Rittel (2000), Plaza (2003) Evans & Charles (1976) Niihara et al., (1982).

El ensayo IF aporta información valiosa de la muestra evaluada y no la destruye; se basa en una prueba por penetración llamada indentación Vickers el cual permite obtener unas grietas en la muestra de estudio y aplicando una relación matemática finalmente se obtiene KIC.

Con el fin de afinar los parámetros de los experimentos a realizar, se consideraron como guías las especificaciones técnicas de las normas ASTM, ISRM, manuales de los fabricantes de los equipos, artículos relacionados al tema, los cuales son referenciados al final del documento en la bibliografía.

Los cambios en la muestra pueden afectar los resultados de KIC aumentando la dispersión de éstos. Este comportamiento en los datos es observable en las rocas, debido a su heterogeneidad, anisotropía, competencia, cambios en el grado de compactación y cementación, presencia de grietas, fracturas, laminaciones o inclusiones de minerales de diferente dureza dentro de su estructura.

Las razones mencionadas anteriormente, sugieren la necesidad de llevar cabo un registro fotográfico detallado del área a ensayar en cada muestra y así poder seleccionar las zonas libres de fracturas, grietas y demás anomalías que pudiesen intervenir en el resultado.

El análisis de los resultados de las pruebas incluye la relación del parámetro KIC con otros parámetros de interés en el estudio de la mecánica de las fracturas, el análisis de las desviaciones presentadas y la recopilación de las lecciones aprendidas durante todo el proceso de investigación.

1. DESCRIPCIONES DEL PROYECTO

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

Estimar experimentalmente la resistencia a la fractura en rocas por un método indirecto

1.1.2 Objetivos específicos:

- Determinar los parámetros que caracterizan la resistencia a la fractura en rocas.
- Identificar la metodología más adecuada para evaluar la resistencia a la fractura en rocas.
- Realizar el diseño experimental para la determinación de la resistencia a la fractura en rocas.
- Evaluar la resistencia a la fractura en distintos tipos de roca.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Identificación del problema

El laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) es un ente de investigación y desarrollo de ECOPETROL que ayuda a entender el comportamiento geomecánico de las formaciones geológicas en Colombia, realizando ensayos de caracterización geomecánica tales como: pruebas uniaxiales, triaxiales, acústicos, de indentación, tensión indirecta, desplazamiento de fluidos en medios porosos y de interacción mecánica entre otros. Para esto, de manera continua desarrolla e implementa nuevas tecnologías y técnicas de laboratorio que contribuyen a la caracterización y estudio geomecánico de las formaciones naturales en Colombia, todo ello con el fin de reducir los costos de explotación de hidrocarburos y mejorar la productividad de los yacimientos.

Con el propósito de continuar con su crecimiento tecnológico, el laboratorio de mecánica de rocas busca desarrollar nuevas pruebas para caracterizar formaciones no convencionales “*shales plays*” de manera natural en formaciones colombianas como las ubicadas en la cuenca del “*Valle del Magdalena Medio*”, las cuales han sido históricamente de interés y especialmente en la actualidad, debido al desarrollo de nuevas tecnologías, con las cuales es posible extraer el hidrocarburo presente en este tipo de yacimientos pero para lo cual es necesario proponer otras iniciativas de estudios detallados sencillos, económicos y aplicables con las muestras disponibles, para obtener diferentes parámetros geomecánicos entre estos la resistencia a la fractura “KIC”.

Evidenciada esta necesidad al interior del laboratorio de mecánica de rocas, se plantea el siguiente problema a solucionar: Estimar en dicho laboratorio la resistencia a la fractura en rocas partir de un método indirecto.

1.2.2 Justificación para solucionar el problema

Con el objetivo de contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander, de atender las necesidades y fortalecer las relaciones existentes con el sector industrial, este trabajo de grado pretende dar soporte científico y tecnológico en el desarrollo de nuevas pruebas de caracterización geomecánica para el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo.

La necesidad de desarrollar una metodología alternativa para calcular el KIC se debe a que los métodos reportados en la literatura presentan cierto nivel de complejidad tanto en el montaje como en la preparación de las muestras y no son repetibles, porque estos representan ensayos destructivos.

1.2.3 Justificación de la solución

Con este trabajo de grado, se busca diseñar y desarrollar una metodología para determinar KIC en las rocas colombianas en especial los shales, con el propósito de mejorar el estudio y caracterización de yacimientos no convencionales.

2. MARCO TEÓRICO

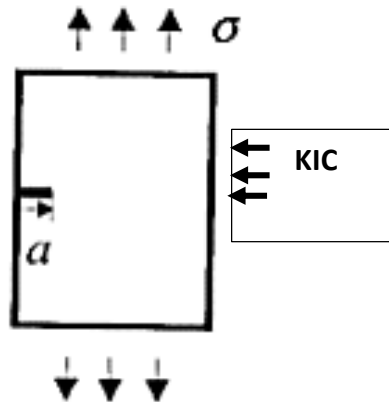
2.1 Mecánica de fracturas.

Mecánica de la fractura es el área que estudia la expansión de las grietas en los materiales, así como la distribución de tracciones y deformaciones que ocurren en un material quebrado o con discontinuidades, sometido a cierta tracción externa. Una fractura se puede definir como el punto donde termina el proceso de deformación plástica; en general se expresa como la división o separación de un material sólido en varias partes, bajo la acción de un esfuerzo o carga donde la fractura se manifiesta por la condición en que trascienda una fisura.

La razón definitiva por la que una pieza o estructura falla no es por la superación de un límite elástico en un punto o región, sino por la aparición y transmisión de grietas, lo que conllevan a la fragmentación y pérdida completa de su capacidad resistente¹.

La mecánica de la fractura elástico lineal nació con los estudios de Griffith en 1921 en su obra “El fenómeno de ruptura y el flujo de sólidos”. Su objetivo primordial es establecer las combinaciones críticas de tres variables relativas a un componente o estructura: la tensión aplicada (σ), el tamaño de los defectos que contiene (a) y la tenacidad de fractura del material (KIC)².

Figura 1. Parámetros principales que analiza la mecánica de la fractura.



Fuente: MEHRAN hoseni, On the Linear Elastic Fracture Mechanics Application in Barnett Shale Hydraulic Fracturing en: society of petroleum engineers SPE production & operation. July 1991.

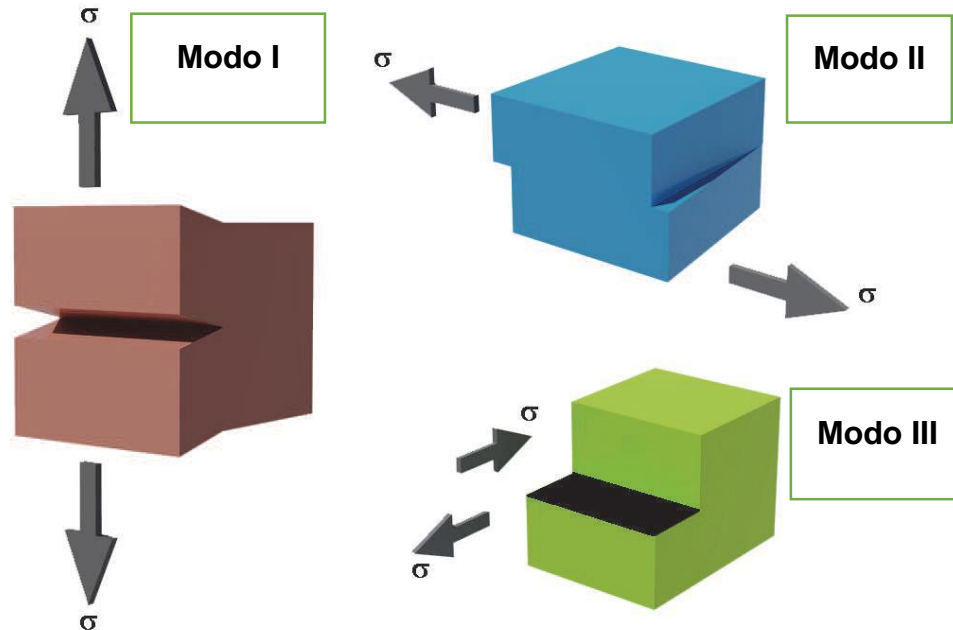
¹ FJAER, ELVHES. Petroleum Related Rock Mechanics. En: revista DEVELOPMENTS IN PETROLEUM SCIENCE No. 5 Noviembre de 1996 13-15p.

² PALENCIA, Miguel. diseño y construcción de un banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura para el laboratorio de mecánica de rocas del instituto colombiano del petróleo. Bucaramanga, 2009, 169h. Trabajo de grado (ingeniero mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánica.

2.2 Modos de fractura.

Diferentes distribuciones de carga en las estrías de la grieta producen distintos modos de desplazamiento superficiales sobre las mismas. Existen tres modos básicos de desplazamiento de las caras de una grieta cuando es sometida a tensiones, a continuación se describirán los tres modos:

Figura 2. Modos de falla.



Fuente: ROCHA, Enrique. Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture: Cracking modes and the concept of fracture toughness (KIC) En: ingenierías. Mayo de 2008. 2p.

a) Modo I o de abertura: donde la expansión de fractura separa la roca en dos zonas.

b) Modo II o de deslizamiento: la manera del desarrollo de la grieta se provoca porque una parte de la roca se resbala sobre la otra.

c) Modo III o de desgarre: suceden dos procesos, separación y deslizamiento de una parte de la roca sobre la otra.³

³ AMOROCHO, CLAUDIA. proceso metodológico para la determinación de tenacidad de fractura en areniscas. Bucaramanga, 2008, 148 h. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander Facultad Físicoquímica.

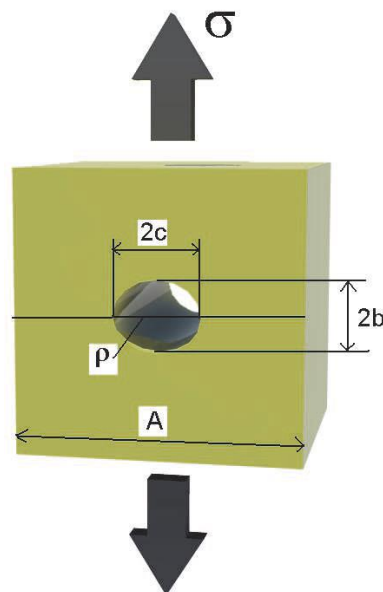
Dependiendo del modo de falla, la resistencia a la fractura varia, por lo cual se debe evaluar por separado cada caso KIC, KIIC y KIIC. Por facilidad en esta tesis se utilizara el modo de falla I

2.3 El balance elástico y energético en las fracturas.

En general se considera que Griffith (1921) con su obra: "El fenómenos de ruptura y el flujo de sólidos ", fue el primero que introdujo un enfoque científico a las fracturas en los sólidos. Razon por la cual la teoría de la mecánica de la fractura elástico lineal comenzó a desarrollarse desde ese momento. Griffith permitió con sus estudios obtener un amplio criterio para predecir el agrietamiento, demostrando que este fenómeno es generalizable a muchos tipos de materiales y esto hace que parte de sus estudios continuen vigentes⁴.

Con el fin de entender el funcionamiento es pertinente considerar una placa infinita de unidad de espesor con una grieta de longitud $2c$ se somete a un tensión como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Placa infinita de unidad y de espesor con una grieta de longitud $2c$ bajo tensión de tracción.



Fuente: ROCHA, Enrique. Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture: Cracking modes and the concept of fracture toughness (KIC) En: ingenierías. Mayo de 2008. 2p.

⁴ FJAER, ELVHES Op.cit.,p.4

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

$$U = \frac{\pi \sigma^2 c^2}{E} \quad (2.1)$$

Y definió la energía de superficie (W) como:

$$W = 4c * \gamma s \quad (2.2)$$

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

Cuando la grieta se conduce a incrementar su longitud, entra en un estado de equilibrio débil, bajo las tracciones aplicadas y el sistema mecánico transfiere energía de la zona no fracturada a la fractura, a través de un proceso de transformación de energía elástica en energía de superficie. Esta equivalencia de energía se puede expresar matemáticamente como⁵:

$$\frac{\delta U}{\delta c} = \frac{\delta W}{\delta c} \quad (2.3)$$

Como se expone posteriormente mediante balance de energía, el término $\delta U/\delta c$ manifiesta implícitamente una reducción en la energía elástica acumulada por la placa, debida a la amplificación de la grieta y por tal razón en la ecuación anterior no se considera un signo menos en la igualdad.

Derivando (1.1) y (1.2) con respecto a la longitud de grieta se tiene:

$$\frac{\delta U}{\delta c} = \frac{2\pi\sigma c}{E} \quad (2.4)$$

$$\frac{\delta W}{\delta c} = 4\gamma s \quad (2.5)$$

⁵ ROCHA, Enrique. Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture: Cracking modes and the concept of fracture toughness (KIC) En: ingenierías. Mayo de 2008. 1-3p.

Sustituyendo en la ecuación (1.3) se logra despejar la tracción σ_c , que en este caso corresponde a una tracción para la cual se inicia la prolongación de la grieta la cual se conoce como tracción de fractura de Griffith σ_c :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi c}} \quad (2.6)$$

De modo general, se puede decir que de acuerdo con el criterio de Griffith para que una grieta se extienda una longitud δc , es necesario que la energía elástica liberada por tal dilación; sea igual o mayor a la energía de superficie que se demanda para que la grieta se prolongue. Si la energía liberada es inferior a la energía necesaria para la expansión, entonces la grieta permanecerá estable⁶.

Las indagaciones de Griffith hicieron dos contribuciones fundamentales para sentar las bases de la mecánica de fractura: en primer lugar presentan un modelo racional del criterio de evolución de una grieta y demuestran que la fractura resulta de un proceso de transformación de energía, que no depende exclusivamente de la tracción aplicada, sino también de la dimensión misma de la grieta y en segundo lugar, mediante la ecuación (1.6) se obtiene una analogía entre tracción de fractura y tamaño de grieta que ha sido comprobada repetidamente en materiales frágiles⁷.

Griffith observó empíricamente que las pequeñas fallas tenían una influencia destructiva en los materiales, mucho más complicada de lo que se suponía, por ello fue necesario desarrollar en esta tesis un balance de energía con las siguientes variables:

U = Energía total del sistema.

UO= Energía elástica de la placa sin fisuras con las fuerzas aplicadas (constante).

EU= Energía elástica en el momento de la apertura de la grieta.

W= Trabajo ejercido por las fuerzas externas.

US= Energía asociada con la resistencia del material a la creación de nuevas superficies⁸.

Donde:

$$U = UO + EU - W - US \quad (2.7)$$

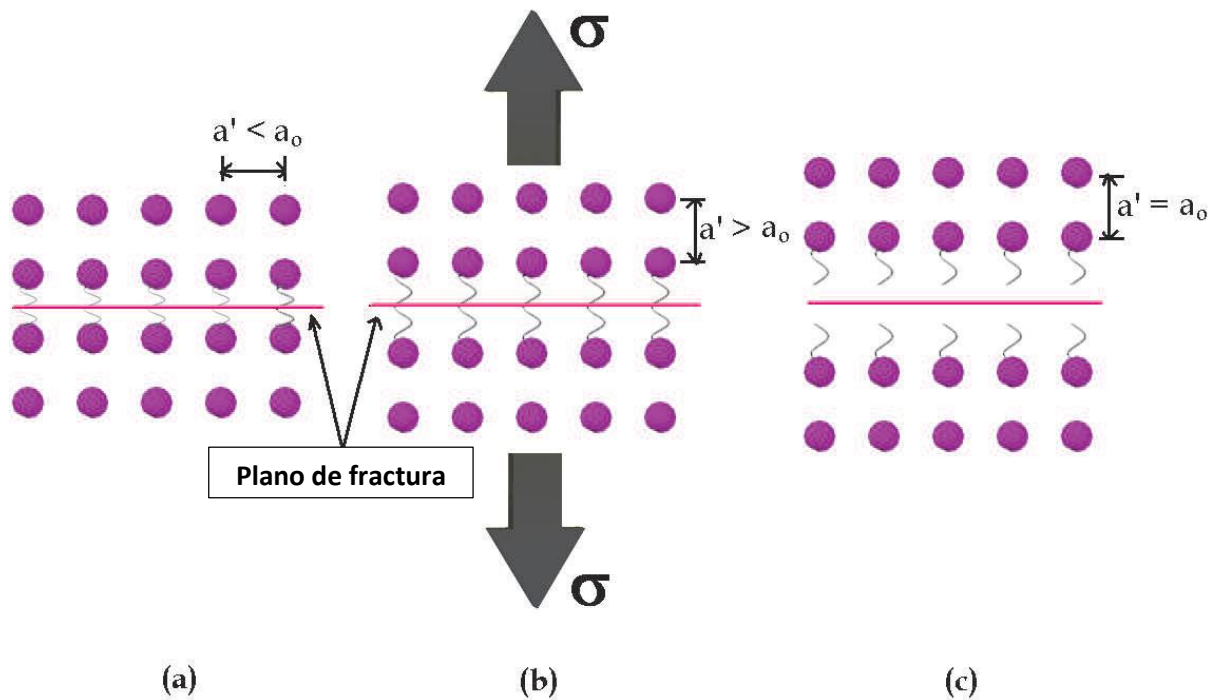
⁶ Ibid., p.7.

⁷ Ibid., p.8.

⁸ Ibid., p.9.

Los parámetros W y EU están asociados entre sí, ya que ambos promueven la formación y propagación de la grieta, mientras que US representa la "resistencia" del material a la creación de nuevas superficies, tales como las generadas por las grietas. Inglis (1935) propone una solución a la ecuación de Griffith aplicando suposición atómica causada por la grieta, que se espera en materiales frágiles, tales como cerámica. Este balance de energía puede comprenderse mejor si se analiza un modelo de oscilador armónico (a_0 es la separación atómica), una vez que los resortes han colapsado debido a la alta tensión normal de la grieta, esta se propaga en un plano perpendicular como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Ruta atómica causada por la grieta.



Fuente: ROCHA, Enrique. Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture: Cracking modes and the concept of fracture toughness (KIC) En: ingenierías. Mayo de 2008.

Ecuación de estado de Griffith:

$$U - W = \frac{\pi \sigma^2 c^2}{E} \quad (2.8)$$

Si se trata de considerar esta "capacidad elástica" $U - W$ del material por unidad de área δc de las grietas generadas, se puede definir una magnitud denominada "liberación de energía" G .

$$G = \frac{\delta(U_E - W)}{\delta C} = \frac{\delta(U_E - W)}{2\delta c} \quad (2.9)$$

Donde se supone una profundidad unitaria de la grieta y una longitud δc . El número 2 es porque hay dos superficies creadas por la grieta. El término "G" significa la energía suministrada por unidad de área como la liberación de energía del cuerpo de crear nuevas superficies (aquellas de las grietas). Se requiere un suministro continuo de energía en el cuerpo para continuar la propagación de una grieta una vez inicia el desarrollo de esta. De las partes del cuerpo con cargas más pequeñas viene el suministro de energía, aunque la principal contribución es del área de concentración de esfuerzos que causan el aumento local de la tensión.

Hasta hace algunos años, G fue el parámetro utilizado para medir la "tenacidad" y pero posteriormente fue sustituido por K, la "Intensidad del esfuerzo". G se puede considerar (dimensionalmente) como una fuerza suministrado por el cuerpo por unidad de longitud de la grieta, o la tasa de liberación de energía.

Combinando las ecuaciones (1.8) y (1.9) se obtiene⁹:

$$G = -\frac{\pi \sigma^2 C}{E} \quad (2.10)$$

Dónde:

σ = esfuerzo de flexión del material.

C = Semi Eje de la grieta (que se supone elíptica) en la dirección perpendicular a la tensión

E = Módulo de elasticidad

La ecuación (1.10) se constituye una forma universal para expresar el comportamiento de agrietamiento de Griffith y tiene la ventaja que no involucra la energía específica de superficie (γ_s).

Por lo cual, 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 $da \approx 0$, posible extensión cuasi-estática de grieta

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

Donde G_{IC} se define como la tasa crítica de liberación de energía en una muestra y G es la tasa de liberación de energía.

⁹Ibid., p.11.

Griffith diseñó el criterio de longitud de grieta apoyado en un análisis de balance de energía para evitar el problema de la heterogeneidad en la punta, donde de acuerdo con la solución elástica, las tracciones tienden a infinito al aplicarse cualquier carga externa. Posteriormente Irwin (1935) desarrolló uno de los más trascendentales progresos de la mecánica de fracturas elástica lineal, al expresar el problema de longitud de grietas, en términos del estado de tracciones del material cerca de la punta, probando que esta orientación es en esencia igual a la orientación energética y que existe relación entre las fracturas y la orientación de la energía¹⁰.

Irwin (1935) indujo que el fenómeno 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 la consecuencia de la deformación, absorbe gran cantidad de energía y conserva las tracciones dentro de un valor finito.

Con el fin de establecer la distribución de tracciones alrededor de la punta de la grieta, en una placa como la ilustrada en la Figura 3, Irwin (1935) acudió a la función de tracción de Airy (1935) (φ), que es una función especial y que en este caso debe integrar simultáneamente las condiciones particulares de tracciones, deformaciones y de compatibilidad de tensión-deformación que se presentan en la zona de liberación de energía en la roca.

Para la solución de la función de tensión de Airy se pueden usar diferentes funciones complejas. Si el agrietamiento es del modo I, resulta útil usar la solución propuesta por Westergaard (1938), en cuyo caso el campo de tracciones alrededor de la punta, está dado de manera general por:

$$\sigma_{ij} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\varphi) \quad (2.11)$$

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

$$KI = \beta\sigma\sqrt{c} \quad (2.12)$$

Donde c 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:

$$KI = \sigma\sqrt{\pi c} \quad (2.13)$$

La importancia del factor de intensidad de tracciones yace en que al conocerse KI, se puede determinar totalmente el campo de tensiones

¹⁰ YAGIZ, Saffet. Factors influencing performance of hard rock tunnel boring machines en: American Rock Mechanics Association 12-270. Abril de 2010. 3-4p.

alrededor de una grieta. Además K_I compone un parámetro de aproximación 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 grietas diferentes, tienen una misma K_I y están sometidas al mismo modo de agrietamiento, se debe esperar un resultado similar en cuanto al avance o estabilidad de la grieta, debido a que el campo de tracciones 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 la resistencia a la fractura¹¹.

De manera similar al enfoque de tasa de liberación de energía, propuesto por Irwin (1935) en relación con 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)

Donde la K_{IC} se conoce como la resistencia a la fractura y K_I intensidad de la resistencia a la fractura.

En numerosos materiales, tales como los metales, las propiedades de estabilidad del material relacionadas con las fracturas 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 la K_{IC} como propiedad del material, es necesario identificar las condiciones particulares para las cuales este valor es representativo.

2.4 Definición de la resistencia a la fractura

La resistencia a la fractura es definida como la propiedad que describe la habilidad de un material de resistirse a la formación de una fractura a medida que se va aplicando una carga.

La resistencia a la 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 la fractura.

¹¹ Ibid., p. 2.

Esta definición viene del concepto del factor de intensidad de esfuerzo desarrollado en la mecánica elástico-lineal de fractura. Los componentes de intensidad de esfuerzo son una medida de la particularidad 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 representado por una propiedad específica. “el factor de intensidad de esfuerzo crítico” K_{IC} o resistencia a la fractura. De tal manera que la fractura no se propaga ($K_I < K_{IC}$) o se propaga de tal manera que $K_I = K_{IC}$ condición que 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 el valor de K permanece por debajo del valor de K_{IC} , y la falla o fragmentación se alcanzará si K_{IC} es superada.

3. METODOLOGIAS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA FRACTURA (KIC)

A lo largo de la historia diferentes métodos se han diseñado con el objetivo de determinar la KIC de un material. Actualmente estos ensayos se clasifican en tres maneras:

Por tracción, fatiga e indentación.

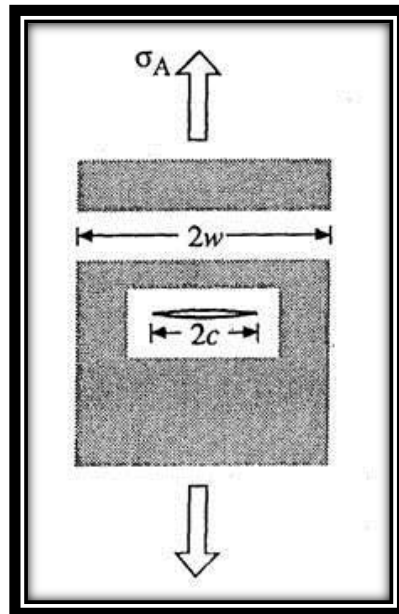
3.1 Metodologías por tracción para determinar KIC

De este tipo de metodologías se obtiene la KIC de forma directa sin correlaciones y permite encontrar una cantidad representativa de ensayos a continuación se nombran algunas de las más relevantes.

3.1.1 Fisuras bajo tensión uniforme

En este caso, el factor de intensidad de tensiones toma siempre la misma forma funcional, independientemente del modo de fractura y tracción; se aplica de manera constante y uniformemente distribuida¹².

Figura 5. Esquema de fisura bajo tensión uniforme



Fuente: YAGIZ, Saffet. Factors influencing performance of hard rock tunnel boring machines en: American Rock Mechanics Association 12-270. Abril de 2010. 3-4p.

La siguiente ecuación permite calcular la resistencia a la fractura de forma directa a partir de la aplicación de una carga sobre el material de ensayo.

¹² Ibid., p. 2.

$$KIC = \varphi \sigma c^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

φ Es un valor que depende de la geometría de la fisura

c Es el área de impacto del ensayo

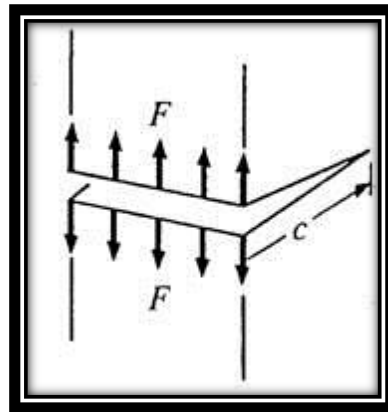
3.1.2 Fisuras bajo tensión distribuida no uniforme:

Cuando sobre la fisura en un medio infinito actúa una distribución de tensiones normales no uniforme, la resistencia a la fractura puede calcularse a partir de la expresión¹³:

$$KIC = \frac{2\alpha P}{(\pi c)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.2)$$

Donde α es un factor que depende de la geometría de la fisura y P es la carga aplicada

Figura 6. Esquema de fisura bajo tensión



Fuente: YAGIZ, Saffet. Factors influencing performance of hard rock tunnel boring machines en: American Rock Mechanics Association 12-270. Abril de 2010. 4-5p.

En caso anterior se presentó el valor de la KIC para una carga aplicada no uniforme ahora de forma análoga para el caso de una carga puntual sobre una fisura se obtiene:

¹³ Ibid., p. 3.

$$KIC = \frac{2\alpha P}{\pi c^{3/2}} \quad (3.3)$$

En ambos casos el parámetro α aparece es un factor de corrección de borde similar al que aparece en el caso de fisuras bajo tensión uniforme.

3.1.3 Geometrías experimentales:

Otras geometrías de interés práctico para calcular la KIC son las que se utilizan en los diferentes ensayos mecánicos, habitualmente realizados para estudiar fenómenos de fractura:

- **Flexión en 4 puntos:**

En este ensayo, entre los dos cilindros interiores la tensión de tracción se considera constante como lo muestra la figura 7 y se puede suponer que existe una fisura recta, bien porque se haya diseñado así introducido o por los defectos preexistentes en la muestra tienen esa configuración. Entonces, si $c \ll d$, se puede utilizar la expresión¹⁴:

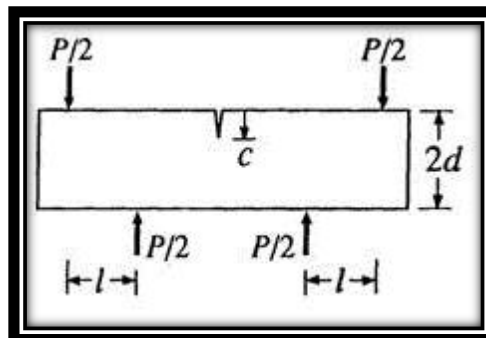
$$KIC = \varphi \sigma c^{1/2} \quad (3.4)$$

Sabiendo que φ y σ significan respectivamente

$$\varphi = \alpha \pi^{1/2} \quad (3.5)$$

$$\sigma = \frac{3Pl}{4wd^2} \quad (3.6)$$

Figura 7. Esquema flexion 4 puntos



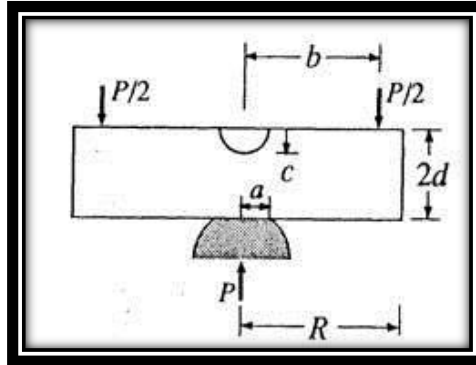
Fuente: AMOROCHO, CLAUDIA. Proceso metodológico para la determinación de tenacidad de fractura en areniscas. Bucaramanga, 2008, 148 h. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander Facultad Fisicoquímica.

¹⁴ Ibid., p. 4.

- **Flexión biaxial:**

En este tipo de ensayo la tensión de tracción es de nuevo uniforme en el centro de la muestra (figura 8)¹⁵.

Figura 8. Esquema flexión biaxial



En este caso la resistencia a la fractura viene dada por:

$$KIC = \frac{3Pl}{16\pi d^2} \left[(1 + \nu) \left(2 \ln \frac{b}{a} + 1 \right) + (1 - \nu) \left(\frac{2b^2 - a^2}{2R^2} \right) \right] \quad (3.7)$$

Donde:

l Es la longitud de la grieta

ν Es la velocidad de impacto

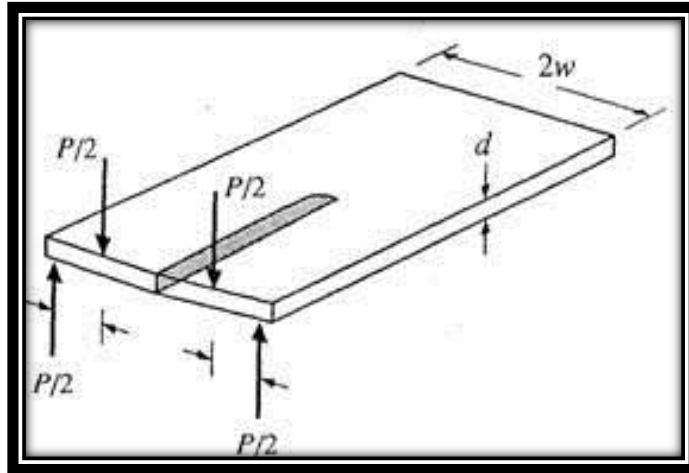
- **Doble torsión:**

Este experimento (figura 9) es interesante porque permite obtener un factor de intensidad de tensiones independiente del tamaño de fisura, c , para una configuración a carga constante que es más fácil de conseguir experimentalmente que un momento constante. En concreto, se obtiene:

$$KIC = \sqrt{12(1 + \nu)} * \frac{Pw_0}{w^{0.5}d^2} \quad (3.8)$$

¹⁵ Ibid., p. 4.

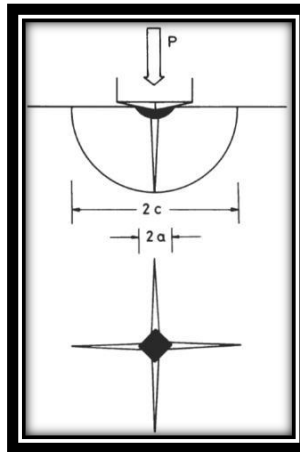
Figura 9. Esquema doble torsión



3.2 Metodología por indentación para determinar KIC

Es posible calcular de forma simple la resistencia a la fractura de materiales frágiles, a partir de la medida de la longitud de las fisuras generadas en un ensayo de indentación (figura 10). Estas fisuras surgen, durante los ensayos de indentación con impresores puntiagudos (Vickers, Berkovich, Knoop, entre otros) en materiales frágiles debido a las fuertes tensiones generadas en las aristas de las pirámides de diamante presentes en las indentaciones. Los factores de intensidad de tensiones en este tipo de ensayos se pueden calcular directamente del ensayo, a partir de ellos, es posible estimar la resistencia a la fractura del material¹⁶.

Figura 10. Esquema típico de una indentación



Fuente: YAGIZ, Saffet. Factors influencing performance of hard rock tunnel boring machines en: American Rock Mechanics Association 12-270. Abril de 2010. 4-5p.

¹⁶ Ibid., p. 5.

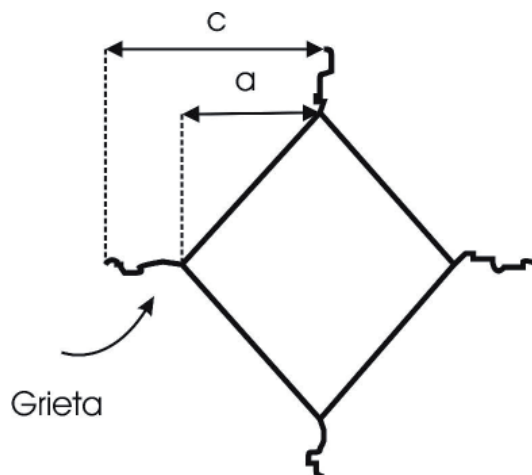
3.2.1 Metodología fractura por indentación (IF):

Este es una metodología particularmente atractiva por su sencillez para evaluaciones rutinarias de ingeniería de materiales. Sin embargo, ha sido algo cuestionada, debido a que las ecuaciones producto del modelamiento involucran constantes de calibración que conllevan a errores sistemáticos y a otros errores que surgen de las imprecisiones, propias de las mediciones necesarias en el ensayo. A pesar de esto y de que la metodología no ha sido normalizada, sigue siendo ampliamente utilizada por su facilidad de aplicación.

Aunque, la metodología IF sólo puede medir aproximaciones de los valores de la KIC, es conveniente para evaluaciones de muchos materiales de ingeniería. Esta metodología está basada en ensayos estándares de dureza. La medida de la dureza Vickers necesaria para obtener la KIC está regulada por las normas ASTM C 1327-99, lo que hace más confiable el resultado obtenido. El ensayo es relativamente simple de realizar, ya que requiere únicamente de un durómetro estándar, un microscopio óptico y una pieza pequeña de material con una superficie libre de esfuerzos y grietas como muestra de ensayo es suficiente¹⁷.

La metodología de fractura por indentación, derivado del procedimiento experimental que comúnmente se sigue en las pruebas de dureza consiste en relacionar las longitudes de las grietas mostradas en la figura 11, que crecen en las esquinas de la indentación Vickers cuando se aplica una carga (P), con la tenacidad del material.

Figura 11 Huella indentación Vickers



Fuente: ROCHA, Enrique. Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture: Cracking modes and the concept of fracture toughness (KIC) En: ingenierías. Mayo de 2008. 2-3p.

¹⁷ ROCHA, Enrique. Op. cit., p. 5

Para calcular la KIC por esta metodología se han desarrollado diferentes de ecuaciones, algunas de las cuales requieren los valores de los módulos de Young y Poisson para su utilización, además de los resultados del ensayo de dureza; estas ecuaciones se dividen en dos grupos: empíricas y experimentales, una de las más usadas entre las empíricas es la ecuación (2.9) propuesta por Evans; mientras que la ecuación (2.10) propuesta por Niihara, es de las experimentales más utilizadas ya que genera resultados con menor error y grado de incertidumbre, dado que fue desarrollada a partir de pruebas de laboratorio.¹⁸

$$KIC = 0.116(c/a)^{-1.5}(Ha^{0.5}) \quad (3.9)$$

$$KIC = 0.0298H\sqrt{a}(E/H)^{0.5}(c/a^{-1.38}) \quad (3.10)$$

Además:

$$H = 1.8 \frac{P}{a^2} \quad (3.11)$$

Donde:

KIC = Resistencia a la fractura (MPa•m^{1/2})

H = Dureza Vickers (MPa)

E = Módulo de Young (MPa)

P = Carga de prueba en durómetro Vickers (MPa)

c = Longitud media de las grietas obtenidas en las puntas de la huella Vickers (micras)

a = Longitud media de la mitad de la diagonal de la huella Vickers (micras)

3.3 Metodología por fatiga para determinar KIC

La fatiga mecánica es un fenómeno que tiene lugar en materiales sometidos a tensiones dinámicas y fluctuantes, es decir, a múltiples ciclos de carga-descarga. Este fenómeno conduce a la aparición de fisuras y finalmente al fallo de la pieza, aunque las tensiones aplicadas sean siempre inferiores a la resistencia a la tracción, e incluso al límite elástico del material. De hecho, este fenómeno es la primera causa de rotura en materiales. El 90% de los metales que se rompen en servicio lo hacen por este motivo.¹⁹

Para determinar la susceptibilidad de un material a la fatiga se obtienen, generalmente mediante ensayos de flexión-rotación, curvas S-N que representan en escala logarítmica la amplitud de los ciclos de tensión

¹⁸ Ibid., p. 5.

¹⁹ FJAER, ELVHES Op.cit.,p.5

aplicados, S , frente al número de ciclos de carga-descarga, N . Para algunos materiales existe un límite de tensión aplicada por debajo del cual el material no sufre fractura por fatiga. A esa tensión se le denomina **límite de fatiga** o **resistencia a la fatiga**. En aceros la resistencia a la fatiga es un 35-60% de la resistencia a tracción. Sin embargo, en otros muchos materiales ese límite es cero, es decir, incluso a tensiones muy bajas puede producirse rotura N . En estos materiales se define la **resistencia a fatiga para N ciclos** (por ejemplo la resistencia a fatiga para un millón de ciclos, $N=10^6$) o, alternativamente, la **vida a fatiga para una tensión S** determinada, N_f , como el número de ciclos necesarios para producir la rotura a dicha tensión.²⁰

La contribución al cálculo de la KIC por medio de este método, la fatiga que ocurre en la última etapa es despreciable, por lo tanto, puede considerarse que depende exclusivamente de los periodos de iniciación, N_i , y propagación de la grieta, N_p .²¹

$$N_f = N_i + N_p \quad (3.12)$$

²⁰ Ibid., p. 8.

²¹ Ibid., p. 9.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA OBTENER EL KIC

En este capítulo se desarrolla toda la parte del diseño de cada uno de los experimentos necesarios para calcular la KIC dentro de este, se tendrá en cuenta todo el modelo experimental partiendo por la hipótesis necesaria para conceptualizar la KIC en el estudio de la mecánica de la fractura lineal y su relación con otros parámetros.

4.1 Hipótesis nula

No existe ninguna relación entre los parámetros **KIC**, **E**, **BI** y **HV**

Donde:

KIC= Es la resistencia a la fractura.

E= Es el módulo de Young.

BI= Es el Índice de fragilidad.

HV= Es el Numero de dureza Vickers.

4.2 Definición de experimentos

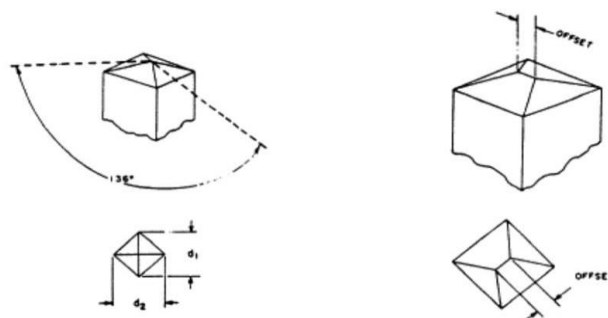
Se va a desarrollar un experimento que permita aprobar o reprobar la hipótesis planteada, este experimento es la indentación Vickers.

4.2.1 Indentación Vickers.

Este método mide la dureza a la penetración de la muestra y se define como una indentación clásica con una punta especial que cumple una geometría específica; en términos generales, se puede considerar que este ensayo es relativamente simple consta de un durómetro estándar con una punta especial llamada Vickers cuya característica estándar dice que es una base cuadrada cuyo ángulo entre caras es de 136° y un microscopio óptico para este experimento se usó el microscopio digital Hirox, una pieza pequeña de material bajo las especificaciones de preparación de la norma es suficiente. El método sin embargo no es apropiado para materiales con valores de KIC por debajo de $1MPa * m^{0.5}$ y tamaño de grano grande²².

²² American Society for Testing Materials , Estándar Test Method for Fracture Toughness at Room Temperature of advanced Ceramics, ASTM C1327-99. 37h.

Figura 12. Punta Vickers



Fuente: American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. ASTM E 384-11. 18h.

Para una indentación Vickers, si una diagonal es más larga que cualquiera de las otras en una escala de 1-1/2, o si las cuatro esquinas de la muesca no son en foco, la superficie de ensayo puede no ser perpendicular al eje de indentador. Compruebe la alineación de la muestra y realice otra prueba. La grieta que supere el límite en $\frac{1}{2}$ a cualquier otra de las grietas hay que señalar en el informe de ensayo.²³

Las especificaciones y limitaciones de este tipo de pruebas se pueden encontrar en la norma ASTM E384-11.²⁴

4.3 Identificación de la población.

Con el fin de realizar en modelo experimental que permita calcular la KIC la población a estudiar son 4 muestras de distintas zonas del país previamente seleccionadas.

Para la selección de las muestras fue necesario ir a la bodega almacenamiento de Ecopetrol donde se encuentran guardadas, el paso siguiente fue revisar las muestras disponibles y seleccionar las más adecuadas teniendo en cuenta sus registros y estado de las mismas.

A continuación se ilustra el estado y la selección de las muestras de afloramiento para los respectivos ensayos.

²³ MEJIA O, Vickers hardness En En Society of Petroleum Engineers SPE 799 2007.

²⁴ American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. ASTM E 384-11. 18h.

Figura 13. Formación La Luna (4)



Figura 14. Formación La Luna (2)

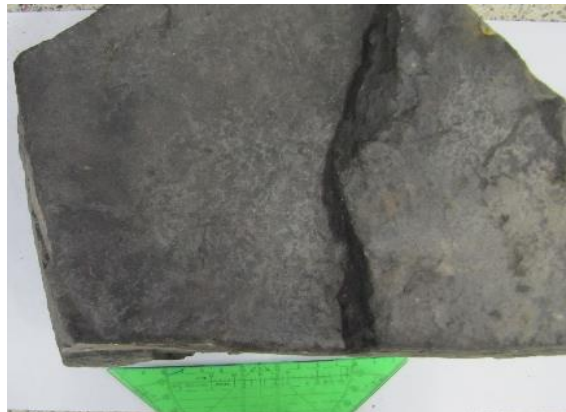


Figura 15. Formación La Luna (3)



Figura 16. Formación Rosa Blanca



En la tabla 1 se puede observar la información detallada de cada una de las muestras para ello fue necesario, reunir información litológica de cada una de ellas y por medio de un análisis geológico determinar las características sedimentológicas de estas, la demás información fue consultada en la base de datos del laboratorio de macanica de rocas ICP.

Tabla 1. Información geologica de las muestras.

PUNTO	TIPO DE MUESTRA *	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	PUNTO DE MUESTREO	COORDENADAS (PLANAS)	FORMACIÓN	LITOLOGIA	OBSERVACIONES
1	Afloramiento	RosaBlanca-01	Km 14 Carretera Pelaya-Pailitas	1'462.456N 1'046.693E 128 m.s.n.m	Rosa Blanca	Caliza (biomicrita)	Alto contenido de conchas fragmentadas de bivalvos.
2	Afloramiento	Luna-02	Santander	1'285.991N 1'086.949E	La Luna	Shale Calcareo	Laminación plano-paralela Laminillas de carbonato.
3	Afloramiento	Luna-03	Santander	1'286.986N 1'089001E	La Luna	Shale Calcareo	Muy pocas laminas de carbonato. Poco calcareo.
4	Afloramiento	Luna-04	Santander	1'287.000N 1'086.982E	La Luna	Shale Calcareo	Laminación plano-paralela Laminillas de carbonato.

4.4 Modelo experimental

Basados en los estudios de Montgomery (2004) para el desarrollo de experimentos se selecciona un modelo, factor por factor para determinar el

número de experimentos totales en las muestras a estudiar, para este caso entre la escala de Mosh y el KIC como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Modelo experimental de número de ensayos

<i>KIC</i> / <i>Mosh</i>	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

60 ensayos

Una vez realizado el modelo, se obtiene que las iteración posibles teniendo en cuenta todos los niveles de las escalas entre los dos parámetros dan un total de 60 ensayos, finalmente al modelo experimental factor por factor se le aplica una repetitividad de cuatro para un total de 240 ensayos.

La repetitividad aplicada, se hace con el objetivo de brindar mayor confianza a los resultados y que estos sean representativos de toda la población a estudiar.

4.5 Condiciones de ensayos

Para la realización de los ensayos es necesario tener en cuentas las siguientes condiciones y requerimientos:

4.5.1 Preparación de muestras.

Todas las muestras deben ser llevadas a un tamaño óptimo para poder desarrollar este experimento, el cual determinó a partir de las especificaciones del analizador de texturas del ICP el cual no soporta muestras con un área mayor a 49cm² por ende y aplicando un rango de error del 25% el área máxima para cada muestra no puede ser mayor a 36cm² a su vez deben cumplir con una planitud no mayor a 2 grados, con respecto al indentador como especifica la norma ASTM E384-11.

- **Procedimiento para preparación de muestras:**

Para este protocolo el primer paso fue tener claras las dimensiones y la forma que debe tener la muestra, la cual es plana, delgada y de forma rectangular, con las siguientes dimensiones: 6cm de ancho, 6cm de largo y 1cm de espesor.

En este protocolo se diseñó una estrategia para la preparación de las muestras con base a los equipos y herramientas disponibles para corte y pulido de rocas en el *Instituto Colombiano del Petróleo*. Para ello inicialmente se realizó una revisión detallada de los equipos con los cuales se realizan dichas operaciones en el ICP, luego de realizar dicha revisión se observó que habían varios inconvenientes para obtener la muestra con las dimensiones que se requieren, debido a que todos estos equipos están diseñados para que el corte de plugs o corazones tengan una geometría cilíndrica que dista mucho de la forma física, de la muestra requerida para realizar los ensayos con el equipo, en esta investigación.

Para solucionar este problema se plantearon dos posibles soluciones:

- i. Buscar algunos equipos en el mercado local que permitieran dar la forma requerida a la muestra.
- ii. Acondicionar los equipos existentes en el ICP para obtener la muestra requerida.

De las dos propuestas mencionadas anteriormente se escogió la opción (i.) para realizar el corte fuera del ICP y la opción (ii) para el proceso desbaste y pulido fino con equipos del ICP debido a que las muestras se podrían preparar dentro de las instalaciones del ICP con mayor supervisión y menores riesgos.

Luego de haber definido el camino que se debía seguir, se procedió a escoger dentro de una gama amplia de equipos de pulido disponibles en la compañía las máquinas, herramientas que se usarían para dicho propósito; estas máquinas se muestran a continuación: *Desbastadora*, *Comparador de caratula* y *Pulidor de Caras EFG-450*.

Figura 17. Desbastadora



Figura 18. Comparador de caratula



Figura 19. Pulidora de caras EFG- 450



Luego de seleccionar los equipos, el siguiente paso fue diseñar los sistemas de sujeción sobre los cuales se montarían las piezas durante el proceso de pulimiento.

Para realizar este montaje, se tuvieron en cuenta aspectos como los soportes sobre los cuales estarán colocadas las muestras, el gancho para sujeción de muestras, por último la geometría y tamaño de estas.

En la figura 20 se puede observar el soporte para colocar las muestras con su respectivo gancho para sostenerlas.

Figura 20. Dispositivos para soporte y sujeción de las muestras



4.5.2 Especificaciones del ensayo.

Teniendo en cuenta la indentación que se va a realizar y la disponibilidad de equipos del ICP fue necesario diseñar y construir un acople para la punta Vickers y el analizador de texturas del laboratorio de mecánica de rocas.

En la siguiente figura se puede observar en analizador de textura y el acople que se realizó.

Figura 21. Analizador de texturas y acople punta Vickers

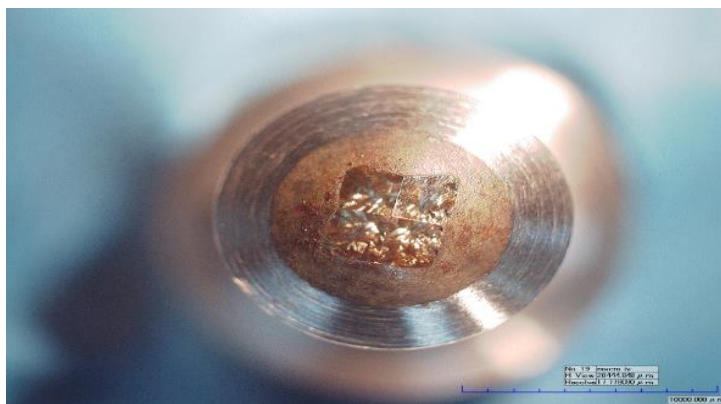


En las figuras (22) y (23), se puede observar la punta del indentador Vickers.

Figura 22. Indentador



Figura 23. Punta Vickers



Para poder comprobar el estado de la punta y validar la metodología fue necesario desarrollar una serie de pruebas preliminares de la dureza a partir de un patrón de dureza conocida como se muestra en la siguiente figura; esta prueba utilizó un patrón de dureza suministrado por el laboratorio de materiales del *Instituto colombiano del petróleo ICP*, para su realización se utilizaron los estándares de la norma ASTM E384-11.

El patrón tiene un valor teórico de número de dureza Vickers de 406, a una carga de 100 kgf al realizar la indentación se obtiene una huella como la que se ilustra en la figura 24, de donde se mide la diagonal, valor de importancia para el cálculo de HV.

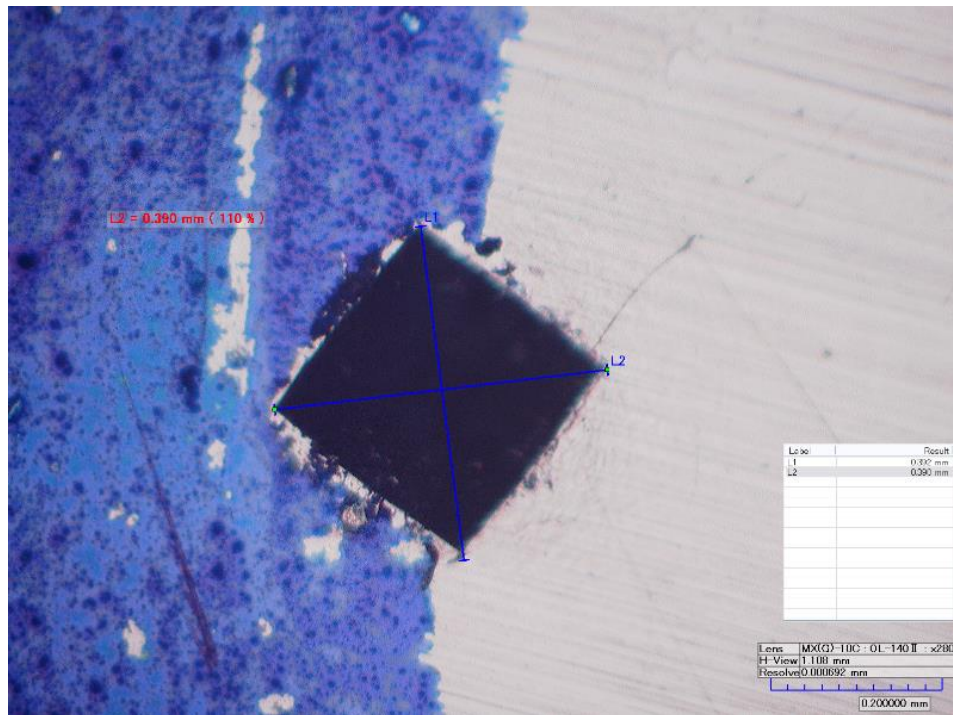
Para calcularlo aplicamos la siguiente ecuación:

$$Hv = 1854.4 \frac{P}{d^2} \quad (4.1)$$

Donde $P = 100\text{kgf}$ y $d = 680\text{ mm}$

De esta manera se obtiene un valor de 401 HV al hallar el porcentaje de error entre el valor teórico y el obtenido experimentalmente se determinó un error de 0.5%; este valor corresponde a un valor muy exacto.

Figura 24. Rectificación de la punta Vickers en un patrón de dureza



Dentro de las especificaciones del ensayo se realizó unos ensayos preliminares con el fin de determinar los parámetros de control en cada indentación para las diferentes muestras de población y se obtuvieron los siguientes resultados.

La tabla 3 ilustra los datos que se observaron al generar indentaciones a diferentes profundidades (H) y velocidades (V) en diferentes muestras.

Tabla 3. Diseño experimental para las condiciones de indentación

H/V	0,1	0,3	0,5	0,6
0,1	se evidencia huella y grietas	se evidencia huella y grietas	huella muy pequeña	huella pequeña
0,2	se evidencia huella y grietas	se evidencian algunas grietas	huella muy pequeña	huella pequeña
0,3	se evidencia huella y grietas	esfoliaciones algunas grietas	se evidencian grietas y deformaciones	deformacion plastica
0,5	se observan profundas indentacion, se evidencian grietas y deformacion plastica	deformación plastica	deformaciones y grietas	deformacion plastica

De la anterior tabla, podemos evidenciar que el comportamiento de las huellas generadas dependen directamente de estas dos variables, siendo un rango de profundidad H, desde 0.1 a 0.3 (mm) y una velocidad de 0.1 (mm/s) las más aceptables; se ve la necesidad de realizar más indentaciones dentro del rango ya encontrado para comprobarlo.

Tabla 4. Diseño experimental para las condiciones de indentación con un solo parámetro de variación

H/V	0,01
0,1	se evidencian 4 grietas
0,2	se evidencian 4 grietas
0,25	se evidencian 4 grietas
0,3	se evidencia 4 grietas
0,4	se evidencia 4 grietas y levantamientos

De la tabla 4 se puede concluir que la velocidad óptima para las indentaciones es de 0.01 mm/s y las profundidades varían de 0.1mm a 0.3mm considerando que a una profundidad de 0.4mm ocurre levantamiento de la huella.

- **Modelo experimental para la distribución de indentaciones en la muestra**

Una vez calculado el rango de profundidad de la muestra, se debe calcular el rango de valor de la diagonal de indentación con el fin de aplicar lo estipulado en la norma ASTM E 384-11 para el espaciado de la muestra.

Tabla 5 Calculo de la diagonal de indentación

H	0,1	0,2	0,3
Dv	0,32	0,44	0,64

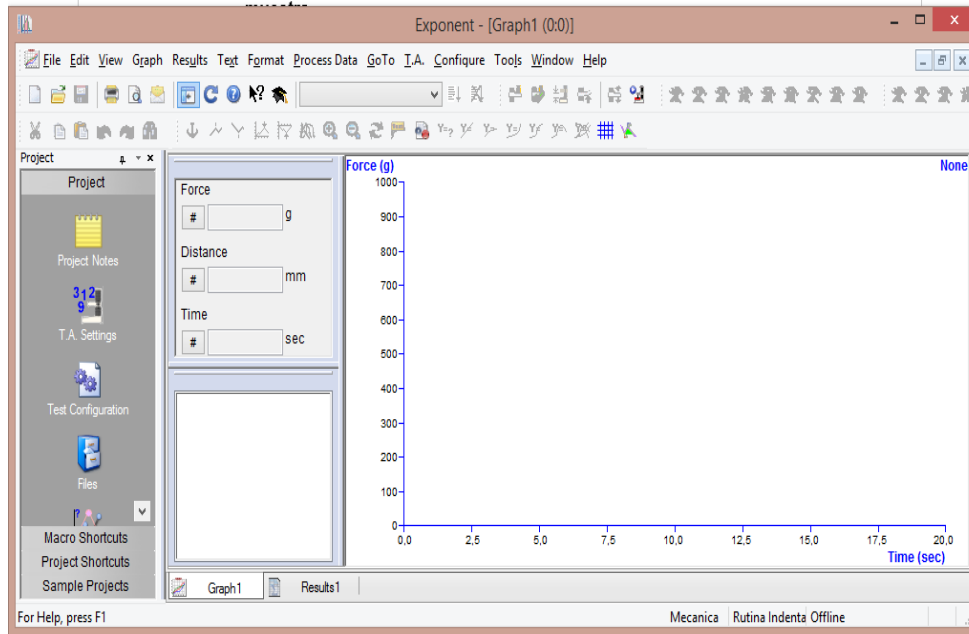
De la tabla 5 podemos observar que el valor mínimo de una diagonal de indentación es de 0.32 y el máximo de 0.64, con estos valores se puede determinar el número de indentación por muestra; para ello fue necesario generar en cada una de ellas una malla de 1cm x 1cm, dejando un rango de seguridad por efecto de borde de 2,5 mm y teniendo claro el área de cada celda se determinó aplicar de 4 a 5 indentaciones según la profundidad del ensayo siendo 5 para una profundidad de 0.1mm y 0.2mm y 4 para una de 0.3mm.

4.5.3 Obtención de datos.

Para obtener los valores requeridos para determinar la KIC, el HV, el E y el BI se utilizara el software Exponet disponible en el laboratorio de mecánica de rocas, el cual permite obtener directamente los valores numéricos necesarios para obtener el E Y el BI. Para obtener la KIC y el HV es necesario utilizar una herramienta óptica, para este caso se usará el microscopio digital Hirox, disponible en el laboratorio de materiales del ICP.

En la figura 25 ilustra, la interface del software Exponet, la cual permite realizar ensayos de indentación y obtener datos numéricos y graficos. Con esta herramienta se planea calcular directamente el E y el BI; además parte de los datos necesarios para calcular la KIC y el HV.

Figura 25. Interface software Exponent



En la siguiente Figura se observa el microscopio digital Hirox con el cual se medirán las diagonales de las huellas de indentación y las grietas generadas con el fin de lograr calcular la KIC Y el HV

Figura 26. Microscopio digital Hirox



4.5.4 Cálculos para determinar parámetros de interés

- **Cálculo para determinar KIC**

Para determinar la KIC se usara la correlación de Evans (1976).

$$KIC = 0.116(c/a)^{-1.5}(Ha^{0.5}) \quad (4.2)$$

Donde:

KIC = Resistencia a la fractura (MPa•m^{1/2}).

H = Dureza Vickers (MPa).

c = Longitud media de las grietas obtenidas en las puntas de la huella Vickers (micras).

a = Longitud media de la mitad de la diagonal de la huella Vickers (micras).

De donde H se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$H = 1.8 \frac{P}{a^2} \quad (4.3)$$

Donde:

P = Carga de prueba en durómetro Vickers (MPa).

El valor de *P* se obtiene directamente de la indentación a través del software Exponet. Finalmente *c* y *a* se obtienen por mediciones realizadas por medio del microscopio digital Hirox.

- **Cálculo para determinar el número de dureza Vickers (Hv)**

Para calcular Hv se utiliza la ecuación propuesta en la norma ASTM e384-11:

$$Hv = 1854.4 \frac{P}{d^2} \quad (4.4)$$

Donde:

P = Es la carga aplicada en gramos fuerza (gf) esta se obtiene directamente del ensayo de indentación a partir del software Exponet, el cual nos genera el valor a medida se genera la indentación.

d = Es el tamaño promedio de la diagonal promedio registrado en la muestra en unidades de (micras), esta se obtiene midiéndola en el microscopio digital Hirox.

- **Cálculo para determinar la fragilidad de la roca (BI)**

Para calcular BI se utiliza la ecuación propuesta por YAGIZ (2012):

$$BI = \frac{P}{h} \quad (4.5)$$

Donde:

P = Es la carga máxima aplicada en unidades de presión (KN), esta se obtiene directamente del ensayo a partir del software Exponet.

h = Es la profundidad de penetración de la punta a la carga máxima aplicada en unidades de (mm), esta se obtiene directamente del ensayo a partir del software Exponet.

- **Cálculo para determinar el módulo de Young (E)**

Para calcular el módulo de Young se utiliza la metodología usada en el *Instituto Colombiano del Petróleo ICP*, la cual da el valor del módulo directamente de la indentación a través del software Exponet.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR KIC

En este capítulo se desarrollaran todos los experimentos necesarios para obtener los resultados, que puedan dar solución a la hipótesis planteada; a su vez el análisis de estos teniendo en cuenta los descubrimientos realizados en esta investigación

5.1 Preparación de muestras

Al ingresar las muestras al ICP después de haberlas cortado estas entraron en el siguiente estado:

Las figuras (27), (28), (29), (30) y (31) muestran el estado que presentaban las muestras al ingreso del ICP, donde se puede evidenciar que aún no cumplen con las especificaciones necesarias para comenzar con las pruebas.

Figura 27. Estado de entrada muestras Luna 02 al ICP

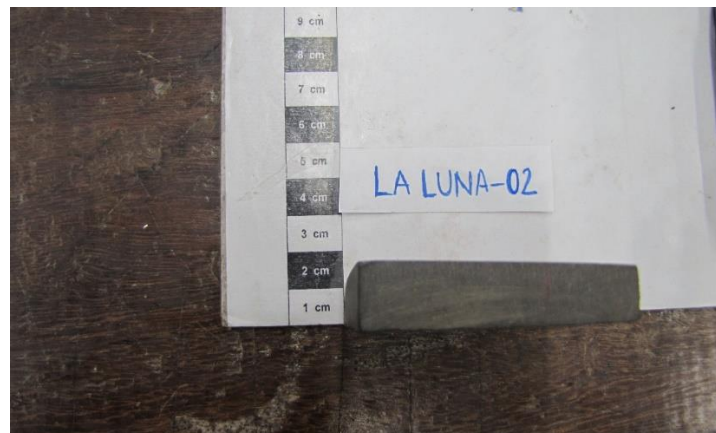


Figura 28. Estado de entrada muestras Luna 02 al ICP

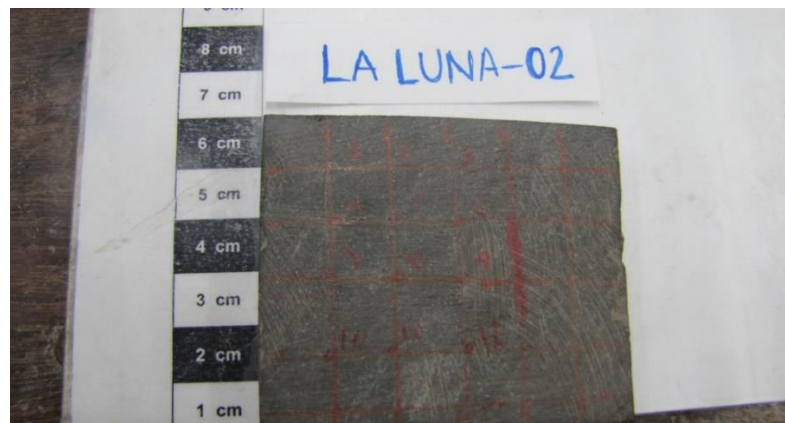


Figura 29. Estado de entrada muestras Luna 03 al ICP

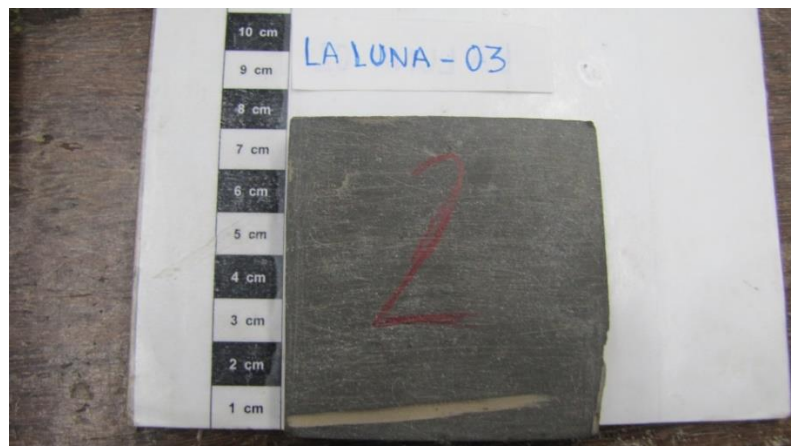


Figura 30. Estado de entrada muestras Luna 04 al ICP



Figura 31. Estado de entrada muestras Rosa Blanca al ICP



En la siguiente tabla se puede observar toda la información de las muestras al momento de ingresar al ICP después de haber pasado por el proceso de corte en un taller particular.

La tabla nos brinda información litológica de las muestras, el punto de muestreo, coordenadas y el número de sub muestras disponibles por cada formación.

Tabla 6. Descripción de muestras después de pasar por el proceso de corte

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	SITIO DE MUESTREO	PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (Tope - Base): □		FORMACION	EDAD	LITOLOGIA	OBSERVACIONES
Luna 2	Bastón	Santander	1'285.991N	1'086.949E	La Luna	Cretacico	Shale Calcareo	19 sub muestras.Laminación cruzada y oblicua al corte del plug. Se observan clastos en la parte superior. Muestra no fracturada. No se observan planos de debilidad.
Luna-03	Baston	Santander	1'286.986N	1'089001E	La Luna	Cretacico	Shale	24 sub muestras.Laminación cruzada y oblicua al corte del plug. Se observan clastos en la parte superior. Muestra no fracturada. No se observan planos de debilidad.
Luna-04	Bastón	Santander	1'287.000N	1'086.9821E	La Luna	Cretácico	Shale Calcareo	7 sub muestras.Presencia de laminas de carbonato con espesor inferior a 1mm, las cuales generan planos de debilidad. .
Rosa Blanca	parte norete cuenca VMM	Km 14 Carretera Pelaya-Pailitas	6N 1'046.693E	128 m.s.n.m	Rosa Blanca	Cretacico inferior	caliza (biomicrita)	1 muestra. Contenido de conchas fragmentadas de bivalvos, no se observan fracturas.

en las figuras (32), (33),(34) y (35) se puede observar las muestras listas para realizar ensayos, después de haber pasado por un proceso de desbaste y pulimiento, hasta lograr el acabado ideal.

Figura 32. Muestra Luna 02 en condiciones necesarias para ensayo



Figura 33. Muestra Luna 03 en condiciones necesarias para ensayo



Figura 34. Muestra Luna 04 en condiciones necesarias para ensayo



Figura 35. Muestra Rosa Blanca en condiciones necesarias para ensayo

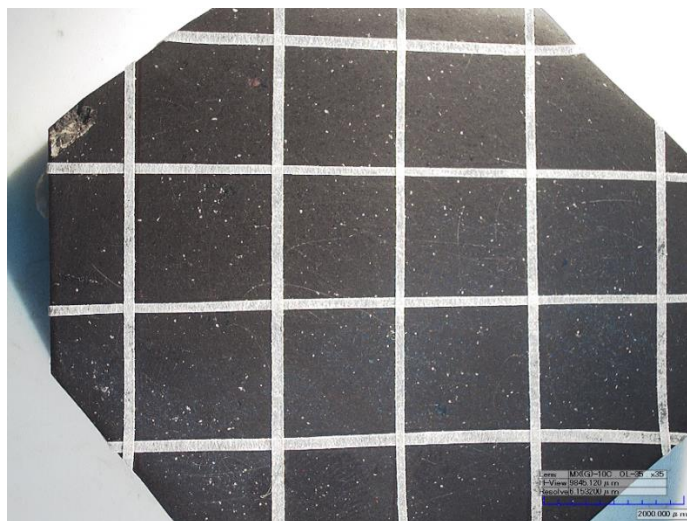


5.2 Desarrollo del ensayo

Teniendo en cuenta las especificaciones del modelo experimental para la distribución de indentaciones en la muestra presetado en el capítulo anterior, es necesario desarrollar a cada muestra una malla para determinar las áreas a indentar como la que se ilustra en la figura 36.

Para la realización del enmallado se usó cinta de enmascarar y se plasmó una cuadrícula en la muestra.

Figura 36. Malla aplicada a cada muestra para distribución de ensayos en ella

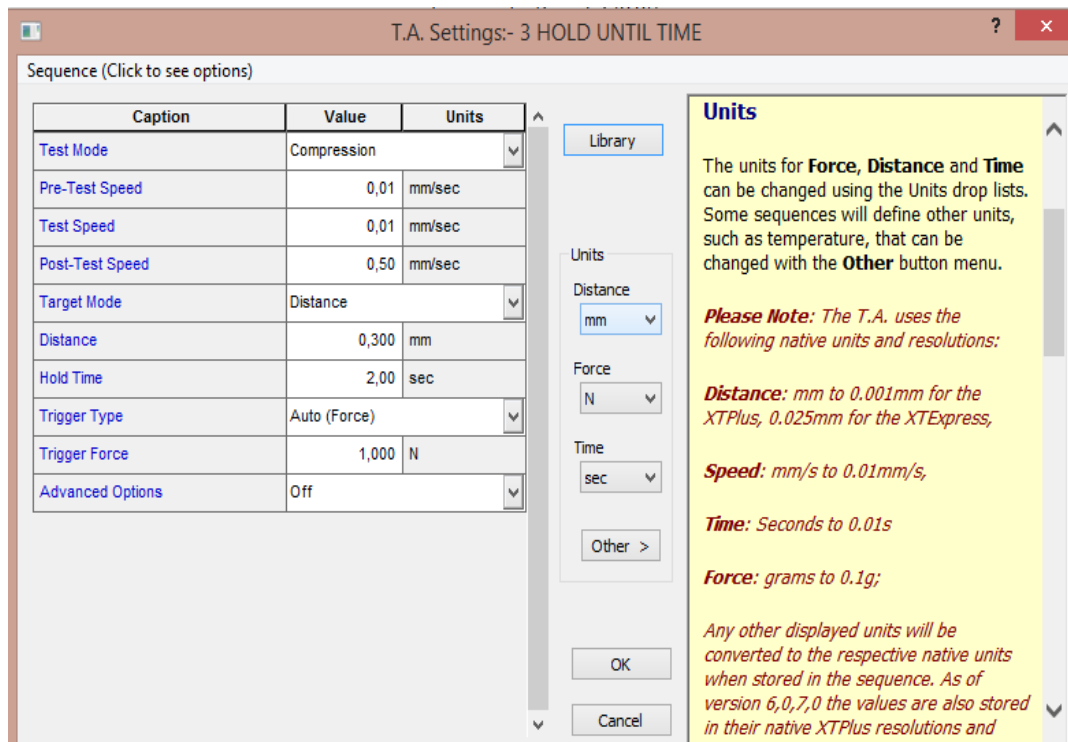


5.2.1 Proceso de indentación

El primer paso para indentar es programar el software con las especificaciones de indentación definidas en el diseño experimental de presentado en el capítulo anterior.

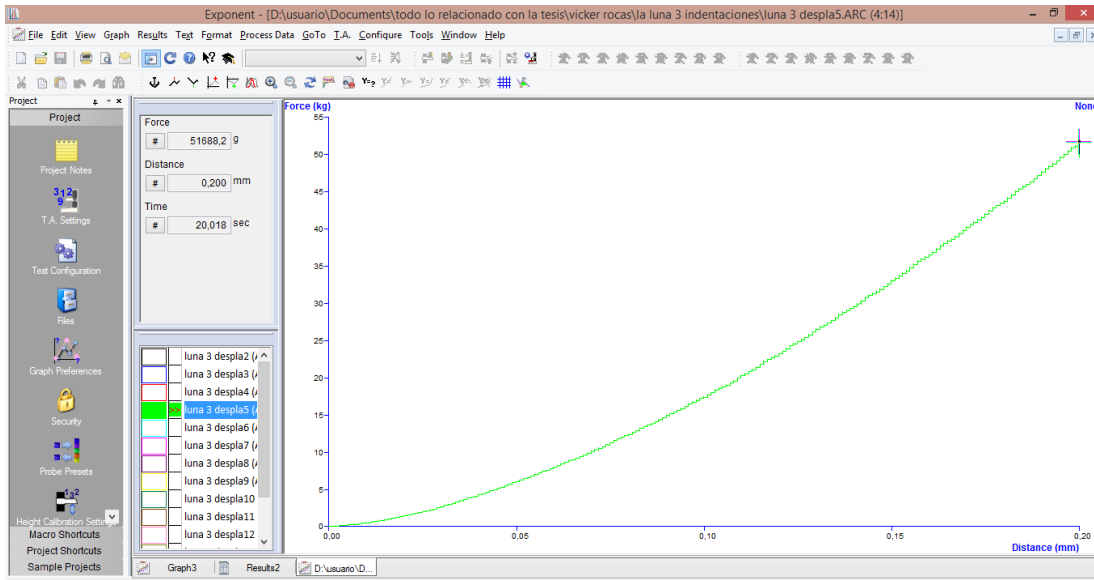
Los datos requeridos para realizar el proceso de indentación acorde al diseño experimental realizado para este fin se presentan en la siguiente figura.

Figura 37. Especificaciones de indentación



Después de generada la rutina con las especificaciones pertinentes y haber colocado la muestra en la superficie de ensayos se procede a indentar, lo cual nos genera en el software una gráfica e información valiosa que se muestra en la siguiente figura.

Figura 38. Grafica generada por una indentación



Este proceso se realiza con todas las muestras, hasta completar todas las indentaciones propuestas en el diseño experimental de número de ensayos.

Una vez terminado este procedimiento, con ayuda del microscopio digital Hirox se mide la longitud de las grietas y diagonales generadas en cada indentación.

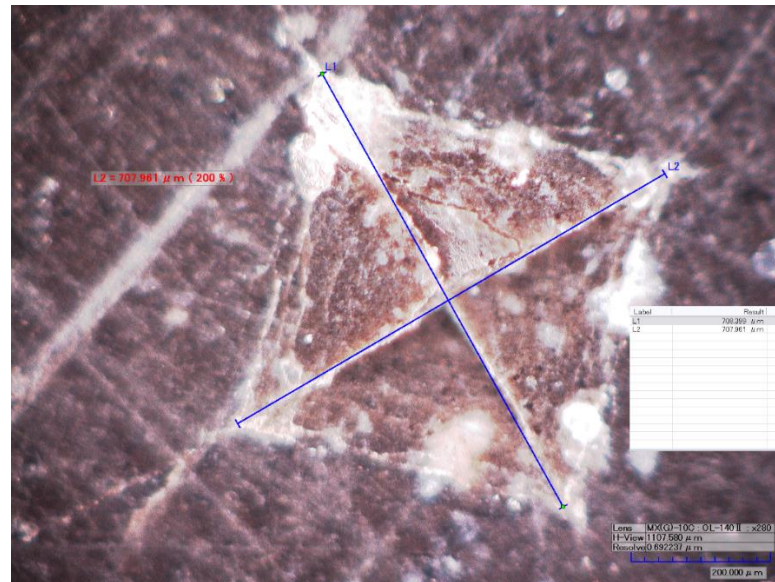
En la figura 39 se ilustra una huella Vickers generada en una muestra perteneciente a la formación Rosa Blanca, donde se puede evidenciar las diagonales de la huella.

Figura 39. Huella Vickers en muestra Rosa blanca



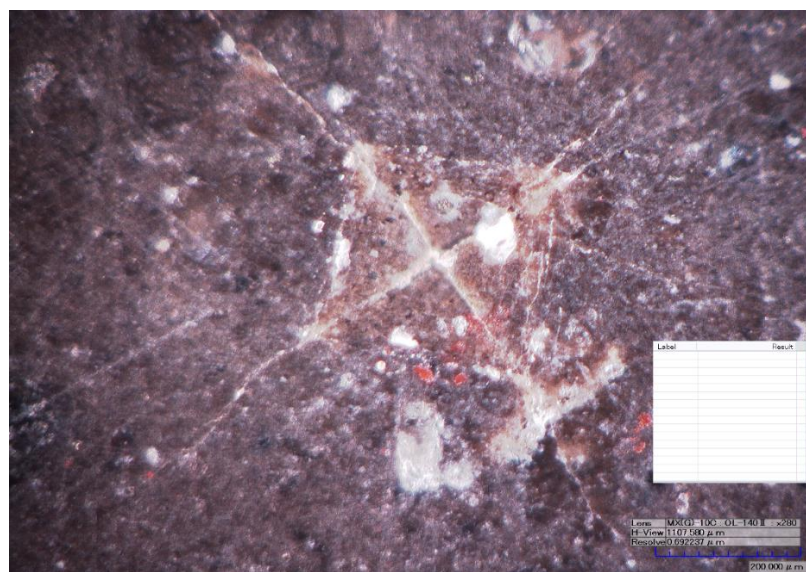
En la figura 40 se observa el proceso para medir las diagonales de una huella Vickers realizada en una muestra perteneciente a la formación Luna 3.

Figura 40. Diagonales en huella Vickers en muestra Luna 3



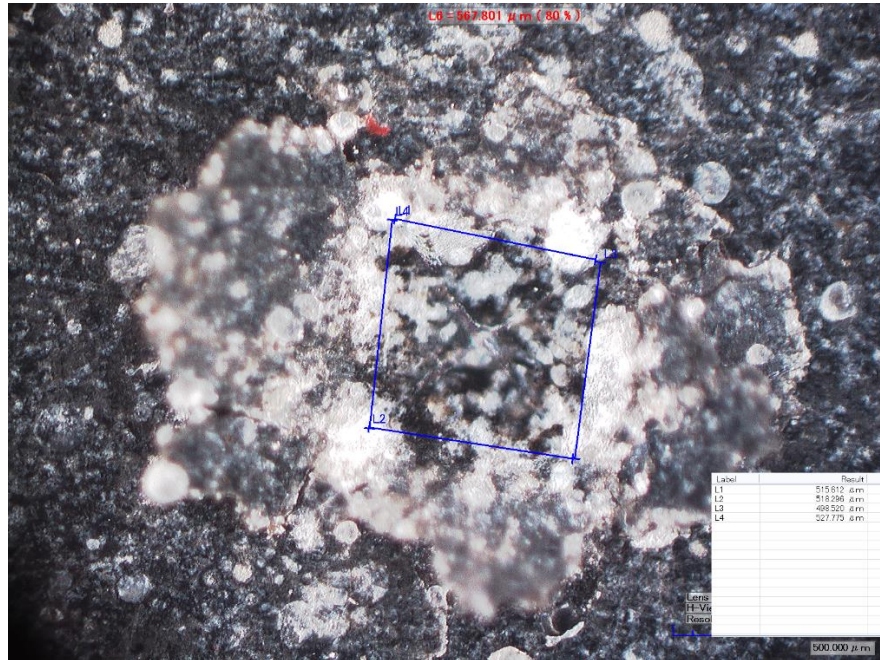
A continuación se observa una huella Vickers perteneciente a la formación Luna 2 donde se ilustra las grietas generadas en la muestra por la indentación.

Figura 41. Huella Vickers en muestra Luna 2



En la siguiente figura se ilustra el área de una huella Vickers realizada a una muestra perteneciente a la formación Luna 4.

Figura 42. Area huella Vickers en muestra Luna 4



Una vez tomadas las medidas de las diagonales, área y grietas de la muestra el microscopio digital Hirox guarda las medidas en un archivo de Excel como lo muestra la siguiente tabla

Tabla 7. Longitud de grietas en una muestra de la formación Luna 2

2D Measuring Data	
Label,Result,Unit,Ratio	
L1,326.922,um,46%	
L2,366.884,um,52%	
L3,281.970,um,40%	
L4,307.452,um,43%	

5.3 Resultados de los ensayos

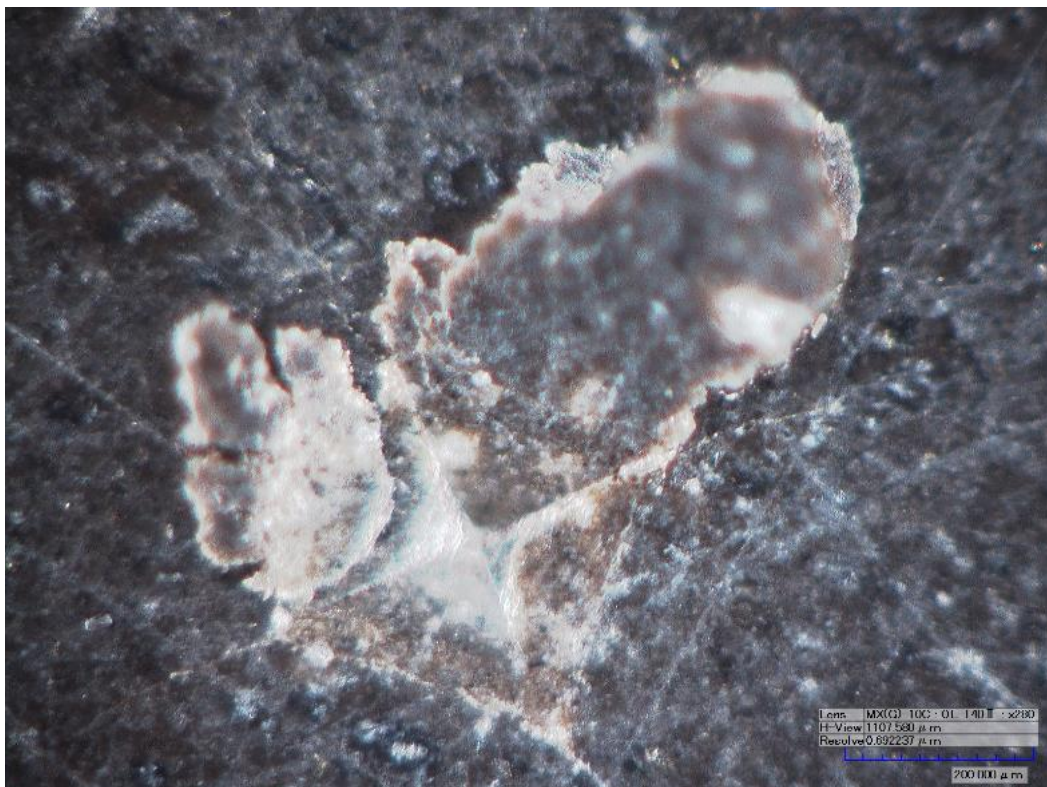
Se presentaron algunas anomalías en la preparación de las muestras y desarrollo de las pruebas, de algunas de las muestras seleccionadas para esta investigación tales como las que se observan en las figuras (43) y(44).

Esto ocasionó, que los datos obtenidos, para estas muestras se consideraron inválidos o poco confiables, para el cálculo de la tenacidad de fractura.

En el caso de algunas muestras de Luna 4, en el momento de pulimiento sufrieron fracturas las cuales imposibilitó su utilización; otros inconvenientes se presentaron en las indentaciones las cuales generaron huellas que según la norma ASTM E384-11 no son válidas y los datos obtenidos de estas son erróneos.

En la siguiente figura se observar una indentación descartada por presencia de exfoliación de la roca alrededor de la huella.

Figura 43. Huella Vickers en una muestra de la formación Luna 2 invalida por presencia de descaramiento



En la figura 44 se ilustra el levantamiento de las capas superficiales de la muestra en inmediaciones de la huella de indentación este fenómeno se considera como un claro ejemplo de una indentación errónea considerando que el crecimiento de las fracturas a través de la roca se ve interrumpido por la no continuidad de la misma.

Figura 44. Huella Vickers en una muestra de la formación Luna 4 invalida por levantamiento



Finalmente, se ilustra en la tabla 8 los resultados finales de la investigación donde se encuentra cuantificados los valores de la KIC, el HV, el E y el BI, respectivo a cada indentación, también se encuentran otros valores tales como: a, c y H que fueron necesarios para el cálculo de los parámetros anteriormente mencionados.

Cabe resaltar que por celda se realizaron entre 4 y 5 indentaciones es por esta razón que se observa en la casilla de las celdas varias veces el mismo número de celda.

Tabla 8. Resultados de parámetros y KIC de los ensayos validos

Celda	a (µm)	c (µm)	H Mpa	KIC Evans Mpa*m ^{1/2}	Hv	E (Mpa)	BI (KN/mm)
18	203,88	519,97	4078,09	2,29	107,18	28708,10	0,94
18	184,21	486,33	4581,68	2,32	120,41	28708,10	0,86
18	219,35	557,87	4456,82	2,60	117,13	28708,10	1,19
17	234,59	570,49	4694,71	3,03	123,38	28708,10	1,44
34	207,16	502,25	5063,39	3,09	133,07	28708,10	1,21
5	212,65	458,40	4315,61	3,18	113,42	28708,10	1,09
18	217,03	536,77	5383,04	3,26	141,47	28708,10	1,41
28	196,51	505,91	6040,75	3,28	158,76	28708,10	1,30
11	233,63	586,54	5362,88	3,30	140,94	28708,10	1,63
12	226,19	578,24	5697,83	3,35	149,75	28708,10	1,62
24	224,34	615,03	6360,87	3,36	167,17	28708,10	1,78
34	211,26	531,30	5788,32	3,38	152,12	28708,10	1,44
35	220,91	514,77	5092,08	3,40	133,83	28708,10	1,38
30	192,64	451,27	5568,49	3,45	146,35	28708,10	1,15
17	248,15	587,59	5115,52	3,54	134,44	28708,10	1,75
13	231,66	543,53	5313,48	3,60	139,64	28708,10	1,59
17	227,67	562,70	5866,46	3,64	154,18	28708,10	1,69
26	239,58	542,84	5023,14	3,65	132,01	28708,10	1,60
16	203,65	590,66	7981,39	3,69	209,76	28708,10	1,84
2	211,11	411,37	4335,37	3,71	113,94	28708,10	1,07
33	213,15	503,10	5753,34	3,71	151,20	28708,10	1,45
30	223,38	515,32	5448,28	3,72	143,19	28708,10	1,51
30	217,31	506,05	5678,93	3,77	149,25	28708,10	1,49
10	524,28	1565,61	5408,06	3,84	142,13	30939,00	1,25
22	220,91	518,93	5839,83	3,86	153,48	28708,10	1,58
38	200,24	424,63	5293,42	3,88	139,12	28708,10	1,18
29	222,94	490,93	5383,10	3,94	141,47	28708,10	1,49
101	376,18	1091,33	6292,54	3,95	165,38	29112,00	1,68
29	199,58	418,87	5327,96	3,96	140,03	28708,10	1,18
3	207,29	451,58	5534,81	3,97	145,46	28708,10	1,32
61	390,85	1059,77	5606,45	3,97	147,34	29112,00	1,62
38	222,21	503,40	5719,84	4,00	150,32	28708,10	1,57
30	212,60	474,87	5748,08	4,02	151,07	28708,10	1,44
35	188,70	417,47	6014,75	4,02	158,07	28708,10	1,19

9	227,65	513,21	5651,07	4,03	148,52	28708,10	1,63
Celda	a (µm)	c (µm)	H Mpa	KIC Evans Mpa·m ^½	Hv	E (Mpa)	Bl (KN/mm)
67	376,91	1077,16	6290,90	4,04	165,33	29112,00	1,64
10	543,28	1565,70	5326,52	4,06	139,99	30939,00	1,56
13	322,75	979,00	7469,70	4,06	196,31	29112,00	1,27
28	206,52	471,51	6163,69	4,11	161,99	28708,10	1,46
15	366,16	1028,84	6324,46	4,11	166,21	29112,00	1,58
65	398,34	1049,84	5512,12	4,11	144,87	29112,00	1,63
59	365,33	1049,76	6553,29	4,11	172,23	29112,00	1,58
27	229,71	542,60	6160,89	4,12	161,92	28708,10	1,81
29	225,96	507,18	5762,90	4,12	151,46	28708,10	1,64
33	219,18	472,33	5511,09	4,13	144,84	28708,10	1,47
91	389,19	1082,11	6079,38	4,14	159,77	29112,00	1,76
30	179,81	403,87	6517,99	4,15	171,30	28708,10	1,17
31	390,85	1043,83	5738,95	4,16	150,83	29112,00	1,68
69	372,83	1058,18	6456,70	4,17	169,69	29112,00	1,65
3	474,82	1511,03	6797,57	4,17	178,65	30939,00	1,31
11	534,73	1577,00	5725,31	4,18	150,47	30939,00	1,84
14	467,31	1115,42	4460,89	4,18	117,24	30939,00	1,25
97	377,94	1004,55	5900,18	4,24	155,06	29112,00	1,66
62	359,42	1049,39	6976,52	4,24	183,35	29112,00	1,69
33	189,65	441,62	6853,65	4,25	180,12	28708,10	1,37
16	210,46	527,15	7265,94	4,25	190,96	28708,10	1,79
63	385,40	1021,53	5889,71	4,29	154,79	29112,00	1,64
40	365,63	1061,90	6984,62	4,32	183,56	29112,00	1,77
27	205,22	469,89	6529,61	4,32	171,61	28708,10	1,53
13	579,61	1509,78	4757,09	4,36	125,02	30939,00	1,75
6	552,02	1473,33	5077,71	4,38	133,45	30939,00	1,65
95	374,03	983,59	6041,02	4,38	158,77	29112,00	1,65
28	185,79	402,34	6442,64	4,41	169,32	28708,10	1,24
16	220,89	540,02	7124,99	4,43	187,25	28708,10	1,93
60	367,06	1000,15	6535,10	4,45	171,75	29112,00	1,63
12	313,25	1024,00	9299,13	4,46	244,39	29112,00	1,63
15	175,41	353,94	6033,82	4,46	158,58	28708,10	1,03
64	392,36	1007,67	5794,89	4,46	152,30	29112,00	1,68
87	411,69	1050,61	5624,36	4,48	147,81	29112,00	1,81
28	207,67	461,06	6474,59	4,51	170,16	28708,10	1,55
1	151,73	293,84	6175,43	4,52	162,30	28708,10	0,79

19	196,59	471,11	7469,13	4,52	196,30	28708,10	1,61
Celda	a (µm)	c (µm)	H Mpa	KIC Evans Mpa·m^½	Hv	E (Mpa)	B₁ (KN/mm)
22	195,61	410,39	6137,39	4,52	161,30	28708,10	1,31
11	379,25	1006,75	6283,44	4,53	165,14	29112,00	1,70
24	220,31	481,59	6169,01	4,53	162,13	28708,10	1,67
20	216,14	519,61	7190,26	4,54	188,97	28708,10	1,87
14	374,50	961,79	6034,44	4,54	158,59	29112,00	1,53
28	235,43	501,77	5758,04	4,54	151,33	28708,10	1,77
16	372,51	982,74	6315,70	4,55	165,98	29112,00	1,65
4	571,23	1354,21	4347,15	4,55	114,25	30939,00	1,19
13	541,04	1485,94	5576,30	4,56	146,55	30939,00	1,34
90	401,75	1022,13	5791,35	4,58	152,20	29112,00	1,81
10	396,87	976,88	5546,70	4,58	145,77	29112,00	1,58
38	374,73	991,35	6360,25	4,58	167,15	29112,00	1,74
6	218,43	450,24	5741,26	4,59	150,89	28708,10	1,52
9	360,25	932,42	6297,33	4,59	165,50	29112,00	1,38
98	400,98	1017,00	5805,50	4,60	152,58	29112,00	1,79
33	368,31	991,94	6638,76	4,61	174,47	29112,00	1,65
11	496,55	1440,22	6399,70	4,62	168,19	30939,00	1,63
5	506,96	1399,92	5910,36	4,64	155,33	30939,00	0,77
20	225,07	499,87	6400,94	4,64	168,22	28708,10	1,80
73	404,33	1007,49	5697,72	4,66	149,74	29112,00	1,77
36	365,38	948,80	6377,90	4,66	167,62	29112,00	1,63
2	500,82	1361,40	5844,18	4,67	153,59	30939,00	0,97
14	470,97	1412,82	6994,19	4,67	183,82	30939,00	1,60
12	453,32	1444,35	7820,70	4,68	205,54	30939,00	1,86
5	525,36	1304,54	5001,75	4,69	131,45	30939,00	0,96
42	350,21	938,46	6874,34	4,69	180,67	29112,00	1,64
86	402,36	1009,59	5812,02	4,69	152,75	29112,00	1,71
19	202,28	474,92	7463,12	4,72	196,14	28708,10	1,70
17	547,49	1466,62	5536,17	4,73	145,50	30939,00	1,96
41	337,45	955,78	7678,50	4,73	201,80	29112,00	1,71
53	393,66	984,26	5903,38	4,74	155,15	29112,00	1,68
3	385,85	974,65	6060,43	4,74	159,28	29112,00	1,70
77	389,55	975,59	5972,75	4,76	156,97	29112,00	1,72
80	387,92	995,22	6246,70	4,79	164,17	29112,00	1,77
10	551,51	1312,53	4714,49	4,83	123,90	30939,00	1,23
50	329,46	946,60	8134,37	4,85	213,78	29112,00	1,57

9	540,71	1239,36	4531,44	4,86	119,09	30939,00	1,19
Celda	a (µm)	c (µm)	H Mpa	KIC Evans Mpa·m ^½	Hv	E (Mpa)	Bl (KN/mm)
43	355,41	918,44	6716,97	4,88	176,53	29112,00	1,63
47	327,61	953,66	8374,03	4,88	220,08	29112,00	1,69
16	212,29	481,04	7153,51	4,89	188,00	28708,10	1,79
89	412,12	963,84	5394,03	4,90	141,76	29112,00	1,70
34	357,52	918,48	6706,30	4,93	176,25	29112,00	1,50
37	365,38	898,80	6248,66	4,95	164,22	29112,00	1,61
7	393,10	939,26	5790,17	4,97	152,17	29112,00	1,62
9	436,51	869,85	4185,22	4,97	109,99	36204,50	1,27
93	373,62	920,22	6235,67	4,99	163,88	29112,00	1,67
15	563,59	1357,30	4912,50	4,99	129,11	30939,00	1,39
19	552,67	1347,20	5078,04	5,02	133,46	30939,00	1,39
12	483,91	1420,43	7186,23	5,03	188,86	30939,00	1,67
18	589,14	1429,51	4900,40	5,04	128,79	30939,00	1,80
19	559,30	1332,67	4901,82	5,04	128,83	30939,00	1,25
48	344,75	934,42	7580,66	5,05	199,23	29112,00	1,73
45	344,42	977,74	8166,22	5,07	214,62	29112,00	1,85
39	346,08	971,66	8014,12	5,07	210,62	29112,00	1,83
16	532,23	1373,90	5736,14	5,11	150,75	30939,00	1,78
6	508,60	1374,74	6376,95	5,18	167,59	30939,00	1,66
15	505,37	1296,24	5915,53	5,18	155,47	30939,00	1,27
75	374,97	935,42	6612,70	5,20	173,79	29112,00	1,74
8	396,58	808,72	4763,16	5,21	125,18	36204,50	1,42
15	568,42	1360,08	5058,26	5,21	132,94	30939,00	1,80
13	582,44	1406,19	5066,18	5,21	133,15	30939,00	1,79
72	398,08	947,15	6000,72	5,22	157,71	29112,00	1,80
20	210,59	469,80	7501,89	5,23	197,16	28708,10	1,85
52	373,71	925,42	6598,62	5,24	173,42	29112,00	1,68
15	519,66	1313,37	5817,44	5,28	152,89	30939,00	1,29
78	385,93	900,62	5994,32	5,29	157,54	29112,00	1,60
83	401,27	903,01	5613,76	5,33	147,54	29112,00	1,68
84	392,13	920,19	6057,54	5,34	159,20	29112,00	1,78
18	479,25	1352,67	7239,17	5,35	190,25	30939,00	1,63
6	506,12	1348,56	6461,84	5,35	169,82	30939,00	1,86
5	495,78	1256,69	6101,33	5,39	160,35	30939,00	1,48
74	386,68	935,21	6455,29	5,40	169,65	29112,00	1,77
18	557,00	1353,55	5421,98	5,40	142,50	30939,00	1,61

16	555,89	1426,26	5981,93	5,49	157,21	30939,00	2,31
Celda	a (µm)	c (µm)	H Mpa	KIC Evans Mpa·m ^{1/2}	Hv	E (Mpa)	Bl (KN/mm)
10	457,57	1167,58	6669,64	5,60	175,29	30939,00	1,19
71	381,78	968,26	7248,15	5,61	190,49	29112,00	1,67
7	471,30	1301,34	7450,48	5,64	195,81	30939,00	1,67
3	520,70	1212,05	5517,05	5,67	144,99	30939,00	1,43
7	518,14	1310,53	6283,50	5,69	165,14	30939,00	1,61
17	559,00	1300,87	5341,61	5,69	140,38	30939,00	1,78
3	499,62	1270,08	6500,62	5,74	170,84	30939,00	1,51
7	509,02	1249,37	6203,94	5,82	163,05	30939,00	1,86
8	518,46	1220,31	5779,03	5,83	151,88	30939,00	1,40
16	518,11	1320,89	6561,43	5,87	172,44	30939,00	1,96
6	507,12	1259,62	6401,39	5,89	168,24	30939,00	1,68
17	423,26	821,47	4886,54	5,95	128,42	36204,50	1,25
18	559,85	1290,05	5502,04	5,95	144,60	30939,00	1,97
8	559,89	1329,47	5766,76	5,97	151,56	30939,00	1,83
13	423,20	1243,25	9205,50	6,02	241,93	30939,00	1,49
8	470,00	1231,59	7400,73	6,05	194,50	30939,00	1,92
8	512,48	1262,31	6509,51	6,10	171,08	30939,00	1,56
12	582,44	1236,97	4927,39	6,15	129,50	30939,00	1,85
7	228,00	367,61	5232,84	6,18	137,53	28708,10	1,51
16	502,25	1188,94	6276,20	6,18	164,95	30939,00	1,97
4	446,72	1167,02	7854,51	6,29	206,43	30939,00	1,27
3	436,80	1103,57	7591,84	6,32	199,52	30939,00	1,22
10	380,96	735,50	5441,90	6,34	143,02	36204,50	1,73
12	578,87	1188,01	4892,33	6,41	128,58	30939,00	1,78
8	428,22	717,41	4201,67	6,42	110,42	36204,50	1,62
9	462,04	1125,01	7295,24	6,60	191,73	30939,00	1,44
16	428,66	736,70	4538,39	6,67	119,27	36204,50	1,74
5	461,85	1059,63	6805,70	6,73	178,86	30939,00	1,42
8	374,40	695,20	5509,67	6,74	144,80	36204,50	1,61
21	310,04	605,25	6536,23	6,75	171,78	36204,50	0,79
21	302,80	578,68	6429,23	6,78	168,97	36204,50	0,67
7	437,04	715,89	4468,87	7,13	117,45	36204,50	1,73
23	367,64	716,84	6516,57	7,34	171,26	36204,50	1,79
19	317,25	579,75	6500,14	7,50	170,83	36204,50	1,00
25	363,64	660,50	6086,47	7,59	159,96	36204,50	1,23

23	385,32	715,50	6118,63	7,59	160,80	36204,50	1,81
Celda	a (µm)	c (µm)	H Mpa	KIC Evans Mpa·m ^½	Hv	E (Mpa)	Bl (KN/mm)
13	416,47	656,65	4657,65	7,68	122,41	36204,50	1,45
13	411,13	680,08	5051,99	7,70	132,77	36204,50	1,70
16	392,72	630,75	4965,02	7,73	130,49	36204,50	1,20
24	321,17	619,98	7406,51	7,92	194,65	36204,50	1,64
9	420,39	676,10	4960,54	7,98	130,37	36204,50	1,67
23	330,33	624,97	7217,95	8,07	189,70	36204,50	1,63
25	319,83	614,97	7522,62	8,07	197,70	36204,50	1,13
24	341,97	634,70	6903,35	8,08	181,43	36204,50	1,39
25	314,44	537,09	6365,20	8,09	167,28	36204,50	1,16
16	401,66	670,83	5520,53	8,20	145,09	36204,50	1,83
15	386,64	664,14	5957,85	8,33	156,58	36204,50	1,61
13	408,19	611,89	4757,32	8,38	125,03	36204,50	1,60
21	314,18	514,62	6230,53	8,43	163,75	36204,50	1,05
16	406,57	664,12	5476,13	8,46	143,92	36204,50	1,69
12	402,58	648,30	5398,81	8,48	141,89	36204,50	1,35
15	389,44	576,19	4859,31	8,53	127,71	36204,50	1,50
11	332,11	653,55	8093,74	8,55	212,71	36204,50	1,19
12	379,84	644,14	6078,98	8,58	159,76	36204,50	1,55
18	369,83	589,97	5626,05	8,59	147,86	36204,50	1,43
13	404,91	610,26	4943,52	8,60	129,92	36204,50	1,55
7	396,61	623,07	5472,65	8,86	143,83	36204,50	1,61
19	369,74	587,73	5772,65	8,86	151,71	36204,50	1,42
7	349,54	617,29	6983,50	8,90	183,53	36204,50	1,37
10	331,06	586,16	7252,74	8,96	190,61	36204,50	1,46
18	311,22	537,42	7222,52	8,98	189,82	36204,50	1,30
10	373,25	620,81	6303,55	9,08	165,66	36204,50	1,33
15	399,60	585,78	5087,13	9,17	133,70	36204,50	1,28
14	406,21	606,34	5200,07	9,20	136,66	36204,50	1,70
11	394,71	643,18	6069,30	9,27	159,51	36204,50	1,92
18	369,08	565,52	5765,13	9,34	151,51	36204,50	1,29
12	399,43	602,42	5441,98	9,40	143,02	36204,50	1,64
20	273,55	459,04	7823,98	9,52	205,62	36204,50	1,06
20	316,60	496,93	6578,70	9,52	172,90	36204,50	0,83
11	370,76	590,03	6213,23	9,53	163,29	36204,50	1,81
11	344,84	634,92	8075,57	9,60	212,24	36204,50	1,90
6	388,50	615,37	6079,17	9,62	159,77	36204,50	1,52

18	390,06	573,48	5449,08	9,66	143,21	36204,50	1,64
Celda	a (μm)	c (μm)	H Mpa	KIC Evans Mpa $\cdot\text{m}^{1/2}$	Hv	E (Mpa)	BI (KN/mm)
24	315,67	546,56	7785,44	9,71	204,61	36204,50	1,42
17	357,84	571,39	6497,80	9,75	170,77	36204,50	1,56
8	397,65	557,91	5084,96	9,76	133,64	36204,50	1,63
17	356,13	578,27	6690,04	9,76	175,82	36204,50	1,44
23	352,44	581,59	6916,80	9,80	181,78	36204,50	1,69

5.4 Análisis de resultados

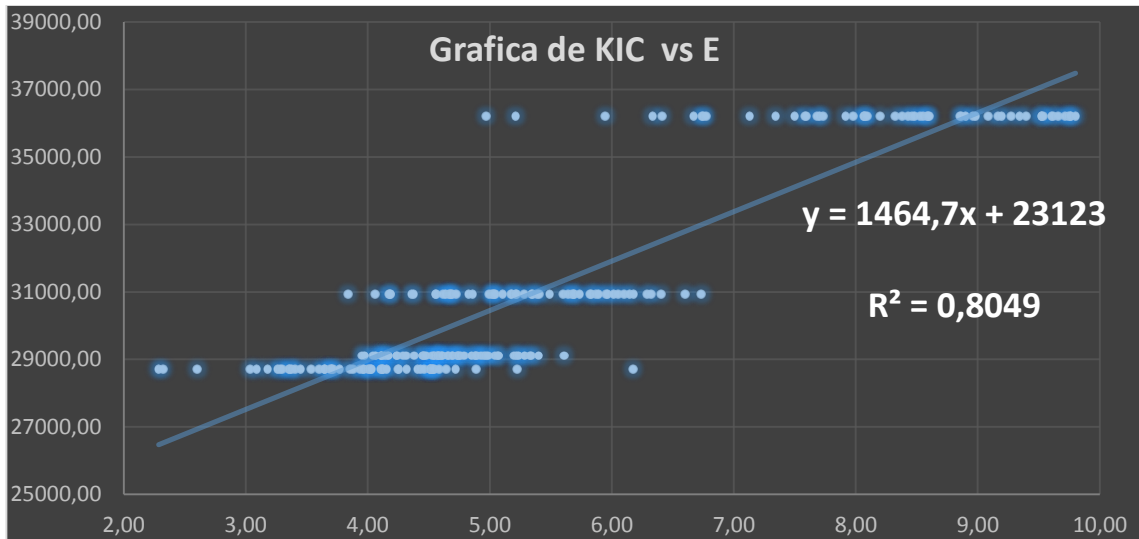
El análisis de los resultados incluye un estudio conjunto de los valores de la resistencia a la fractura (KIC) obtenidos, las características del grupo de muestras analizado y la relación de parámetros existente entre ellas.

Analizando los parámetros que relaciona la preparación de muestras y el tratamiento de los datos por métodos visuales, puede sugerir que las muestras pertenecientes a las formaciones de la luna y rosa blanca, a las cuales se les realizó el experimento y se tabularon en los resultados consiguen ser analizadas en un solo grupo de datos el cual muestra gran relación entre los parámetros calculados; no obstante algunos ensayos, no se tuvieron en cuenta en la tabla de resultados debido a que no se presentó una buena relación, entre los parámetros de preparación y tratamiento de datos, por ello los datos obtenidos a partir de estas generan errores significativos inclusive en algunos casos no fue posible obtener datos dado que las muestras generaban daños sistemáticos y destrucción de las mismas.

Para dar respuesta a la hipótesis planteada en esta investigación del diseño experimental se buscó algún tipo de relación entre los diferentes parámetros de KIC, E, BI y HV dando como resultado las siguientes relaciones con las cuales se logra determinar que dicha hipótesis es falsa y si hay relación entre estos parámetros

En la figura 45 se puede observar la fuerte relación lineal que presentan la KIC y el E, de donde se analiza que el comportamiento de estos dos parámetros es directamente proporcional, por lo tanto a un mayor valor del E habrá un incremento en el valor de la KIC.

Figura 45. Relación entre KIC Y E



Para mostrar la relación presente entre todos los parámetros conjuntamente se realizó un análisis multivariable donde se comprobó dicha relación.

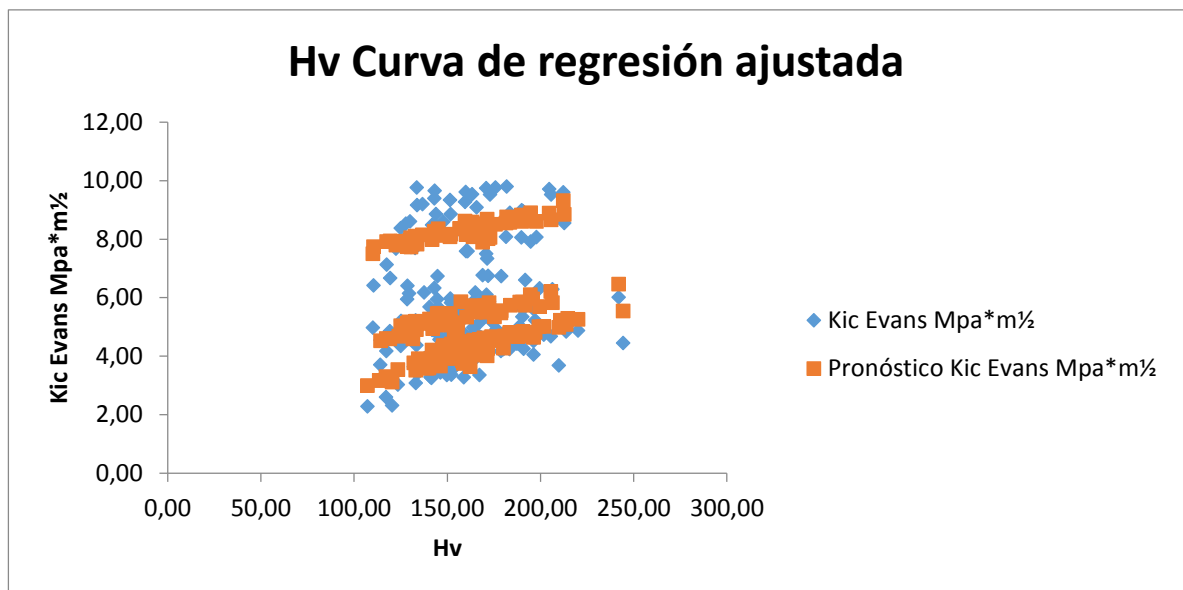
Tabla 9. Resumen relación multivariable de los parámetros de estudio

<i>Estadísticas de la regresión</i>					
Coefficiente de correlación múltiple	0,923768978				
Coefficiente de determinación R ²	0,853349125				
R ² ajustado	0,85134934				
Error típico	0,706846728				
Observaciones	224				
ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	639,6100424	213,2033475	426,7205077	2,147E-91
Residuos	220	109,9191053	0,499632297		
Total	223	749,5291477			
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
Intercepción	-15,3669182	0,67611815	-22,72815513	1,20078E-59	-16,6994156
Hv	0,013566328	0,001922843	7,05534792	2,21183E-11	0,00977678
E (Mpa)	0,00056686	1,60311E-05	35,36000223	1,03743E-92	0,00053527
BI (KN/mm)	0,674263614	0,183879187	3,666883802	0,000307908	0,31187348

Como se puede observar en la tabla anterior la relación entre los parámetros ya mencionados es muy fuerte lo que nos indica que en el momento de realizar una operación de fracturamiento es necesario tenerlos en cuenta para poder predecir de manera acertada el comportamiento de las fracturas inducidas.

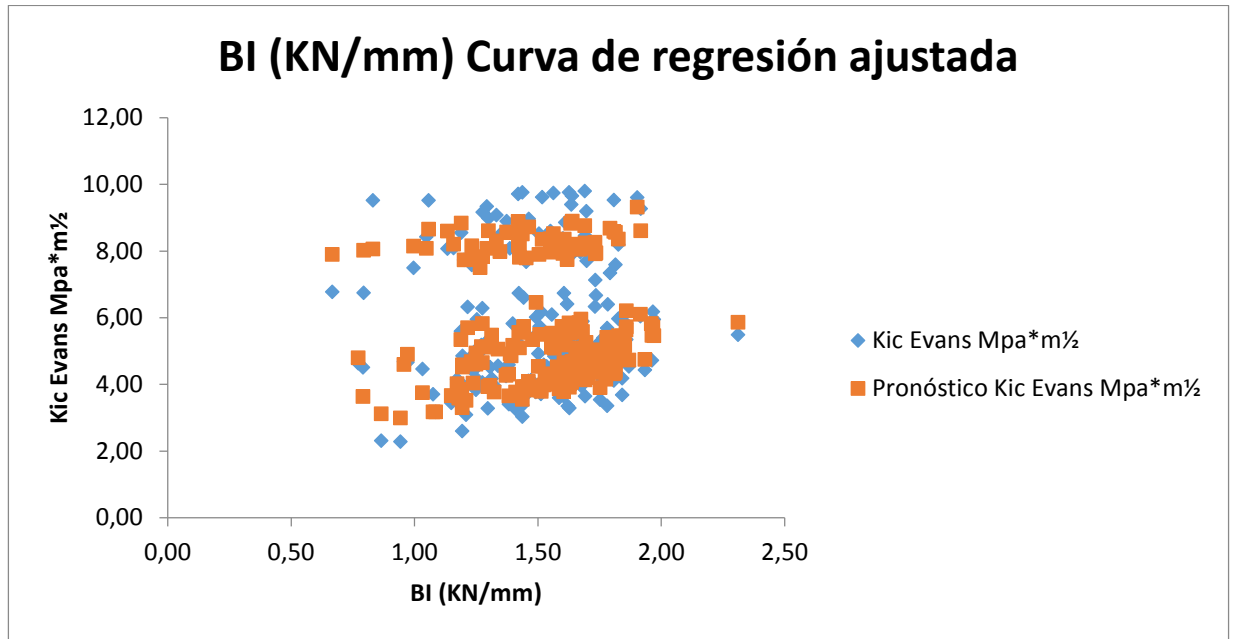
A continuación en la figura 46 se puede observar los valores del HV obtenidos en los experimentos y los valores del HV que se esperaban obtener a partir del pronóstico generado a partir del modelamiento estadístico.

Figura 46. Hv Curva de regresión ajustada



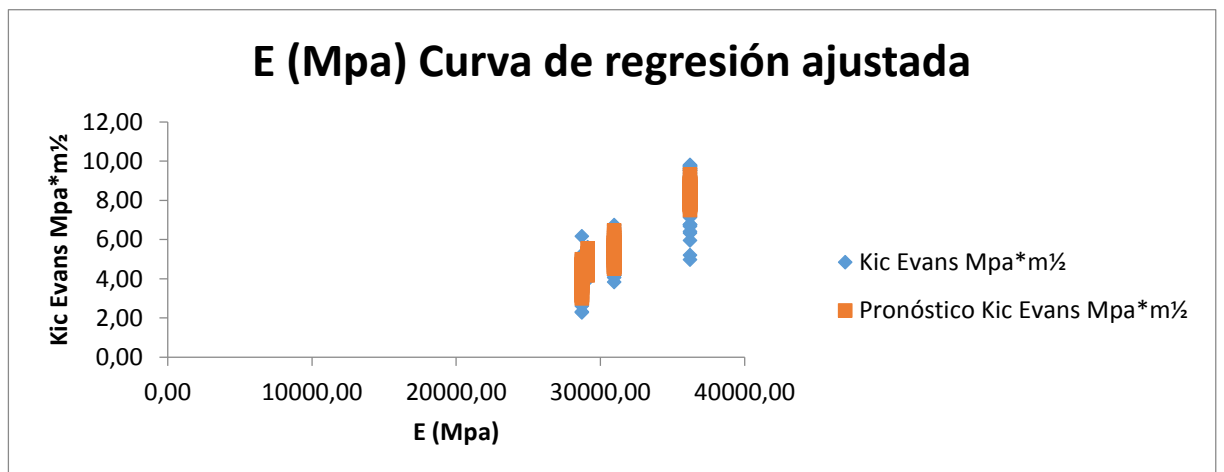
En la figura 47 se puede observar los valores del BI obtenidos en los experimentos y los valores del BI que se esperaban obtener a partir del pronóstico generado a partir del modelamiento estadístico, presentado un elevado valor de dispersión entre los dos datos.

Figura 47. BI Curva de regresión ajustada



En la figura 48 se puede observar los valores del E obtenidos en los experimentos y los valores del E que se esperaban obtener a partir del pronóstico generado a partir del modelamiento estadístico, presentando un valor muy bajo de dispersión entre los dos datos.

Figura 48. E Curva de regresión ajustada



De lo anterior se puede corroborar la relación multivariable que se encuentra en entre los parámetros KIC, BI, HV Y E.

además se observa en cada una de las imágenes cada parámetro con su respectivo pronostico dejando evidente que el módulo de Young es el parámetro con un comportamiento más lineal, en cambio el BI es el parámetro que presenta mayor desviación lo que indica la necesidad de analizar más parámetros para poder modelar mejor el comportamiento de este; aun así se puede observar, con estos parámetros que la resistencia a la fractura no es independiente de los demás al contrario se hace necesario para el estudio de este, analizar los demás parámetros y cuantificar la relación existente entre estas para poder predecir con mayor precisión el crecimiento de una fractura.

6. CONCLUSIONES

1. La resistencia a la fractura es una de los parámetros más importantes cuando son elaboradas 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, antes de que una fractura se propague a través de este.
2. De cada una de las técnicas que se examinaron para la determinación de la resistencia a la fractura mediante pruebas de laboratorio; a partir de un análisis de los principales parámetros de las diferentes pruebas se llegó a la conclusión que el método más adecuado es el método indentación por fractura. Este método fue elegido debido a su practicidad, ya que permite la determinación de la resistencia a la fractura de una manera rápida, económica, confiable a partir de un equipo de laboratorio básico.
3. En base a los resultados de las pruebas realizadas en el patrón metálico de dureza Vickers, se pudo comprobar la confiabilidad del proceso metodológico escogido; los valores de resistencia a la fractura obtenida 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.
4. Los valores de resistencia a la fractura obtenidos mediante este proceso metodológico pueden ser estimados conservadores para efectos de tratamiento de datos.
5. Se pudo probar la relación existente entre las diferentes variables de estudio. No obstante también se observan pequeñas desviaciones generadas por el valor de incertidumbre provocado por el observador a la hora de leer las grietas inducidas en las muestras.
6. La relación más fuerte generada entre los parámetros de estudio la presentaron el módulo de Young y la resistencia a la fractura.

7. RECOMENDACIONES

1. La aplicación de cualquier método para la determinación de la resistencia a la 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 transcendental 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. Para optimizar el tiempo de la preparación de muestras es necesario que la geometría utilizada para estas sea una muy sencilla y fácil de reproducir.
4. En el tratamiento de datos a través de imágenes es de vital importancia desarrollar una metodología más eficiente y sin rango de error alto en el momento de leer las grietas generadas en las muestras.
5. Teniendo en cuenta que en pozos horizontales, se dispone de solo rípios de perforación, ya que no se realizan corazonamientos, es posible aplicar esta metodología a muestras en diferentes tamaños de roca y así determinar si hay alguna diferencia de la resistencia a la fractura en las distintas muestras.

8. BIBLIOGRAFIA

AMOROCHO, CLAUDIA proceso metodológico para la determinación de tenacidad de fractura en areniscas. Bucaramanga, 2008, 148 h. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander Facultad Fisicoquímica.

ASTM C1327-99 Estándar Test Method for Fracture Toughness at Room Temperature of advanced Ceramics, Annual Book of ASTM.

ASTM E 384-11, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, Annual Book of ASTM.

FJAER, ELVHES. Petroleum Related Rock Mechanics. En: revista DEVELOPMENTS IN PETROLEUM SCIENCE No. 5 (Noviembre de 1996). P. 13-15.

MEJIA O, Vickers hardness En Society of Petroleum Engineers SPE 799 2007. P 4-7.

MONTGOMERY, DOUGLAS. Diseño y análisis de experimentos en México 2004. P59-73.

PALENCIA, Miguel. Diseño y construcción de un banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura para el laboratorio de mecánica de rocas del instituto colombiano del petróleo. Bucaramanga, 2009, 169h. Trabajo de grado (ingeniero mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánica.

ROCHA, Enrique. Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture: Cracking modes and the concept of fracture toughness (KIC) En: ingenierías. Mayo de 2008. P 12-14.

S. MEHRAN HOSSEINI, On the Linear Elastic Fracture Mechanics Application in Barnett Shale Hydraulic Fracturing 1991. P 2-5.

