

**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**

**MIGUEL FERNANDO PALENCIA MUÑOZ  
SERGIO FERNANDO CELIS ARIZA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**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**

**MIGUEL FERNANDO PALENCIA MUÑOZ  
SERGIO FERNANDO CELIS ARIZA**

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

**Director**

**M.Sc. PEDRO JOSÉ DÍAZ GUERRERO  
Ingeniero Mecánico**

**Codirector**

**JENNY MABEL CARVAJAL JIMÉNEZ  
Ingeniera de Petróleos**

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

**2009**

## DEDICATORIA

*A Dios que siempre me ha iluminado en este proceso.*

*A mis padres Miguel y Olga, a mi hermana Zulenny, a mi novia Laura y a todos mis familiares, por su amor, apoyo incondicional, por creer en mí y animarme a seguir adelante. Los quiero mucho.*

*Gracias*

*Miguel Fernando Palencia Muñoz*

## DEDICATORIA

A Dios por ser mi fortaleza y mi guía, por llevarme de la mano en cada una de las metas que me he propuesto.

A mis padres Mery y Gonzalo por que sin su apoyo, comprensión e incondicional amor no hubiera podido conseguir este logro, que no es mío, sino de ellos en realidad. Porque les debo todo lo que yo soy.

A mis hermanos Gineth, Oscar y Paulita, porque son la motivación más grande para salir adelante, por ser mis compañeros y amigos en todo momento.

Sergio Celis

## **AGRADECIMIENTOS**

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

A la líder del laboratorio de mecánica de rocas del ICP, Ingeniera Jenny Carvajal por su apoyo y disposición, de igual manera al Ingeniero Jorge Galvis por su orientación durante el proyecto, a Eric Cifuentes y Juan Carlos Torres por la colaboración prestada en el laboratorio.

Al profesor Pedro Díaz por la colaboración y orientación durante el desarrollo de la tesis.

Al laboratorio de muestras geológicas del instituto colombiano del petróleo, al ingeniero Luis Fernando Peña, a los técnico Fernando Anaya y Jimmy por su desinteresada colaboración en el proceso de fabricación de las muestras.

Al profesor Jorge Meneses por la colaboración y orientación durante el proceso de mecanización en el laboratorio de FMS.

A los profesores de la UIS y a todo el personal de la escuela de ingeniería mecánica que de una u otra forma ayudaron en la realización de este proyecto.

A los amigos, compañeros y familiares que nos brindaron respaldo, confianza y apoyo.

## TABLA DE CONTENIDO

Pag.		
	INTRODUCCIÓN.....	1
	1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO .....	4
	1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	4
	1.1.1 Objetivos Generales .....	4
	1.1.2 Objetivos Específicos .....	4
	1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	6
	1.2.1 Identificación del problema .....	6
	1.2.2 Justificación para solucionar el problema .....	7
	1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	8
	2. GENERALIDADES.....	10
	2.1 MECÁNICA DE LA FRACTURA DE LA ROCA.....	10
	2.1.1 Modos de desplazamiento de la línea de la grieta.....	11
	2.1.2 Crecimiento Subcrítico de la Grieta.....	12
	2.2 CRECIMIENTO CRÍTICO DE LA GRIETA: PRUEBA DE DUREZA DE LA FRACTURA. ....	14
	2.2.1 Dureza de la fractura .....	15
	3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL ENSAYO DE DOBLE TORSIÓN PARA MEDIR EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA.....	18
	3.1 PRINCIPIO DE LA PRUEBA DE LA DOBLE TORSIÓN .....	18
	3.2 MODELO DE FRACTURAS DE ORIGEN SUBCRÍTICO.....	19
	3.2.1 Procedimiento experimental .....	20

4. DISEÑO PRELIMINAR.....	25
4.1 CALCULO DE FUERZA DE FRACTURAMIENTO.....	25
4.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	26
4.3 MÓDULOS DEL EQUIPO.....	27
4.3.1 Modulo Estructural.....	30
4.3.2 Modulo de medición.....	31
4.3.3 Modulo de desplazamiento.....	33
4.3.4 Modulo de Acoples.....	34
4.3.5 Modulo de adquisición de datos.....	36
4.4 SELECCIÓN DE LOS PIES NIVELADORES.....	38
5. VALIDACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS.....	41
5.1 Análisis.....	41
6. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS.....	45
6.1 MODULO ESTRUCTURAL.....	45
6.1.1 Placa superior.....	47
6.1.2 Placas laterales.....	48
6.1.3 Placa Base.....	50
6.2 MODULO DE ACOPLE.....	51
7. PROTOCOLOS DE ENSAYOS REQUERIDOS PARA LA PRUEBA.....	54
7.1 PROTOCOLO PARA CORTE Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	54
7.1.1 Material base para extraer la muestra.....	56
7.1.2 Elementos de sujeción para preparación de muestras.....	58
7.1.3 Estrategia para corte y preparación de muestras.....	61

7.2	PROTOCOLO PARA CALIBRAR LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	68
7.2.1	Ajuste y puesta a punto del micrómetro digital.....	68
7.2.2	Ajuste y caracterización de la celda de carga .....	75
7.3	PROTOCOLO PARA EL PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE DOBLE TORSIÓN.....	82
8.	HERRAMIENTA SOFTWARE EN OPTO 22 PARA DETERMINAR EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA.....	84
8.1	PROGRAMACIÓN EN OPTO-22 .....	84
8.2	CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN .....	87
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS .....	90
9.1	PRUEBA N°1.....	90
9.2	PRUEBA N°2.....	94
9.3	PRUEBA N°3.....	97
9.4	RESULTADOS OBTENIDOS DE OTRAS PRUEBAS .....	102
10.	ESPECIFICACIONES GENERALES DEL EQUIPO.....	106
10.1	FICHA TÉCNICA .....	106
10.2	MÓDULOS DEL EQUIPO.....	106
10.3	ENSAMBLE DEL EQUIPO .....	109
10.4	PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO .....	114
10.4.1	Sistema de medición.....	114
10.4.2	Sistema de desplazamiento.....	115
10.4.3	Condiciones ambientales de operación.....	115
10.4.4	Módulos restantes del equipo .....	115
	CONCLUSIONES.....	116
	RECOMENDACIONES .....	118

BIBLIOGRAFÍA.....	119
ANEXOS .....	121
ANEXO A.....	122
ANEXO B.....	125
ANEXOS C .....	131
ANEXOS D .....	134

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Tres modos básicos de fractura.....	11
<b>Figura 2.</b> Tres diferentes regiones de propagación de la grieta .....	13
<b>Figura 3.</b> Modulo de carga .....	19
<b>Figura 4.</b> Diagrama esquemático del ensayo de la doble torsión.....	19
<b>Figura 5.</b> Forma y dimensiones de la muestra .....	19
<b>Figura 6.</b> Comportamiento de la fuerza respecto al tiempo.....	23
<b>Figura 7.</b> Montaje de la Prueba de Doble Torsión .....	25
<b>Figura 8.</b> Probeta de ensayo para calcular la fuerza de fracturamiento.....	26
<b>Figura 9.</b> Módulos del Banco de Pruebas .....	28
<b>Figura 10.</b> Componentes del banco de pruebas .....	29
<b>Figura 11.</b> Esquema de la estructura. ....	30
<b>Figura 12.</b> Celda de carga tipo S .....	32
<b>Figura 13.</b> Micrómetro digital. ....	33
<b>Figura 14.</b> Esquema acople celda de carga-micrómetro .....	35
<b>Figura 15.</b> Esquema dispositivo para aplicar presión sobre la probeta.....	35
<b>Figura 16.</b> SNAP PAC I/O unit.....	36
<b>Figura 17.</b> Componentes del SNAP PAC I/O units.....	37

<b>Figura 18.</b> Montaje del modulo de adquisición de datos del equipo .....	37
<b>Figura 19.</b> Características del tornillo nivelador - catalogo “HAFELE” .....	39
<b>Figura 20.</b> Tornillos niveladores .....	39
<b>Figura 21.</b> Esquema de los requerimientos de diseño .....	40
<b>Figura 22.</b> Corte de las piezas.....	46
<b>Figura 23.</b> Alineación de la placa superior. ....	48
<b>Figura 24.</b> Placa superior .....	48
<b>Figura 25.</b> Caras de desbastado de las placas laterales.....	49
<b>Figura 26.</b> Placa lateral.....	50
<b>Figura 27.</b> Placa Base.....	51
<b>Figura 28.</b> Modulo estructural.....	51
<b>Figura 29.</b> Acople celda de carga y dispositivo de presión. ....	52
<b>Figura 30.</b> Banco de pruebas ensamblado .....	53
<b>Figura 31.</b> Pulidor de Caras EFG-450.....	55
<b>Figura 32.</b> Sierra de precisión ISOMET 1000.....	55
<b>Figura 33.</b> Cortadora LAPRO del laboratorio de muestras geológicas. ....	56
<b>Figura 34.</b> Plugs de 1.5pulg de diámetro.....	57
<b>Figura 35.</b> Cortes longitudinales hechos en el plug.....	57
<b>Figura 36.</b> Secciones rocas extraídas del plug de (70mmx30mmx12mm)	57

<b>Figura 37.</b> Elemento para cortar el largo de la muestra.....	58
<b>Figura 38.</b> Elemento para cortar el ancho de la muestra.....	59
<b>Figura 39.</b> Foto de los dos elementos mencionados anteriormente .....	59
<b>Figura 40.</b> Elemento para reducir espesor de la muestra.....	59
<b>Figura 41.</b> Elemento para pulir y reducir espesor de la muestra.....	60
<b>Figura 42.</b> Elemento para pulir montado sobre la pulidora de caras .....	60
<b>Figura 43.</b> Piezas que conforman el dispositivo para hacer la entalla.....	61
<b>Figura 44.</b> Líneas de corte marcadas sobre la muestra. ....	62
<b>Figura 45.</b> Elemento para cortar el largo de la muestra.....	62
<b>Figura 46.</b> Elemento para cortar el ancho de la muestra.....	62
<b>Figura 47.</b> Montaje del elemento para reducir el espesor de la muestra ...	63
<b>Figura 48.</b> Montaje para cortar laminas de roca-espesores 2.5mm y 3mm .....	64
<b>Figura 49.</b> Laminas de roca- dimensiones (63.5mmx25.4mmx2.5mm) .....	64
<b>Figura 50.</b> Proceso de pulido de láminas de roca-dispositivo para pulir ....	64
<b>Figura 51.</b> Muestra con sus dimensiones finales (63.5mmx25.4mmx2mm) .....	65
<b>Figura 52.</b> Montaje de muestra en dispositivo para hacer la entalla.....	65
<b>Figura 53.</b> Muestra con sus dimensiones finales (63.5mmx25.4mmx2mm) .....	66

<b>Figura 54.</b> Micrómetro digital MITUTOYO .....	68
<b>Figura 55.</b> Bloques galga para referenciar el punto cero del micrómetro ..	70
<b>Figura 56.</b> Componentes y herramientas del para micrómetro. ....	71
<b>Figura 57.</b> Micrómetro de profundidades digital. ....	72
<b>Figura 58.</b> Ejemplo de estructura para calibración de celda .....	75
<b>Figura 59.</b> Icono para configurar la máquina de control.....	77
<b>Figura 60.</b> Ventana auxiliar que aparece para configurar o crear la máquina de control.....	77
<b>Figura 61.</b> Ventana auxiliar para configurar nombre y dirección IP de la máquina de control.....	77
<b>Figura 62.</b> Menús para crear las variables numéricas del programa.....	78
<b>Figura 63.</b> Ventana auxiliar para configurar y editar una variable numérica .....	78
<b>Figura 64.</b> Ventana para configura unidades de entrada o salida.....	78
<b>Figura 65.</b> Selección del modulo de control a usar .....	79
<b>Figura 66.</b> Puntos creados que se usaran en el modulo SNAP-AIMA-8....	79
<b>Figura 67.</b> Programación en Optoscript.....	80
<b>Figura 68.</b> Carta powerup en PAC Control Basic.....	85
<b>Figura 69.</b> Carta programa en PAC Control Basic. ....	85
<b>Figura 70.</b> Configuración carta powerup. ....	86

<b>Figura 71.</b> Código del programa. ....	86
<b>Figura 72.</b> Código para tablas, toma de datos y contador.....	87
<b>Figura 73.</b> Carta programa en PAC Control Basic.....	87
<b>Figura 74.</b> Código de estructura de control.....	88
<b>Figura 75.</b> Código para hallar el factor de intensidad de esfuerzos.....	89
<b>Figura 76.</b> Código para determinar la velocidad de propagación.....	89
<b>Figura 77.</b> Calculo Kcritico y Vcritico.....	89
<b>Figura78.</b> Código para determinar el ISF .....	89
<b>Figura 79.</b> Valores obtenido para el ISF durante la corrida del programa.	89
<b>Figura 80.</b> Muestra antes de la prueba .....	90
<b>Figura 81.</b> Montaje de la muestra sobre el quipo.....	91
<b>Figura 82.</b> Muestra después de la prueba.....	92
<b>Figura 83.</b> Grafica $K_i$ vs tiempo, prueba N°1 .....	93
<b>Figura 84.</b> Grafica carga vs tiempo, prueba N°1 .....	93
<b>Figura 85.</b> Fotos de la muestra antes del ensayo N°2 .....	94
<b>Figura 86.</b> Foto de la muestra después del ensayo N°2.....	96
<b>Figura 87.</b> Grafica $K_i$ vs tiempo, prueba N°2.....	96
<b>Figura 88.</b> Grafica Carga vs tiempo, prueba N°2 .....	97
<b>Figura 89.</b> Foto de la muestra antes del ensayo N°3 .....	98

<b>Figura 90.</b> Foto de la muestra después del ensayo N°3.....	101
<b>Figura 91.</b> Grafica Ki vs tiempo, prueba N°3.....	101
<b>Figura 92.</b> Grafica Carga vs tiempo, prueba N°3 .....	102
<b>Figura 93.</b> Muestra ensayada.....	103
<b>Figura 94.</b> Muestra ensayada.....	103
<b>Figura 95.</b> Muestra ensayada.....	104
<b>Figura 96.</b> Muestra ensayada.....	104
<b>Figura 97.</b> Placa superior. A) Vista superior; B) Vista inferior .....	106
<b>Figura 98.</b> Tornillos M8,5X1,25 .....	107
<b>Figura 99.</b> Varilla de medición del micrómetro digital.....	107
<b>Figura 100.</b> Micrómetro Digital .....	107
<b>Figura 101.</b> Acople celda – Micrómetro digital A) Tornillo 1/4" B) Rodamientos de bolas.....	107
<b>Figura 102.</b> Placa Base .....	107
<b>Figura 103.</b> Placas Laterales A) Vista lateral; B) Vista superior.....	108
<b>Figura 104.</b> Placa para fijar el micrómetro a la celda de carga. A) Vista isométrica; B) Vista Frontal.....	108
<b>Figura 105.</b> Niveladores .....	108
<b>Figura 106.</b> Guía para encajar la muestra - lateral .....	108

<b>Figura 107.</b> Guías para encajar la muestra.....	109
<b>Figura 108.</b> Celda de carga. A) Vista superior; B) Vista isométrica .....	109
<b>Figura 109.</b> Ensamble placa laterales-placa base .....	110
<b>Figura 110.</b> Modulo estructural.....	110
<b>Figura 111.</b> Modulo estructural-Niveladores .....	110
<b>Figura 112.</b> Modulo estructural - Micrómetro digital.....	111
<b>Figura 113.</b> Acople celda de carga con micrómetro digital.....	111
<b>Figura 114.</b> Micrómetro instalado – acople celda de carga con micrómetro .....	112
<b>Figura 115.</b> Micrómetro digital unido al modulo estructural.....	112
<b>Figura 116.</b> Modulo estructural – Modulo sistema de desplazamiento – Modulo Sistema de medición .....	112
<b>Figura 117.</b> Dispositivo para aplica presión .....	113
<b>Figura 118.</b> Guías para encajar la muestra.....	113
<b>Figura 119.</b> Banco de pruebas ensamblado .....	114

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Dimensiones de las probetas .....	5
<b>Tabla 2.</b> Ejemplos de pruebas para determinar la dureza de la fractura....	16
<b>Tabla 3.</b> Dimensiones de probeta para el cálculo de la fuerza de fracturamiento. ....	26
<b>Tabla 4.</b> Calculo por flexión de la placa superior .....	42
<b>Tabla 5.</b> Calculo de pandeo de las placas laterales .....	42
<b>Tabla 6.</b> Calculo por flexión de la placa base.....	43
<b>Tabla 7.</b> Formato del protocolo para el corte y preparación de la muestra	67
<b>Tabla 8.</b> Protocolo para la calibración del micrómetro digital .....	74
<b>Tabla 9.</b> Formato para la calibración de celda de carga tipo S .....	81
<b>Tabla 10.</b> Formateo del protocolo para el procedimiento de la prueba de doble torsión.....	83
<b>Tabla 11.</b> Toma de datos prueba N° 1 .....	91
<b>Tabla 12.</b> Datos de las prueba N°2.....	94
<b>Tabla 13.</b> Datos de las prueba N°3.....	98
<b>Tabla 14.</b> Datos de ensayo.....	103
<b>Tabla 15.</b> Datos de ensayo.....	103
<b>Tabla 16.</b> Datos de ensayo.....	104

**Tabla 17.** Datos de ensayo..... 104

**Tabla 18.** Ficha técnica del banco de pruebas ..... 106

## RESUMEN

### TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MEDIR EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS PARA EL INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO\*

### AUTOR:

Miguel Fernando Palencia Muñoz\*\*  
Sergio Fernando Celis Ariza

### PALABRAS CLAVES:

Arenisca, Índice Subcrítico de Fractura (ISF), dureza de fractura.

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es el diseño y construcción de un banco de pruebas para medir el Índice Subcrítico de Fractura. Dicha necesidad se debe a que no existe en el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo un equipo que permita medir la dureza de la fractura en rocas (tipo arenisca) y a su vez medir el Índice Subcrítico de Fractura, con el fin de caracterizar las formaciones fracturadas de origen natural en Colombia. Todo esto con el propósito de reducir costos de perforación ocasionados por problemas de inestabilidad durante las perforaciones en el *pedemonte llanero*<sup>†</sup>.

Dadas las razones mencionadas anteriormente, se construye un banco de pruebas para la medición del ISF, implementando la prueba de doble torsión<sup>‡</sup>, utilizando una celda de carga tipo S para medir y aplicar la fuerza de compresión que se ejerce sobre la probeta, la celda esta acoplada a un micrómetro digital el cual intensifica la carga. Las variables medidas (desplazamiento y magnitud de la carga) se llevan a un PC para calcular el ISF por medio de un programa realizado en el software opto 22. El banco cuenta con especificaciones de excelente rigidez, facilidad en el montaje, estable bajo condiciones de operación y puede ser transportado a cualquier lugar ya que es liviano.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Universidad Industrial de Santander y el Instituto Colombiano de Petróleo, Facultad de Ciencias Físico- Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. Pedro José Díaz Guerrero. Codirector Ing. Jenny Mabel Carvajal Jiménez.

<sup>†</sup> Información suministrada por el grupo de investigación en Estabilidad de Pozo, [www.wellborestability.org](http://www.wellborestability.org)

<sup>‡</sup> Tomado del artículo Modelamiento de elementos discretos del comportamiento de la fractura en la roca. Por Namsu Park, PhD the University of Texas at Austin, 2006.

## **ABSTRACT:**

### **TITLE:**

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN EQUIPMENT TO MEASURE THE SUBCRITICAL FRACTURE INDEX FOR LABORATORY OF ROCK MECHANICS OF COLOMBIAN PETROLEUM INSTITUTE\*

### **AUTHORS:**

Miguel Fernando Palencia Muñoz\*\*  
Sergio Fernando Celis Ariza

### **KEY WORDS:**

Sandston, Subcritical Fracture Index (SFI), Fracture Toughness.

### **DESCRIPTION:**

The aim of this work is to design and to build equipment to measure the subcritical fracture index. The importance of this project is due to the fact that in the Laboratory of Rock Mechanics of Colombian Petroleum Institute (CPI) there is not any apparatus to evaluate properties such as fracture toughness of sandstone rocks, which is essential to the characterization of naturally fractured field. Furthermore, the purpose is to reduce perforation costs of unstable operations in llanos foothills basin – Colombia (*Piedemonte Llanero*).

Because of previously mentioned reasons, it was build an equipment to make (SFI) measurements by the double torsion test (DT)<sup>§</sup>. In this analysis, a S load cell was used to determine the applied force on the sample. The load cell was connected to a digital micrometer to intensify the load. The measured variables (spacing and load magnitude) were the input of Opto 22 software to calculate the SFI. The equipment has shown excellent stiffness performance, is easily set up, stable under operation conditions and can be moved to wherever because this is compact.

---

\* Degree Work

\*\* Industrial University of Santander and Colombian Petroleum Institute. Faculty of Physiomechanical Engineerings, School of Mechanical Engineering. Director M.Sc. Pedro José Díaz. Codirector Ing. Jenny Mabel Carvajal Jimenez

§ Discrete element model of the behavior of the fracture in the rock. For Namsu Park, PhD The University of Texas at Austin, 2006

## INTRODUCCIÓN

En el campo de la industria petrolera es importante comprender la mecánica de la fractura en la roca (tipo arenisca) antes de la perforación de los pozos de petróleo y gas, debido a que se debe garantizar su integridad y estabilidad. Existen problemas en los experimentos de laboratorio debido a las siguientes dificultades: recoger y analizar muestras débilmente cementadas, analizar individualmente las propiedades petrofísicas y llevar los problemas que surgen en el campo a escala de laboratorio.

Debido a estas razones, es de vital importancia estudiar las propiedades mecánicas de la fractura en rocas que no han sido consolidadas y que son jóvenes geológicamente. Hoy en día se está dando gran importancia al estudio de la caracterización de formaciones fracturadas de manera natural en Colombia, las cuales han sido sometidas a través del tiempo a cargas cíclicas que han ocasionado fracturas que tienden a propagarse a valores de intensidad de esfuerzos menores a los críticos, fenómeno conocido como "*crecimiento subcrítico de la fractura*".

Se puede determinar en experimentos de laboratorio un índice subcrítico de fractura, el cual es una medida del crecimiento subcrítico de la grieta y está influenciado por propiedades petrofísicas tales como: tipo de cemento, volumen, porosidad y tamaño de grano. Este índice es un parámetro que permite saber antes y durante la perforación si la formación en la que se está trabajando es susceptible a fracturarse o se encuentra fracturada. De allí surge la necesidad para el Instituto Colombiano del petróleo el construir un equipo para determinar este índice.

El presente trabajo de grado “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”, tiene por interés diseñar y construir para el Instituto Colombiano del Petróleo una herramienta útil para medir un parámetro que ayude a predecir cuándo una formación natural es susceptible a fracturarse o se encuentra fracturada.

Para facilitar la comprensión y organización del contenido este trabajo fue dividido en los siguientes capitulos:

El capitulo 1 presenta las especificaciones del proyecto, los objetivos generales y específicos, incluye la identificación del problema y la justificación para la solución.

El capitulo 2 se muestran las generalidades del comportamiento de la fractura en rocas.

El capitulo 3 contiene el modelo matemático el ensayo de doble torsión, los parámetros que rigen esta prueba, el modelo de fracturas de origen subcrítico y el procedimiento experimental para determinar el ISF.

El capitulo 4 contiene la determinación de la carga de fracturamiento, la selección de los diferentes instrumentos de medición utilizados en el banco de pruebas y los módulos que conforman este equipo.

En el capítulo 5 se hace referencia al análisis estructural del banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura.

El capitulo 6 describe el proceso de fabricación de los módulos estructural y de acoples, se hace una descripción detallada sobre el mecanizado de cada pieza.

El capítulo 7 describe los protocolos de ensayos requeridos para la prueba como corte y preparación de la muestra, calibración de los instrumentos de medición y procedimiento de la prueba.

El capítulo 8 hace una descripción de la herramienta software en opto-22, su configuración y código de programación.

El capítulo 9 trata del análisis de resultados a los ensayos realizados en muestras de roca formación tambor.

El capítulo 10 presenta las especificaciones generales del equipo, así como el proceso que se debe tener para ensamblar los módulos y el mantenimiento que se debe realizar al banco.

# 1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

## 1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO

### 1.1.1 Objetivos Generales

1. Contribuir y dar continuidad a las relaciones existentes entre la Universidad Industrial de Santander y el Instituto Colombiano del Petróleo, a través de los convenios de investigación establecidos con el propósito de aportar al desarrollo científico para las instituciones.
2. Crear un espacio para el desarrollo de nuevos proyectos relacionados con el mejoramiento tecnológico del sector industrial, con el propósito de generar investigación en las áreas de caracterización y comportamiento de fracturas en los yacimientos del país.
3. Hacer efectiva y práctica la misión de la Universidad Industrial de Santander, comprometida con la generación y adecuación de conocimientos que permitan adaptar la tecnología existente a nuestro entorno así como mejorar la funcionalidad de los diseños.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura en rocas tipo arenisca (almacenadoras de hidrocarburos), con las siguientes características:
  - ✓ El peso total del equipo debe ser inferior a 50 kg.
  - ✓ Ser modular y portable con el propósito de facilitar al operario el transporte e instalación del equipo.

- ✓ Garantice estabilidad bajo condiciones de operación.
- ✓ Tener capacidad para trabajar con muestras planas de sección delgada y forma rectangular con las siguientes dimensiones:

**Tabla 1.** Dimensiones de las probetas

	<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>
<b>Largo (mm)</b>	63,5-70	100-150
<b>Ancho (mm)</b>	24,5-30	80-100
<b>Espesor (mm)</b>	1,8-3	3-5

- ✓ La carga que se ejerce sobre la muestra debe tener una magnitud aproximadamente de 200 Lb y una rata de desplazamiento constante aproximadamente de 10  $\mu\text{m}/\text{minuto}$ .
- ✓ Garantizar la dirección vertical de la carga aplicada.
- Implementar el modelo matemático de la prueba de doble torsión<sup>1</sup> para determinar la dureza de la fractura y el índice subcrítico de fractura, con el fin de definir cuando una formación natural es susceptible a fracturarse por debajo de las condiciones de carga crítica.
- Desarrollar una herramienta software en OPTO 22<sup>2</sup>, que determine la dureza de la fractura, el índice subcrítico de fractura y la distribución de la densidad de la fractura en un medio sólido a través del modelo matemático de la prueba de doble torsión, que relaciona las

<sup>1</sup> Velocidad de propagación de la fractura,  $V = A * (K_I / K_{IC}) ^n$ ; Factor de intensidad de esfuerzos,  $K_I = P * W_m \sqrt{\frac{3}{W * d^3 * d_n * (1-\nu)}}$ ; Velocidad de la grieta,  $V = -\frac{C}{P^2} * \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)$ ;

<sup>2</sup> Software de automatización utilizado en el Instituto Colombiano del Petróleo.

dimensiones del espécimen con los datos adquiridos durante la prueba<sup>3</sup>, tales datos son: magnitud y desplazamiento de la carga aplicada.

- Desarrollar los protocolos de ensayo requeridos para la prueba: corte y preparación de la muestra, calibración de instrumentos de medición y procedimiento de la prueba, con base en la normativa ASTM D4543-08.
- Elaborar un artículo sobre el tema de investigación del proyecto.
- Realizar el montaje y puesta a punto del banco y el ensayo con base en la normativa **ASTM E4-07, ASTM D6026-06, ASTM D653-07f, ASTM D4543-08.**

## 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: 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

---

<sup>3</sup> Longitud de la grieta, magnitud y profundidad a la cual se aplica la carga. Ver anexos página 39, Tomado del artículo Modelamiento de elementos discretos del comportamiento de la fractura en la roca. Por Namsu Park, PhD the University of Texas at Austin, 2006.

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 fracturadas de manera natural como las ubicadas en el “*Piedemonte llanero*”, las cuales han sido sometidas a través del tiempo a cargas cíclicas que han ocasionado fracturas que tienden a propagarse a valores de intensidad de esfuerzos menores a los críticos, fenómeno conocido como “*crecimiento subcrítico de la fractura*”,

Evidenciada esta necesidad al interior del laboratorio de mecánica de rocas, se plantea el siguiente problema a solucionar: Implementar en dicho laboratorio el modelo de crecimiento subcrítico de la fractura, que relaciona la velocidad de propagación de la fractura con la intensidad de esfuerzos críticos en la roca, a través del diseño y construcción de un banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura.

### **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 construir este banco de pruebas se debe a que no existe un equipo en el laboratorio de mecánica de rocas que permita determinar la dureza de la fractura en las rocas y a su vez medir el índice subcrítico de

fractura, para caracterizar las formaciones fracturadas de origen natural en Colombia. Todo esto con el propósito de reducir costos de perforación ocasionados por problemas de inestabilidad durante las perforaciones<sup>4</sup> en el *pedemonte llanero*.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Con este trabajo de grado, se busca diseñar y construir un banco de pruebas para determinar el índice subcrítico de fractura en las formaciones fracturadas de manera natural ubicadas en el área del piedemonte llanero, con el propósito de mejorar el estudio y caracterización de estas, el cual es desarrollado por el *Instituto Colombiano del Petróleo*. Lo anterior dará origen a nueva línea de investigación relacionada con el diseño y construcción de equipos para medir el comportamiento de las fracturas en formaciones naturales durante la perforación de pozos para la extracción de hidrocarburos.

A modo de información, la importancia en determinar el índice subcrítico de fractura radica en que es un parámetro que puede indicar antes y durante una perforación si la formación sobre la cual se va a perforar es susceptible a fracturarse o se encuentra fracturada, además de predecir la densidad de las fracturas que pueden presentarse en la formación analizada.

Existen diversos equipos para determinar el índice subcrítico de fractura, los cuales basan su principio de funcionamiento en el ensayo de la doble torsión.

---

<sup>4</sup>Información suministrada por el grupo de investigación en Estabilidad de Pozo, [www.wellborestability.org](http://www.wellborestability.org)

Razón por la cual se tomara como referencia los parámetros de ensayo de esta prueba para el diseño del equipo.

La necesidad de diseño y construcción del equipo se da por la falta de soluciones que ofrece el mercado local, altos costos de fabricación y mantenimiento.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1 MECÁNICA DE LA FRACTURA DE LA ROCA

La Mecánica de Fractura Elástica Lineal (LEFM – SIGLAS EN INGLÉS) fue desarrollada para describir el crecimiento de la grieta y su relación con la falla del material. Está basada en la suposición de que las influencias de las cargas aplicadas sobre la extensión de la grieta pueden representarse en términos de ciertos parámetros que caracterizan la intensidad esfuerzo-fuerza cercana a la línea de la grieta. Griffith (1920) sugirió un criterio de fractura basado en el balance de energía en conexión con la teoría de inestabilidad, este criterio dice que en un cuerpo sometido a una condición arbitraria de carga, que se comporte de manera totalmente elástica y que contenga una grieta, la propagación de la grieta comenzará cuando la disminución de energía potencial elástica que experimente el cuerpo por unidad de espesor y por unidad de longitud de avance del vértice de la grieta, sea igual o mayor al incremento de energía superficial por unidad de espesor y por unidad de longitud de avance de la grieta que se producirá como consecuencia de la creación de las nuevas superficies debidas a dicha propagación<sup>5</sup>. Irwin (1957) modificó la teoría de Griffith debido a las dificultades que se encontraron en la medición de la energía de la fractura, y cambió este término por intensidad de esfuerzo<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Criterio de Griffith, Mecánica de Fractura Lineal Elástica

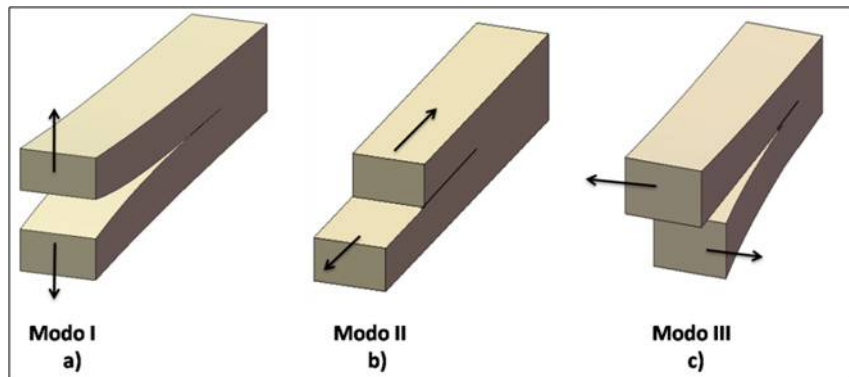
<sup>6</sup> Namsu Park, B.S., M.S.

La mayoría de los casos en la falla de materiales rocosos cuasi – frágiles es debido a la propagación de la grieta. La determinación de la dureza de la fractura y de otros parámetros de la mecánica de la roca es importante en el análisis total de la roca.

### 2.1.1 Modos de desplazamiento de la línea de la grieta

Diferentes configuraciones de carga en las líneas 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: a) Modo I o de abertura, b) Modo II o de deslizamiento y c) Modo III o de desgarre.

**Figura 1.** Tres modos básicos de fractura.



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

Un cuerpo agrietado puede ser sometido a cualquiera de estos tres modos, o combinación de dos o tres de ellos, siendo el modo I el más importante, especialmente en los sólidos frágiles.

### **2.1.2 Crecimiento Subcrítico de la Grieta**

En sistemas sujetos a carga de largo tiempo, las grietas tienden a propagarse a factores de intensidad de esfuerzo menores a la dureza de la fractura, a velocidades de diferente magnitud menores que la velocidad de ruptura. Este fenómeno es conocido como el crecimiento subcrítico de grieta<sup>7</sup>.

Según Wiederhorn (1967), identifico tres regiones donde se propaga el crecimiento de la grieta (figura 2). La región I está determinada o caracterizada por la fuerte dependencia de la velocidad de la grieta en el factor de intensidad de esfuerzo y por la alta energía de activación aparente. La mayor parte del crecimiento de la fractura ocurre en esta región previa a la falla catastrófica<sup>8</sup>. La velocidad de la grieta es controlada por la tasa de esfuerzo de corrosión en la línea de la grieta. En la región II la energía de activación aparente es menor que en la región I y la velocidad de propagación no depende del factor de intensidad de esfuerzo como ocurre en la región I, que está limitada por la tase de difusión de las especies activas en la línea de la grieta. En la región III, el crecimiento de la grieta está

---

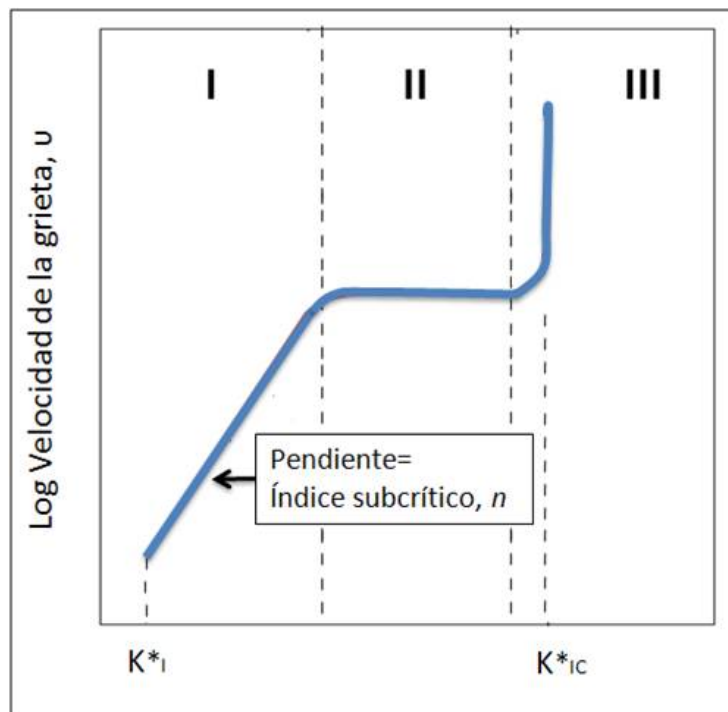
<sup>7</sup> Namsu Park, B.S., M.S.

<sup>8</sup> Pletka et al., 1979.

controlado principalmente por la ruptura mecánica y es relativamente poco sensible al ambiente químico<sup>9</sup>.

En rocas, el crecimiento subcrítico de la fractura ocurre entre el límite de esfuerzo de corrosión,  $K_{I}^*$ , y la dureza de la fractura,  $K_{IC}$ . Por debajo del límite de esfuerzo de corrosión, la concentración del esfuerzo en la línea de la grieta es muy baja para permitir el crecimiento subcrítico de la fractura. Cuando el factor de intensidad del esfuerzo alcanza la dureza de la fractura, el crecimiento de la grieta se vuelve inestable y al final la grieta se propaga a la velocidad de la ruptura<sup>10</sup>.

**Figura 2.** Tres diferentes regiones de propagación de la grieta



<sup>9</sup> Anderson and Grew, 1977; Wiederhorn, 1978; Atkinson, 1980; Freiman, 1984; Costin, 1987; Schultz, 2000

<sup>10</sup> Charles and Hiling, 1962

La Región I es dominada por corrosión de esfuerzo, esta región es controlada por el transporte de especies reactivas en la línea de la grieta y ruptura mecánica que ocurre en la región III. El crecimiento subcrítico de la fractura ocurre entre el límite de esfuerzo de corrosión,  $K_I^*$ , y la dureza de la fractura,  $K_{IC}$ . (Wiederhorn ,1967)

## **2.2 CRECIMIENTO CRÍTICO DE LA GRIETA: PRUEBA DE DUREZA DE LA FRACTURA.**

En rocas duras, la mecánica de fractura elástica lineal es generalmente usada para el análisis de la propagación de la fractura. En rocas débilmente cementadas y poco consolidadas, los mecanismos de propagación de la fractura pueden ser más complejos, involucrando deformación inelástica y falla de corte cercana a la línea. El comportamiento mecánico de los materiales granulares débilmente cementados está influenciado por la cantidad de cemento y por las características del cemento entre las partículas<sup>11</sup>. Por lo tanto, el estudio del efecto del cemento sobre el comportamiento de la fractura es esencial para el mejoramiento de la caracterización del reservorio.

En la ingeniería de petróleo, la dureza de la fractura es aplicada principalmente al área del fracturamiento hidráulico para el criterio de propagación de la grieta o para el mecanismo de contención<sup>12</sup>. La dureza de la fractura puede influenciar tanto en el tamaño y geometría de la fractura hidráulica.

---

<sup>11</sup> Bruno et al., 2001; Yu, 2001.

<sup>12</sup> Roegiers et al., 1987; Cleary, 1983; Rummel, 1987; Thiercelin et al, 1989

### 2.2.1 Dureza de la fractura

**Factor de intensidad de esfuerzo y dureza de la fractura.** En la mecánica de fractura elástica lineal, el factor de intensidad de esfuerzo del modo I,  $K^*_I$ , es una medida de la intensidad del campo de esfuerzo cercana a la línea de una grieta en un sólido elástico lineal. Se ha determinado que el factor de intensidad de esfuerzo para una fractura en un plano de deformación en dos dimensiones en un cuerpo infinito es una función de la carga, de la geometría de la grieta y de las condiciones limítrofes<sup>13</sup>:

$$K^*_I = \Delta\sigma_1 \sqrt{\pi^* a} \quad (1)$$

*Donde:*

$\Delta\sigma_1$  = Red que conduce el esfuerzo aplicado uniformemente a lo largo de la longitud de la grieta.

$a$  = Longitud media de la fractura.

La propagación crítica de la fractura ocurre cuando el factor de intensidad de esfuerzo es mayor que el valor crítico denotado por la dureza de la fractura,  $K_{IC}$ . La dureza de fractura del modo I es una propiedad del material que indica la resistencia a la propagación de la grieta.

La dureza de fractura puede medirse en el laboratorio y ha sido aplicada en muchas áreas de la ingeniería de rocas como criterio para la falla de tensión, como parámetro para la clasificación del material rocoso y como propiedad

---

<sup>13</sup> E.g., Lawn and Wilshaw, 1975; Pollard and Aydin 1988; Anderson, 1995

del modelamiento para la fragmentación de la roca como el fracturamiento hidráulico y la estimulación explosiva de pozos de gas<sup>14</sup>.

Existen diferentes ensayos para determinar la dureza en la fractura, en la siguiente tabla se mencionaran los más conocidos en la literatura:

**Tabla 2.** Ejemplos de pruebas para determinar la dureza de la fractura

Test Method		Referencia
<b>ACRB C</b>	Axial Cracked Bound Bar in Compression splitting	Kendall (1978)
<b>BDT</b>	Uncracked Brazilian Disc Test	Guo (1990)
<b>CB</b>	Chevron edge notched round bar in Bending	ISRM(1988)
<b>CCNB D</b>	Cracked Chevron Notched Brazilian Disc	ISRM (1995)
<b>CN3PB</b>	Single edge Chevron-Notched rectangular piate in 3 Point Bending	Wu (1984)
<b>CN4PB</b>	Single edge Chevron-Notched rectangular piate in 4 Point Bending	Munz et al. (1980)
<b>CNRB B</b>	Circumferentially Notched Round Bar in puré Bending	Bear (1976)
<b>CNRB E</b>	Circumferentially Notched Round Bar in Eccentric Loading	Bear (1976)
<b>CNRB T</b>	Circumferentially Notched Round Bar in Tensión	Brownetal. (1972) ,
<b>CS4PB</b>	Single edge Straight-through cracked rectangular piate in 4 Point Bending	Srawley and Gross (1976)
<b>CSCB D</b>	Central Straight-through Crack Brazilian Disc in diametral compression	Awaji and Sato(1978)
<b>CSTB D</b>	Cracked Straight Through Brazilian Disc	
<b>CT</b>	Compact specimen in Tensión	ASTM E399 (1997)
<b>DCB</b>	Double Cantilever Beam in splitting	Kanninen (1973)
<b>DT</b>	Double Torsión	Evans(1972)
<b>MRT</b>	Modified Ring Test	Thiercelin and Roegiers (1986)
<b>RCRT</b>	Radial Cracked Ring Test	Shiryaev and Kotkis (1982)
<b>RCT</b>	Round Compact disc in Tensión	ASTM E399 (1997)
<b>SC3PB</b>	Single edge straight through Cracked rectangular	ASTM E399 (1997)

<sup>14</sup> Sun and Ouchterlony, 1986; Whittaker et al, 1992

	plate in 3 Point Bending	
<b>SCB</b>	Semi-Circular Bending	Chong and Kurappu (1984)
<b>SCR3P</b>	Single edge straight through Cracked Round bar in 3 Point Bending	
<b>SECB</b>	Single Edge Cracked Beam b	ASTM E399 (1997)
<b>SECB D</b>	Single Edge Crack Brazilian Disc	Szendi-Horvath (1980)
<b>SENR B</b>	Single Edge Notched Round Bar in Bending	Bush (1976)
<b>SR</b>	Chevron notched Short Rod	ISRM (1988)
<b>WLCT</b>	Wedge Loaded Compact Tensión	Klepaczko (1979)

Según Park N, la prueba de doble torsión (DT) fue introducida por Kies y Clark (1969) como un método para determinar las velocidades de la grieta en función de la fuerza conductora. Esta prueba utiliza muestras pequeñas con una geometría sencilla y de fácil preparación. Con la cual se pueden obtener valores confiables de *dureza de fractura* y del *índice subcrítico de fractura*<sup>15</sup>. Por esta razón se implementa este ensayo en el banco de pruebas.

---

<sup>15</sup> Evans(1972)

### **3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL ENSAYO DE DOBLE TORSIÓN PARA MEDIR EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA.**

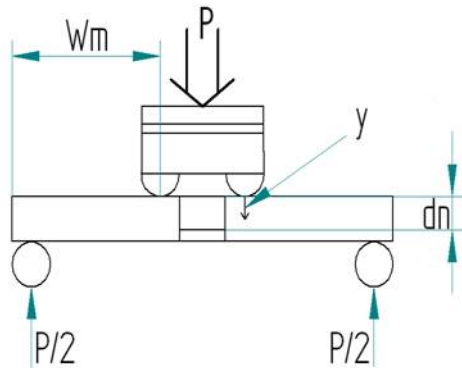
#### **3.1 PRINCIPIO DE LA PRUEBA DE LA DOBLE TORSIÓN**

El principio de funcionamiento de la prueba DT, se basa en aplicar una fuerza a compresión en una muestra plana delgada (ver figura 3), que tiene las siguientes dimensiones: 1,78 – 3 milímetros de espesor ( $d$ ), 25,4 – 38,1 milímetros de ancho ( $W$ ), y 63,5 – 76,2 milímetros de longitud ( $L$ ) (ver figura 3). Además de estas características, el espécimen tiene una muesca de 0,5 milímetros de espesor ubicada longitudinalmente en todo su centro para generar un concentrador de esfuerzo que guía la fractura a lo largo del centro de la probeta (Ver figura 5).

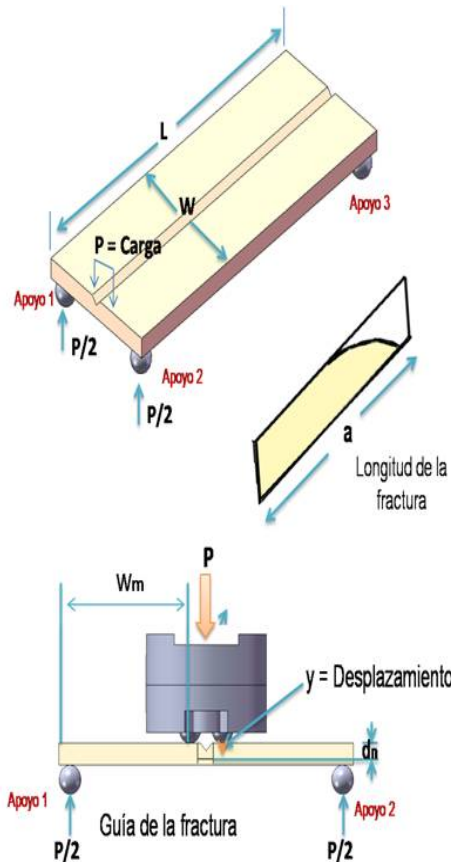
La muestra con las dimensiones previamente establecidas se ubica sobre cuatro puntos de apoyo espacialmente ubicados en los extremos de la muestra (Ver Figura 4), con el fin de generar un momento flector que guíe la fractura a través del concentrador de esfuerzos al aplicar una carga compresiva en dirección vertical sobre la muestra (Ver Figura 4).

La fuerza se aplica en el punto medio de un extremo de la muestra donde la línea de acción de la carga se intercepta perpendicularmente con la línea que une los apoyos 1 y 2 (Ver Figura 4).

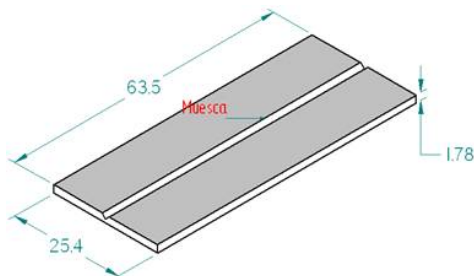
**Figura 3. Modulo de carga**



**Figura 4. Diagrama esquemático del ensayo de la doble torsión**



**Figura 5. Forma y dimensiones de la muestra**



### 3.2 MODELO DE FRACTURAS DE ORIGEN SUBCRÍTICO

El modelo geomecánico usado para predecir la fractura del subsuelo, se basa en el crecimiento del subcrítico fractura. En este caso, una fractura se propagara a la velocidad de ruptura, siempre que la intensidad de tensión ( $K_I$ ) en el instante de la fractura exceda la intensidad de tensión crítica ( $K_{Ic}$ ) del material.

Sin embargo, las fracturas pueden desarrollarse y propagarse a menores velocidades bajo largos periodos de estado de carga, incluso cuando la intensidad de tensión (**KI**) es menor que la intensidad de tensión crítica (**KIc**) del material.

Esta condición, en la cual la fractura se propaga a valores de (**KI**) < (**KIc**), es llamada crecimiento subcrítico de la fractura. La velocidad de propagación, V, para el crecimiento subcrítico de la grieta puede ser descrita por la relación empírica:

$$V = A * \left( \frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n \quad (2)$$

El índice subcrítico de fractura (n), es el exponente en la relación de ley entre la velocidad de propagación de la fractura (V), y el factor de intensidad de esfuerzos críticos en la roca ( $K_I / K_{IC}$ ):

$$V = A * \left( \frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n ; \text{Donde:}$$

V = Velocidad de propagación de la fractura

KI = Factor de intensidad de tensión

KIC = Factor de intensidad de tensión crítica (Dureza de la fractura)

A = velocidad crítica de propagación de la fractura (constante)

n = Índice subcrítico de fractura

### 3.2.1 Procedimiento experimental

Para calcular el índice subcrítico de fractura se utiliza el modelo matemático mencionado anteriormente, el cual tiene en cuenta parámetros como: magnitud y el desplazamiento de la fuerza aplicada, distancia entre los apoyos 1 y 2 con el punto donde se aplica la carga (figura 4), las

dimensiones de la muestra y el radio de Poisson, los cuales se calculan con instrumentos de medición y pruebas de ensayos que se hacen sobre muestras previas para determinar algunas de sus propiedades mecánicas.

### **Velocidad de propagación crítica de la fractura (A)**

La velocidad crítica de propagación de la fractura es aquella que se presenta en el mismo instante que aparece  $K_{Ic}$ , y es la máxima velocidad a la cual se propaga la grieta.

En el momento en que aparece  $K_{Ic}$ , además de comenzar a disminuir la carga que se está aplicando a la probeta, la grieta comienza a propagarse más rápido y fácilmente, cuando se presenta este fenómeno se da la velocidad crítica de propagación de la fractura.

La velocidad de propagación de la fractura en el experimento es determinada por la relación de cambio de la carga,  $P$ , con respecto al tiempo:

$$V = -\frac{C}{P^2} \left( \frac{\partial P}{\partial t} \right); \quad (3)$$

Donde  $C$  es una constante, dada por la relación entre el desplazamiento de la carga de compresión que se aplica a la muestra y la variación de la longitud de la fractura ( $C = y/a$ ).

La relación de cambio de la carga con respecto al tiempo ( $dp/dt$ ) puede mantenerse constante, aumentando para ello la carga en intervalos de tiempos definidos. Por ejemplo si se aumenta la carga en 9 libras cada 3

segundos; entonces  $dp/dt = 9/3 = 3$  lb/s. También se puede determinar tomando datos entre un intervalo de tiempo definido.

### **Intensidad de tensión crítica (K<sub>Ic</sub>).**

La intensidad de tensión crítica de un material se presenta en el momento en que la carga necesaria para fracturar la muestra empieza a disminuir considerablemente, lo que quiere decir que esta empieza a deformarse más rápido y fácilmente.

Para hallar la intensidad de tensión crítica (K<sub>Ic</sub>), primero se debe determinar la intensidad de tensión (K<sub>I</sub>) que está dada por la siguiente expresión:

$$K_I = P * W_m * \sqrt{\frac{(1 + \nu)}{W * d^3 * d_n}}; \quad (4)$$

Donde (figura 5):

P = Carga aplicada a la muestra

K<sub>I</sub> = Factor de intensidad de tensión

W<sub>m</sub> = Brazo de momento de la carga P que se aplica a la probeta

ν = Radio de poisson

W = Ancho de la probeta

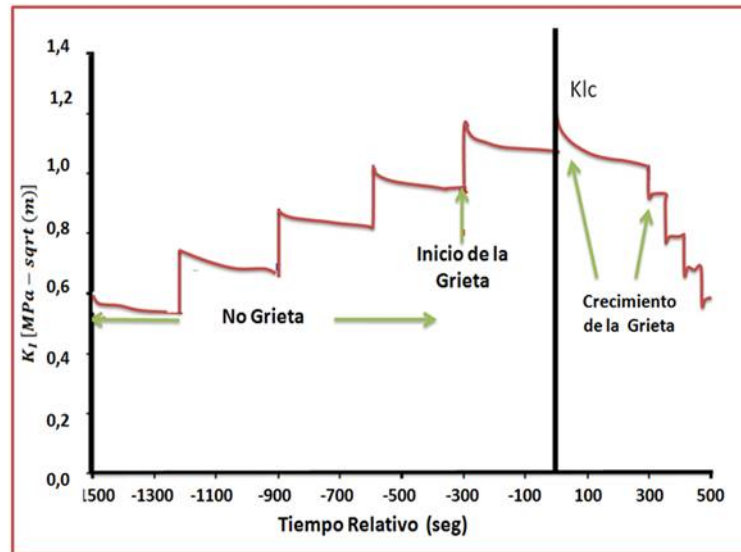
d = Espesor de la probeta

d<sub>n</sub> = Espesor de la probeta por donde pasa la muesca (es un poco menor que el espesor de la probeta).

Para hallar la intensidad de tensión crítica se utiliza la ecuación 4, donde la variable P es la carga a la cual la probeta se fractura. Para encontrar este valor se realiza el ensayo aplicando una carga de compresión que con el tiempo aumenta sobre la muestra. Reemplazando estos valores en la ecuación y graficando estos datos respecto al tiempo se tiene la siguiente

grafica donde se toma el valor máximo de  $K_I$  como la intensidad de tensión crítica, este punto es donde la probeta empieza a fracturarse y cambia rápidamente la carga aplicada.

**Figura 6.** Comportamiento de la fuerza respecto al tiempo



### Índice Subcrítico de Fractura.

El índice de fractura es un parámetro que indica cuando una formación es más fracturada que otra, esto quiere decir, con valores de  $n$  bajos las formaciones están más fracturadas o son más susceptibles a fracturarse comparados con  $n$  (ISF) altos, debido a que la velocidad de propagación de la grieta no se alcanza rápidamente dando tiempo a la grieta de que se ramifique. La estimativa de este índice es utilizado por ejemplo para el proceso de perforación de un pozo de petróleo, antes de empezar la perforación se toma una muestra de la formación y se le realiza este procedimiento para encontrar el *ISF*, con el objetivo de conocer si esta formación es susceptible a fracturarse o ya se encuentra fracturada. Para el

cálculo del índice subcrítico de fractura es necesario calcular las relaciones entre las velocidades de propagación de la grieta ( $V/A$ ) y los factores de intensidades de tensión ( $K_I/K_{IC}$ ), como se muestra en la ecuación 2.

## 4. DISEÑO PRELIMINAR

### 4.1 CALCULO DE FUERZA DE FRACTURAMIENTO

Se realizo un montaje basado en la prueba de la Doble Torsión (ver figura 3) con el fin de estimar la fuerza de compresión necesaria para fracturar la muestra, este procedimiento se realizo en el laboratorio de Sistemas de Manufacturas Flexibles de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

Inicialmente la muestra se ubico sobre cuatro apoyos y luego se ejerció una carga de compresión a través de pesas circulares; fueron necesarias 10 pesas para su fracturamiento, lo cual equivale aproximadamente a 8 Kg.

**Figura 7.** Montaje de la Prueba de Doble Torsión



**Tabla 3.** Dimensiones de probeta para el cálculo de la fuerza de fracturamiento.

Probeta	
Largo (mm)	70
Ancho (mm)	30
Espesor (mm)	3

**Figura 8.** Probeta de ensayo para calcular la fuerza de fracturamiento.



El valor aproximado de la fuerza de fracturamiento fue de  $P = 8 \text{ Kg}$ , para obtener un diseño confiable se estimó una fuerza de fracturamiento de  $30 \text{ kg}$ , este valor es necesario para seleccionar los instrumentos de medición y los módulos del equipo.

#### **4.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.**

La alternativa de diseño seleccionada consiste en un sistema donde se aplica una fuerza de compresión en sentido vertical en uno de los extremos de la muestra, esta muestra está localizada sobre cuatro apoyos ubicados espacialmente en la estructura de la máquina, esto con el fin de realizar el

ensayo de doble torsión, lo anterior con el propósito de generar un momento flector que guíe la fractura a través del concentrador de esfuerzos previamente realizado sobre dicho espécimen, además este sistema debe controlar la profundidad y magnitud de la carga aplicada.

Para el diseño del equipo se tuvo en cuenta los siguientes requerimientos:

- ✓ Que sea portátil para facilitar su traslado a zonas de campos de exploración.
- ✓ Un diseño que tenga un tamaño tal que pueda ser transportado en vehículos pequeños.
- ✓ Ensamblaje por módulos sencillo y rápido.
- ✓ Costo.
- ✓ Garantizar la repetitividad en los resultados del ensayo.

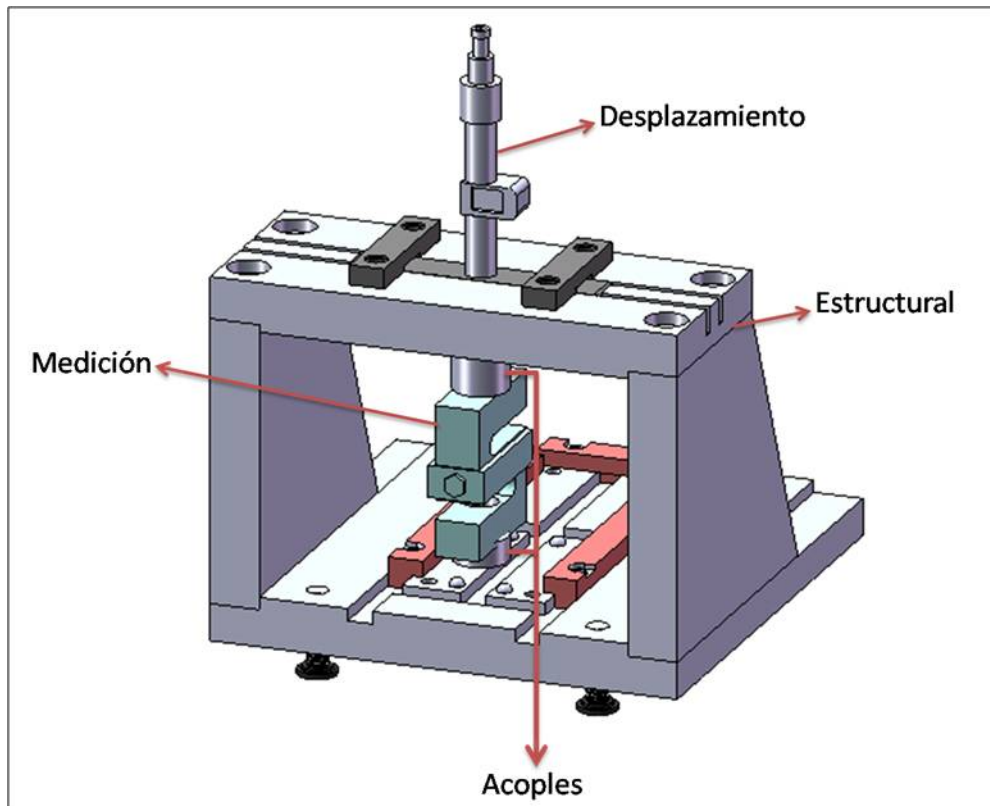
También se tuvieron en cuenta otros requerimientos particulares como:

- ✓ El peso total del equipo fuera inferior a 50 kg
- ✓ La fuerza aplicada de compresión sea aproximadamente de 30 Kg

### **4.3 MÓDULOS DEL EQUIPO**

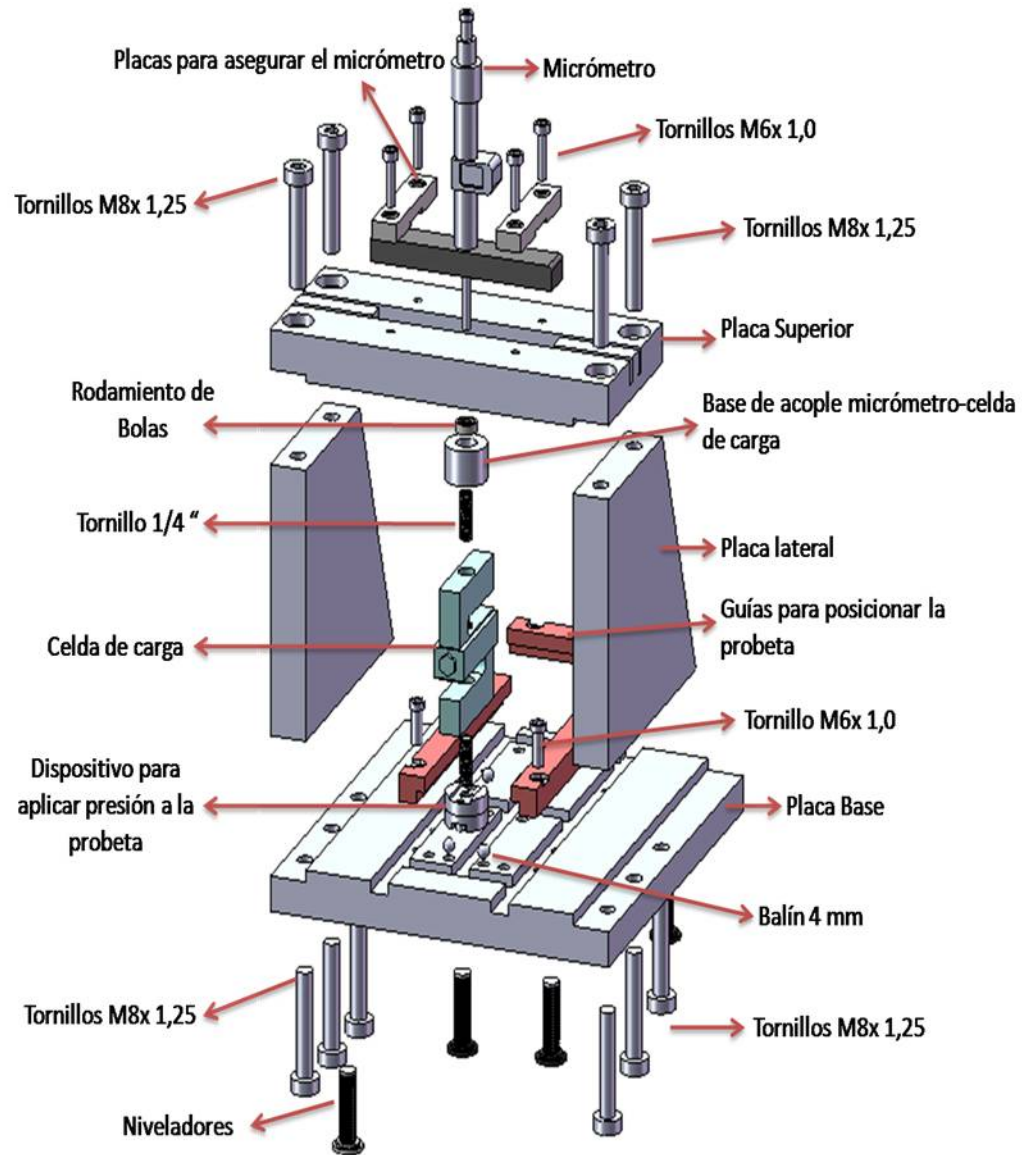
En esta sección se muestran los módulos que conforman el banco de pruebas y se explican los parámetros que se tuvieron en cuenta para su selección y dimensionamiento. Estos módulos son los siguientes: estructural, de medición, desplazamiento, de adquisición de datos, de acople y de carga. (ver figura 9).

**Figura 9.** Módulos del Banco de Pruebas



Los módulos cuentan con otros elementos que permiten ensamblar y operar adecuadamente el banco de pruebas (ver figura 10).

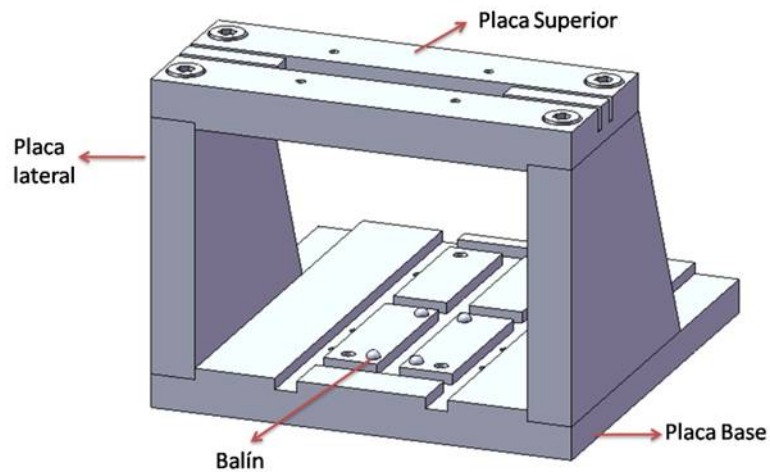
**Figura 10.** Componentes del banco de pruebas



### 4.3.1 Modulo Estructural

Este modulo consiste en dos placas laterales, 1 placa superior y la placa base, todas construidas en acero inoxidable I-304 las cuales están unidas por medio de tornillos brístol. Sobre la placa superior está montado el micrómetro digital en una cavidad que permite que el micrómetro este ajustado y alineado para su correcto funcionamiento. De acuerdo a los requerimientos de la prueba de Doble Torsión la probeta debe estar montada sobre 4 apoyos, de este modo, la estructura cuenta con 4 balines que se localizan en la placa base de la estructura (ver figura 11).

**Figura 11.** Esquema de la estructura.



### Dimensionamiento

La estructura tiene las siguientes dimensiones:

- ✓ Altura: 147 mm
- ✓ Ancho: 90 mm
- ✓ Espesor de las cuatro placas: 20 mm

La altura y el ancho de las placas fueron determinadas según las dimensiones de: la celda de carga, el micrómetro digital y los dispositivos para acoplar estos dos instrumentos. Otro parámetro que se tuvo en cuenta fue el espacio que debe tener el operador para manipular la muestra. Un requisito importante para el montaje de la estructura es la perpendicularidad entre las placas laterales y la placa superior y base, esto para garantizar que los instrumentos de medición y los demás dispositivos estén alineados y así también garantizar la estabilidad del banco de prueba.

#### **4.3.2 Modulo de medición**

Este modulo consiste de una celda de carga tipo S que funciona a tensión/compresión (figura 12), las características especiales de esta celda se muestran en el anexo A. Este sensor tiene como función medir la carga de compresión que se ejerce sobre la probeta durante la prueba de doble torsión. En la parte inferior de la celda va acoplado el dispositivo para aplicar la carga a la probeta mientras la celda se desplaza verticalmente como se puede ver en la figura 10. A continuación se detallan los parámetros que se tuvieron en cuenta para la selección de la celda de carga.

##### **➤ Selección de la celda de carga**

De acuerdo a lo planteado en el diseño escogido, se selecciono la celda de carga que trabaje a compresión, para esto se tuvo en cuenta los siguientes factores:

- ✓ Fuerza máxima a medir
- ✓ Disponibilidad de la carga
- ✓ Disponibilidad del mercado local

**Fuerza máxima a medir:** De acuerdo a la fuerza calculada en el ensayo de doble torsión, se obtuvo una fuerza máxima de 30 Kg (66 lb).

**Disponibilidad de la carga:** El ensayo que se implemento para el banco de pruebas es el de doble torsión, donde la fuerza que se ejerce a la probeta es a compresión.

**Disponibilidad del mercado local:** El valor máximo de fuerza que se va a medir es de 30 kg (66 lb), se selecciono una celda de carga tipo S de capacidad de 100 lbs que puede trabajar a tensión - compresión, la sensibilidad de esta celda es de 3 mV/V. Se escogió esta celda porque era la única que se encontraba en el mercado local y las otras opciones o alternativas eran para importar.

**Figura 12.** Celda de carga tipo S



➤ **Dimensionamiento**

Con los parámetros ya mencionados, se compro una celda de carga tipo S35 de marca *HBM* de capacidad de 100 lb. Las dimensiones y las características de la celda de carga se observa en la anexo A.

### 4.3.3 Modulo de desplazamiento

Según los requerimientos de la prueba de doble torsión, la carga tiene que desplazarse verticalmente sobre la probeta y el desplazamiento debe ser medido paralelamente, ya que este es un parámetro que se requiere en el cálculo del ISF. De acuerdo a lo anterior se opto por comprar un micrómetro digital marca *mitutoyo* (ver figura 13) como sistema de desplazamiento, se escogió un sistema digital debido a que se debe garantizar la precisión en los resultados y además porque se debe cumplir el objetivo de adquirir los datos en el software *Opto 22* para calcular el Índice Subcrítico de fractura.

Este micrómetro esta acoplado a la celda de carga por medio de un dispositivo que tiene un rodamiento para asegurar que la celda de carga no gire mientras el micrómetro es accionado, este dispositivo se puede observar en la figura 10. La función del micrómetro es desplazar la celda de carga y medir este parámetro paralelamente, ya que se necesita la magnitud y desplazamiento de la fuerza aplicada sobre la probeta.

**Figura 13.** Micrómetro digital.



### ➤ Dimensionamiento

Este micrómetro tiene una varilla de medición de diámetro de 4 mm la cual va ajustada a presión sobre un rodamiento de bolas. Las dimensiones de la base son de 101,6 x 16 mm (ver figura 10). Un parámetro para la selección del micrómetro es el desplazamiento de la fuerza necesaria para fracturar la probeta, como este valor es del orden de micras, se selecciono un micrómetro de resolución de 0,001 mm. Las otras características se observan en el anexo B.

#### 4.3.4 Modulo de Acoples

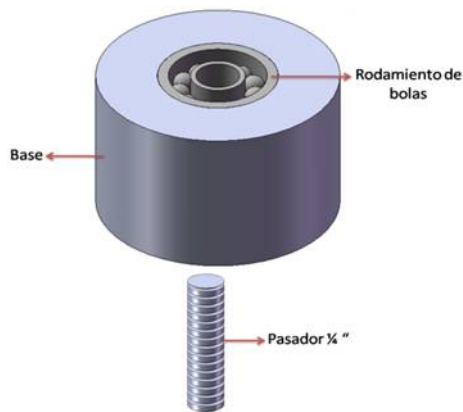
Este modulo consiste en dos dispositivos, el primero para unir el micrómetro con la celda de carga (Ver figura 14) y el segundo para ejercer la fuerza a la probeta para llevarla hasta el fracturamiento (ver figura 15). En la figura 10 se puede observar el acople para unir la celda de carga con el micrómetro digital, donde la función de este acople es garantizar que mientras el micrómetro es accionado (girar el micrómetro) la celda de carga se desplace verticalmente sin girar, para esto, la varilla de medición del micrómetro se fija al rodamiento de bolas, donde el rodamiento esta fijo en la base del acople. Para fijar este acople a la celda de carga se hace por medio de un pasador.

En la figura 15 se observa el dispositivo que tiene como fin ejercer presión sobre la probeta, éste está compuesto por dos piezas, la pieza de presión y un acople para unirla con la celda de carga. La pieza de presión está compuesta por dos balines que tienen como objetivo hacer contacto con la probeta para generar un momento flector y poder fracturarla, las dos piezas están unidas por medio de tornillos métricos.

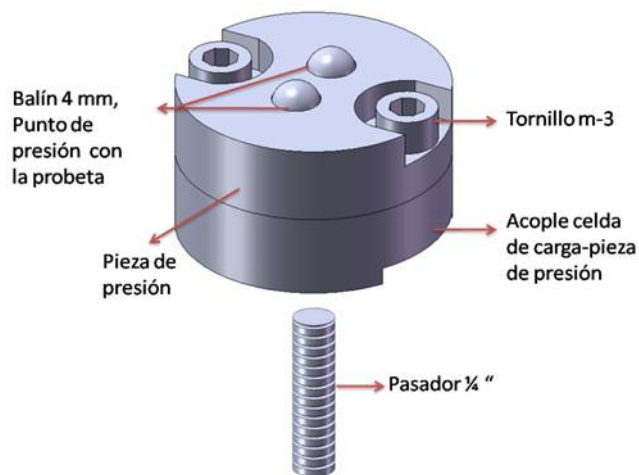
➤ **Dimensionamiento**

El rodamiento de bolas tiene un diámetro exterior e interior de 11 y 4 mm respectivamente, la base donde va fijado este rodamiento tiene un diámetro de 15 y una altura de 12 mm, el dispositivo para aplicar presión tiene un diámetro de 7/16", una altura de 13,5 mm y están unidos a través de dos tornillos métricos de 3mm; los balines son de 4 mm de radio y el material de todas las piezas fue construido en dura aluminio, debido a la facilidad de mecanizado y su bajo peso comparados con otros materiales.

**Figura 14.** Esquema acople celda de carga-micrómetro



**Figura 15.** Esquema dispositivo para aplicar presión sobre la probeta



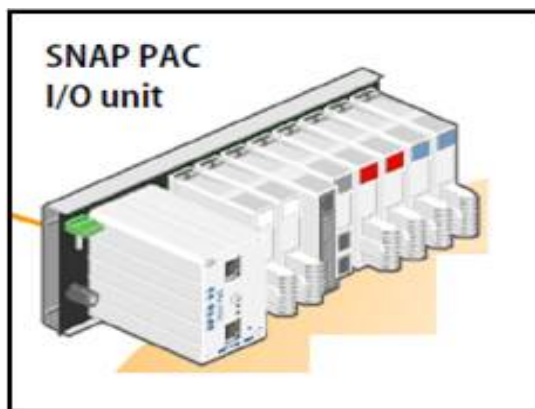
#### 4.3.5 Modulo de adquisición de datos

Este modulo consiste en recibir los datos provenientes de la celda de carga y del micrómetro digital a través de la unidad de entrada y salida de datos “*SNAP PAC I/O unit*” de *OPTO-22* (ver figura 16), para posteriormente ser procesados en una herramienta software hecha en el lenguaje de programación de *OPTO-22* para calcular el índice subcrítico de fractura. Aparte de los componentes mencionados anteriormente se hizo necesario un acondicionador de señal de la celda de carga y dos fuentes de alimentación, una para la celda de carga y otra para el acondicionador de señal, debido a que estos dispositivos no se pueden alimentar con el controlador de Opto-22.

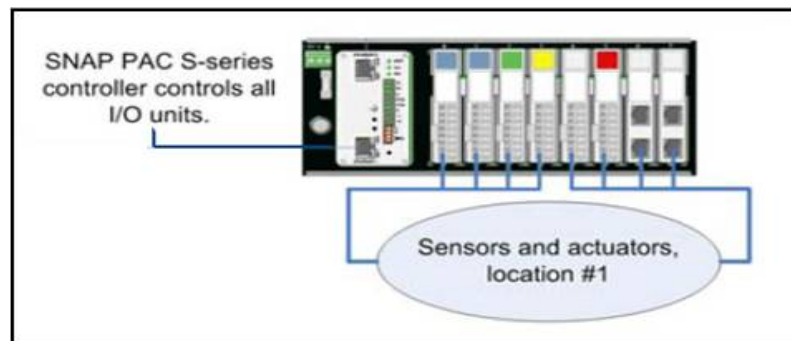
##### Componentes del SNAP PAC I/O unit

Como se puede observar en la figura 17 el “*SNAP PAC I/O unit*” esta compuesto por varios dispositivos electrónicos que se encuentran clasificados en dos grandes grupos que son: el primero es la máquina de control o cerebro que es el encargado de controlar todos los módulos de entrada y salida del *SNAP PAC*, el segundo grupo son los módulos de entrada y salida en los cuales van conectados los sensores y los actuadores.

Figura 16. SNAP PAC I/O unit



**Figura 17.** Componentes del SNAP PAC I/O units.



### **Dispositivos electrónicos auxiliares a los diversos módulos de OPTO-22.**

Los elementos adicionales necesarios para el proceso de adquisición de datos con opto 22 son un acondicionador de señal marca "INTECH" para la celda de carga, el cual se encarga de dar un tratamiento a la señal transmitida por la celda para que esta pueda ser recibida por el modulo de entrada y salida de Opto-22 "SNAP-AIMA-8", dicho modulo se encarga de recibir la señal análoga tratada por el acondicionador de señal la cual se debe encontrar entre un rango de (-20mA a 20mA), los otros dos componentes son las fuentes de energía para el acondicionador de señal y la celda de carga, las cuales deben proveer un voltaje de 24v y 5v de corriente continua respectivamente. En la siguiente figura se aprecia el montaje de todo el modulo de adquisición de datos del banco de pruebas para medir el "ISF".

**Figura 18.** Montaje del modulo de adquisición de datos del equipo



#### 4.4 SELECCIÓN DE LOS PIES NIVELADORES

Se optó por utilizar pies niveladores para asegurar la estabilidad a la hora de realizar las pruebas, ya que uno de los requerimientos del banco es que se pueda transportar a cualquier lugar para sus respectivas pruebas y además que sea desarmable, por lo que es necesario que se adapte a cualquier tipo de superficie. La selección de los pies niveladores están influenciados factores como:

- ✓ Nivelación
- ✓ Estética
- ✓ Carga

**Nivelación:** Esta es la razón principal por la cual se decidió utilizar pies niveladores de soporte en el banco de pruebas ya que si no se encuentra nivelado se generan errores en las mediciones.

**Carga:** Para la selección de los pies niveladores se tuvo en cuenta el peso total del banco de pruebas, por lo que se toma como referencia este parámetro para seleccionar a través de un catalogo los pies niveladores correctos para que puedan soportar y nivelar el equipo.

#### **Peso del banco: 30 Kg**

Se selecciono el pie nivelador en el siguiente catalogo (**H'A'FELE**). De acuerdo a las especificaciones del pie nivelador, se busca en el mercado local un pie nivelador con las mismas características (acabado: acero con recubrimiento de Zinc) con el motivo de economía y facilidad de compra.

**Figura 19.** Características del tornillo nivelador - catalogo "HAFELE"



Comparando la capacidad de carga en el catalogo del pie nivelador (150 Kg) con el valor del peso del banco (25 Kg), se observa que se puede seleccionar un pie nivelador con características parecidas al catalogo. Entonces se selecciono el pie nivelador con las siguientes características en el mercado local:

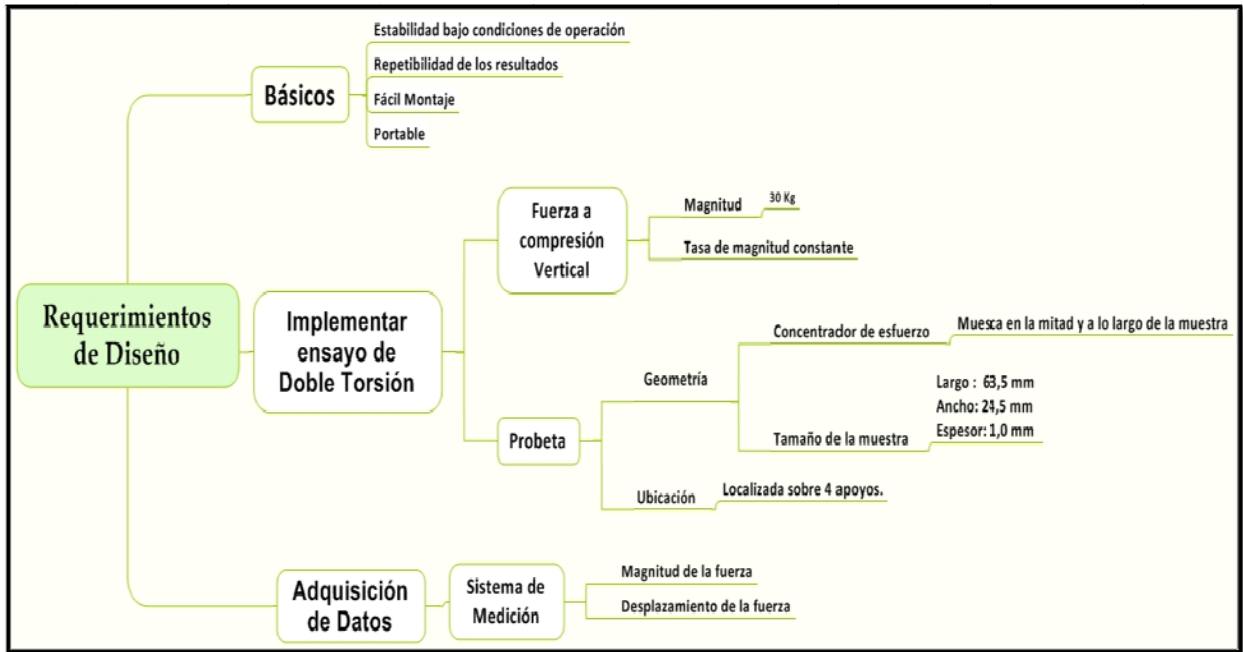
Nivelador para base – 3/8“, con base de plástico negro de 38 mm de diámetro, tuerca cuadrada, largo de 1 1/2” (ver figura 20).

**Figura 20.** Tornillos niveladores



A continuación se presenta un diagrama de los requerimientos de diseños tenidos en cuenta para el diseño y construcción del banco, ver figura 21.

Figura 21. Esquema de los requerimientos de diseño



## 5. VALIDACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

### 5.1 Análisis

El análisis estructural del banco de pruebas fue realizado examinando todas las partes que conforman los módulos, teniendo en cuenta las cargas actuantes en cada elemento y asumiendo factores de seguridad conservadores para evitar algún riesgo de accidente durante la operación del banco de pruebas.

El primer paso para realizar este análisis fue seleccionar el material a usarse para la construcción del equipo, para ello se tuvieron en cuenta los requerimientos de este, el ambiente en el cual podría operar y las sugerencias estructurales expuestas por parte del líder del laboratorio de mecánica de rocas, entidad para la cual se diseñó y construyó el banco de pruebas. Estas sugerencias fueron las siguientes: Resistente y estable en condiciones de operación, liviano para su transporte, resistente a la corrosión y estético.

Teniendo presente los parámetros mencionados anteriormente se escogió el acero I-304 para construir el módulo estructural del equipo, debido a que es resistente, duro, permite buenos acabados, su estructura no se deforma fácilmente en caso de ser golpeado por errores en el proceso de traslado, tiene buena resistencia a la corrosión en atmósfera rural, urbana e industrial. Otra de las características importantes es que el equipo debe ser estable en condiciones de operación, por lo cual se necesita que su estructura sea robusta.

Definidas en la fase de diseño las dimensiones del modulo estructural del equipo, en las cuales se tuvieron en cuenta los elementos que conforman éste y el material con que se construirá la estructura, el siguiente paso fue realizar el respectivo análisis estructural de este, del cual se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

**Tabla 4.** Calculo por flexión de la placa superior

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	P	5	Kg	Carga a compresión en el centro de la placa
	R <sub>1</sub>	2,5	Kg	Reacción total en el apoyo 1
	R <sub>4</sub>	2,5	Kg	Reacción total en el apoyo 2
	L	0.19	m.	Longitud de la sección del perfil sometido a flexión
	M	0,2375	Kg.m.	Momento Flector máximo
	c	0,01057	m.	Distancia del eje neutro
	I	4,74E-08	m <sup>4</sup>	Momento de inercia
	N	4	Cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	5,20E+07	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
1	σ	5,30E+04	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo- Flexión
2	σadm	1,30E+07	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible
σ < σadm <b>OK</b>				

**Tabla 5.** Calculo de pandeo de las placas laterales

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	R <sub>5</sub> , R <sub>8</sub> , R <sub>4</sub> , R <sub>2</sub>	2,5	Kg	Carga a compresión en los extremos de la placa
	L	0,115	m.	Distancias entre los apoyos
	A	1,21E-02	m <sup>2</sup>	Área transversal
	K	5,35E-03	m.	Radio de giro
	(L/K)	2,15E+01	Cte.	Razón de esbeltez
	C	2	Cte.	Apoyo tipo empotrado- Pasador
	E	1,93E+10	Kg/m <sup>2</sup>	Modulo de elasticidad del material
	N	4,00E+00	cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	5,20E+07	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
1	(L/K) <sub>1</sub>	1,21E+02	cte.	Valor límite superior de razón de esbeltez
2	(L/K) <sub>Q</sub>	8,56E+01	cte.	Valor límite inferior de razón de esbeltez
3	Σ	2,07E+02	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo - columna corta
4	Σadm	1,30E+07	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible
σ < σadm <b>OK</b>				

**Tabla 6.** Calculo por flexión de la placa base

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	R <sub>7</sub> y R <sub>10</sub>	6	Kg	Carga a compresión en los extremos de la placa
	R <sub>b1</sub> y R <sub>b2</sub>	15	Kg	Carga de fracturamiento
	R <sub>n1</sub> y R <sub>n2</sub>	21	Kg	Reacción de los niveladores
	L <sub>1</sub> y L <sub>5</sub>	0,028	m.	Longitud entre los extremos y niveladores
	L <sub>2</sub> y L <sub>4</sub>	0,0473	m.	Longitud entre niveladores y fuerza de fracturamiento
	M	0,5415	Kg.m	Momento Flector máximo
	c	1,20E-03	m.	Distancia del eje neutro
	I	7,08E-08	m <sup>4</sup>	Momento de inercia
	N	4	Cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	5,20E+07	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
1	σ	9,18E+03	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo- Flexión
2	σadm	1,30E+07	Kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible
σ < σadm <b>OK</b>				

Luego de realizar los cálculos para comparar los esfuerzos de trabajo y admisible se concluyo lo siguiente:

De acuerdo a las propiedades mecánicas del acero inoxidable, que soporta cargas del orden de toneladas, se observa que las cargas a las que están sometidas las piezas generan deformaciones muy pequeñas sobre el material las cuales se pueden despreciar.

Se realizo una simulación en el software ANSYS Workbench sobre el comportamiento mecánico del modulo aplicando las mismas cargas experimentales y los resultados arrojaron un factor de seguridad de 15. El factor de seguridad supuesto en los cálculos de resistencia de la estructura es de 4, el cual en comparación con el factor simulado resulta en un diseño

sobredimensionado ( $4 < 15$ ), por lo que se puede concluir que el banco es seguro y no presentara fallas de tipo estructural, por lo cual se omite en esta sección el análisis estructural por elementos finitos.

## **6. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS**

El objetivo principal de esta etapa del proyecto fue fabricar lo que se definió en el diseño final del banco. El diseño de cada pieza y módulos que conforman el banco de pruebas se realizaron con el software *SOLID WORKS 2007*. Cuando ya se dispuso de todas las piezas y modulo en CAD<sup>16</sup> estas fueron ensambladas en la herramienta conjunto del software Solid Works con el fin de obtener los planos en 2D y 3D (ver anexo C) para poder realizar la construcción del banco de pruebas. Las piezas deben estar alineadas entre los elementos individuales del banco como en el conjunto.

### **6.1 MODULO ESTRUCTURAL**

Para la creación de este modulo es de vital importancia que las partes sean mecanizadas con exactitud, ya que sobre esta estructura van montados los instrumentos de medición como la celda de carga y el micrómetro digital, los cuales deben estar alineados para su correcto funcionamiento. Además, como la estructura es desarmable se debe garantizar que los taladros se realicen de tal forma que permitan la linealidad y el paralelismo entre las piezas. Este proceso se realizo con la con la Máquina Herramienta de Control Numérico Computarizado (CNC) presente en el Laboratorio FMS (Sistemas Flexible de Manufactura) de la Escuela de Ingeniería Mecánica, la cual brinda la exactitud y precisión en el proceso de fabricación de las piezas.

La elaboración de la estructura está compuesta por las siguientes piezas:

---

<sup>16</sup> Diseño Asistido por Computadora

- ✓ Placa superior
- ✓ Placas laterales
- ✓ Placa base

Antes de empezar con el mecanizado de las piezas en CNC, primero se realizo el corte con plasma de las piezas con las dimensiones establecidas con una tolerancia de +5mm, estas piezas fueron obtenidas a partir de una lámina de acero inoxidable de 1 pulgada de espesor (ver figura 22).

**Figura 22.** Corte de las piezas



La programación del centro de mecanizado se realizo a través del software *MASTERCAM*, para facilitar esta programación se utilizo el diseño de las piezas del banco de pruebas realizadas en *SOLID WORKS*. Esta programación se dividió en las siguientes partes:

- ✓ Desbastado y pulido
- ✓ Ciclo de taladrado
- ✓ Cavidades
- ✓ Definición de contornos
- ✓ Cajas de contornos

Debido a las propiedades como resistencia a la corrosión y resistencia al desgaste del acero inoxidable, se necesitó herramientas con recubrimiento

de tungsteno para realizar las etapas de mecanizado. Se utilizaron escariadores de 1/4" y 7/8" de diámetro de 4 y 6 filos respectivamente, también se usaron brocas de 1/16", 1/8" y 7/8" con 2 hélices. Un factor que se tuvo en cuenta a la hora de realizar el mecanizado fue la velocidad de corte y la velocidad de avance. A continuación se presenta el procedimiento de mecanizado para cada una de las piezas que conforman la estructura del banco de pruebas.

### **6.1.1 Placa superior**

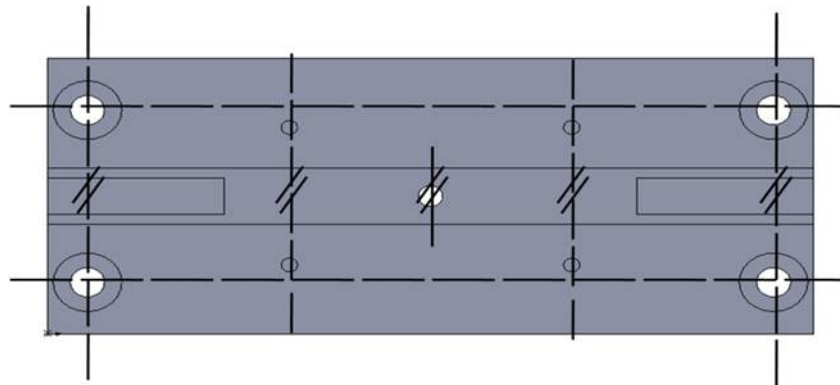
Para la construcción de la placa superior se requería que las caras adjuntas fueran perpendiculares, para esto primero se desbasteo un lado de la pieza (espesor) hasta lograr que esta cara estuviera con un alto pulido y las dimensiones específicas (ver planos-anexo C). Luego se fijo la pieza a la bancada del centro de mecanizado por medio de bridas y cuñas para que la cara pulida quedara paralela al eje X de la máquina-herramienta CNC, a fin de lograr el desbastado del lado de la pieza sobre el eje Y del centro de mecanizado, garantizando el ángulo de 90° entre cada lado. Este proceso se repitió para todas las caras de las piezas (para los lados de menor área-espesor).

Para desbastar las caras de mayor área, es decir, dónde va montado el micrómetro y la cara opuesta, se utilizó una prensa como sistema de anclaje donde se montó la pieza de tal forma que los lados ya pulidos estuvieran alineados paralelamente a los ejes X y Y del centro de mecanizado.

Ya teniendo todas las caras desbastadas y pulidas, el paso siguiente fue alinear las caras de la pieza con los ejes del centro de mecanizado utilizando

la prensa, esto para lograr que la línea de cada sección de agujeros sean paralelas entre sí (ver figura 23), en este mismo montaje se realizaron las otras operaciones como hacer la cavidad donde va el micrómetro.

**Figura 23.** Alineación de la placa superior.



En la Figura 24 se observa el resultado final de esta pieza.

**Figura 24.** Placa superior

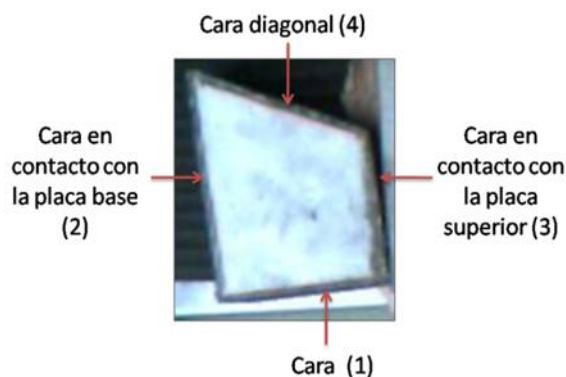


### 6.1.2 Placas laterales

Durante el proceso de desbastado se utilizó el sistema de bridas y cuñas, inicialmente se desbastó la cara que está en contacto con la placa base (cara 2, figura 25) y posteriormente se desbastó la cara que está en contacto con

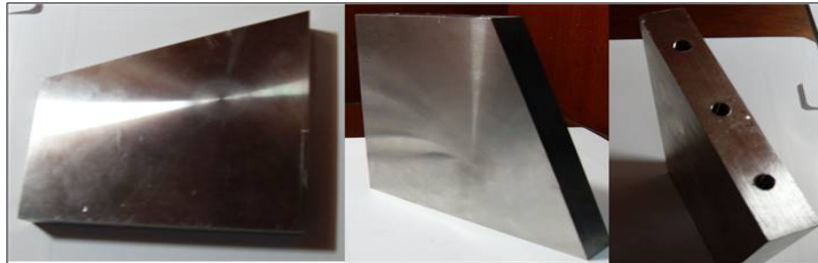
la placa superior (cara 3, figura 25), cumpliendo con el requisito que las caras estén alineadas paralelamente. De acuerdo al diseño, la placa tiene una cara que forma un ángulo de  $66,5^\circ$  con la placa base (ver anexo C, Plano 2), para lograr esto se utilizó una escuadra con referencia en una de las caras ya pulidas para fijar la cara en diagonal paralela al eje X del centro de mecanizado y así realizar el desbaste y pulido. Teniendo estas tres caras ya pulidas se procede a desbastar la cara 1 hasta lograr las dimensiones específicas (ver anexo C, Plano 2).

**Figura 25.** Caras de desbaste de las placas laterales.



Para el desbaste de las dos caras restantes (caras de mayor área) se cambió el sistema de fijación de bridas y cuñas por el sistema de prensa, garantizando que todas las caras pulidas estuvieran paralelas a los ejes X y Y del centro de mecanizado. Ya con la operación de desbaste y pulido realizadas en todas las caras, se ajustó la pieza a la prensa para hacer las operaciones de taladro, donde se garantizó la linealidad de los agujeros, en la siguiente figura se observa la pieza terminada.

**Figura 26.** Placa lateral



### **6.1.3 Placa Base**

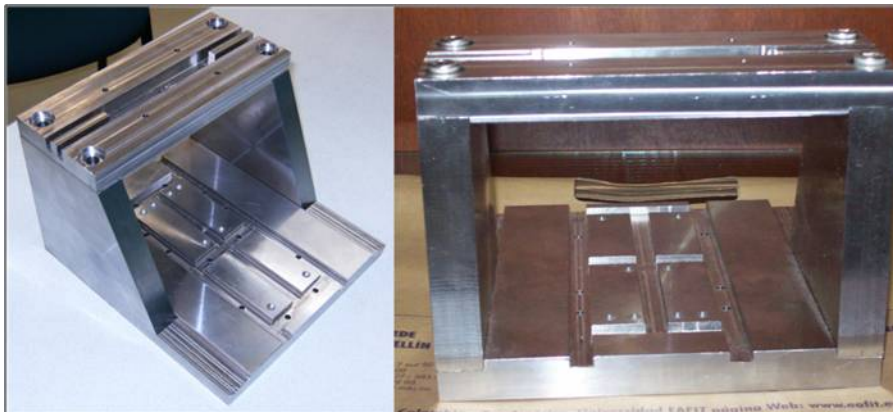
Para la construcción de la placa base se cambio el sistema de fijación que se tenía para las piezas anteriores por el sistema de pines y tornillos debido a que las dimensiones de la placa (190 x 200 mm) eran mayores que el rango de amplitud de la prensa. Se utilizo el mismo procedimiento de desbastado y pulido para las placas laterales y la placa superior, la diferencia en el proceso de taladro en relación a las otras placas fue el cambio de posición de los pines de sujeción, ya que la placa cuenta con varios agujeros ubicados en diferentes puntos donde el sistema de sujeción interfería en el desplazamiento de la herramienta de trabajo. El resultado del proceso de mecanizado de la placa base se puede observar en la siguiente figura.

**Figura 27.** Placa Base



Terminado el proceso de fabricación del modulo estructural, se continuo con el roscado de los agujeros donde van los tornillos que sirven para ensamblar las cuatros piezas y el micrómetro a la placa superior. Por último se ensamble el modulo estructural (figura 24).

**Figura 28.** Modulo estructural.



## **6.2 MODULO DE ACOUPLE**

La máquina herramienta utilizada para el proceso de remoción de material fue el torno, a través de este se redujo el diámetro de una barra circular de 1

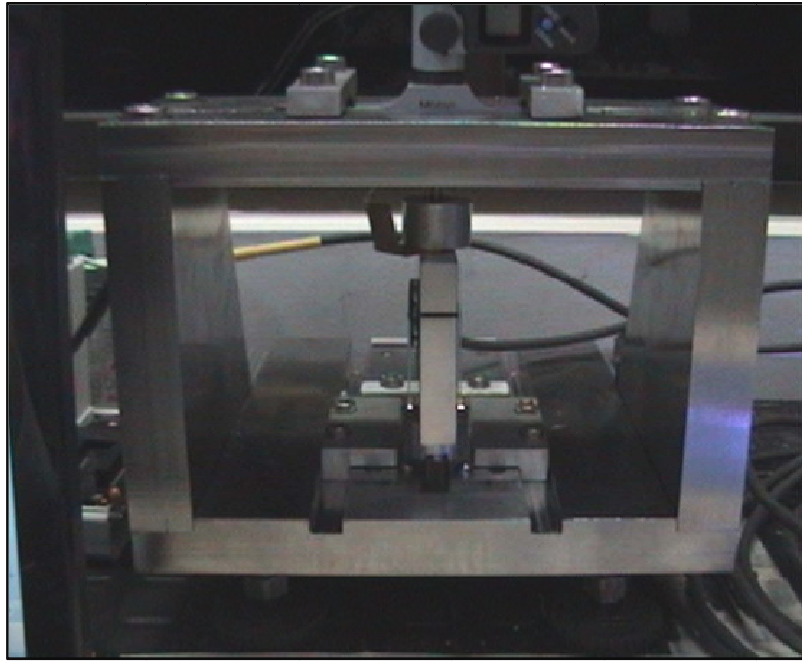
pulgada de diámetro a la dimensión de cada uno de los acoples. Para hacer los agujeros a los acoples se utilizó la Máquina Herramienta de Control Numérico Computarizado (CNC) y por último se realizó el roscado de los acoples. El material de estas piezas fue dura aluminio el cual tiene una baja densidad y alta maleabilidad, lo que facilita su manipulación. En las figura que se presenta a continuación se observa los acoples fabricados.

**Figura 29.** Acople celda de carga y dispositivo de presión.



Con el modulo estructural, los acoples y el dispositivo para aplicar carga fabricados se prosiguió a ensamblar el equipo en conjunto con la celda de carga, el micrómetro y los otros elementos como se observa en la siguiente figura.

**Figura 30.** Banco de pruebas ensamblado



## **7. PROTOCOLOS DE ENSAYOS REQUERIDOS PARA LA PRUEBA**

En este capítulo se trabajara en los protocolos de ensayos que se deben tener en cuenta para la buena ejecución de la prueba, y son los siguientes:

- Corte y preparación de la muestra
- Calibración de los instrumentos de medición
- Procedimiento de la prueba

### **7.1 PROTOCOLO PARA CORTE Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

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 25.4mm de ancho, 63.5mm de largo, 2mm de espesor y con un concentrador de esfuerzos en su centro de 0,5mm de profundidad.

En este protocolo se diseño 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 realizo una revisión detallada de los equipos con los cuales se realizan dichas operaciones en el ICP, luego de realizar dicha revisión se observo que habían varios inconvenientes para obtener la muestra con las dimensiones que se requieren debido a que todos estos equipos están diseñados para el corte de plugs o corazones los cuales tienen una geometría cilíndrica que dista mucho de la forma física de la muestra para realizar los ensayos con el equipo.

Para solucionar este problema se plantearon dos ideas como: Buscar algunos equipos en el mercado local que permitieran dar la forma requerida a la muestra y la otra fue acondicionar los equipos existentes en el ICP. De las dos propuestas mencionadas anteriormente se escogió la segunda debido a que las muestras se podrían preparar dentro de las instalaciones del ICP por operarios y maquinas de la empresa.

Luego de haber definido el camino que se debía seguir se procedió a escoger dentro de una gama amplia de equipos de corte y pulido con que cuenta la compañía las maquinas herramientas que se usarían para dicho propósito, estas maquinas son las siguientes: *Pulidor de Caras EFG-450* y *Sierra de precisión ISOMET 1000* ver figuras 31 y 32.

**Figura 31.** Pulidor de Caras EFG-450.



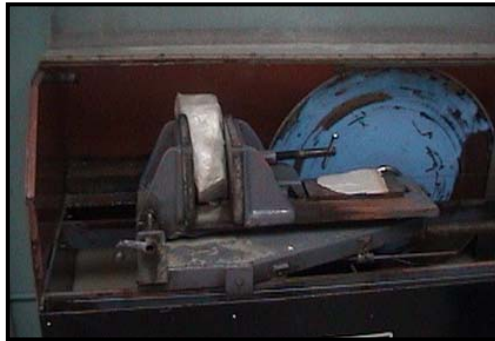
**Figura 32.** Sierra de precisión ISOMET 1000.



Se seleccionaron estos equipos debido a que pertenecen al *Laboratorio de Mecánica de Rocas* entidad con la cual se está realizando el proyecto, son los más nuevos y mejores de esta clase que existen en el instituto y no son tan robustos (ver figura 33), debido a que los otros pueden cortar piezas más

grandes pero el espesor de la sierra que es algo mayor dificulta obtener un buen acabado en las muestras.

**Figura 33.** Cortadora LAPRO del laboratorio de muestras geológicas.



Luego de superar estos inconvenientes el siguiente paso fue diseñar los sistemas de sujeción sobre los cuales se montarían las piezas durante el proceso de corte, para realizar este diseño se tuvo en cuenta aspectos como los equipos sobre los cuales estarán ensamblados, la geometría de la muestra y el tamaño del material o roca base del cual se extraerá la muestra.

#### **7.1.1 Material base para extraer la muestra.**

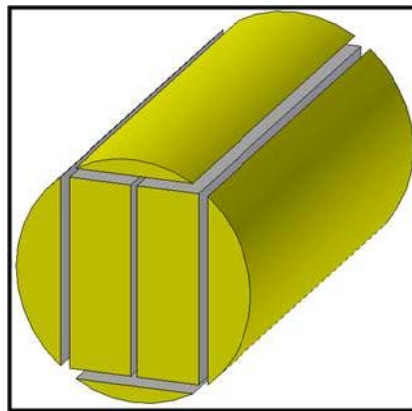
La roca de la cual se extraerá la muestra es de corazones de 3pulg de diámetro tomados durante la perforación del pozo, dado que es preciso el estudio de las propiedades de la formación que se está perforando, a su vez de estos se extraerán plugs de 1.5pulg de diámetro (ver figura 34) a los cuales se les realizaran las diversas pruebas de laboratorio, por tal motivo la roca base que se usara para extraer las muestras definitivas se tomara de estos plugs, sobre los cuales posteriormente se harán cortes longitudinales (ver figura 35) con el propósito de obtener dos pedazos de rocas del siguiente tamaño, 70mm de largo, 30mm de ancho y 12mm de espesor como

se muestra en la figura 36. Esto se hace con el fin de obtener un tamaño de roca que se pueda manipular en los equipos de corte y pulido que serán utilizados.

**Figura 34.** Plugs de 1.5pulg de diámetro



**Figura 35.** Cortes longitudinales hechos en el plug



**Figura 36.** Secciones rocas extraídas del plug de (70mmx30mmx12mm)



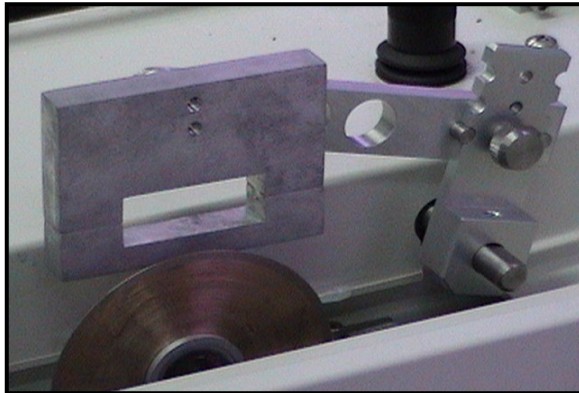
### 7.1.2 Elementos de sujeción para preparación de muestras

Los elementos de sujeción que se fabricaron para dicho propósito son los siguientes:

➤ **Elemento para cortar el largo de la muestra**

El dispositivo que se observa en la figura 37 se diseñó para sujetar la muestra de tal modo que el largo de esta se encuentre perpendicular al disco de corte de la sierra de precisión, esto con el propósito de obtener la longitud final de la muestra de 63.5mm.

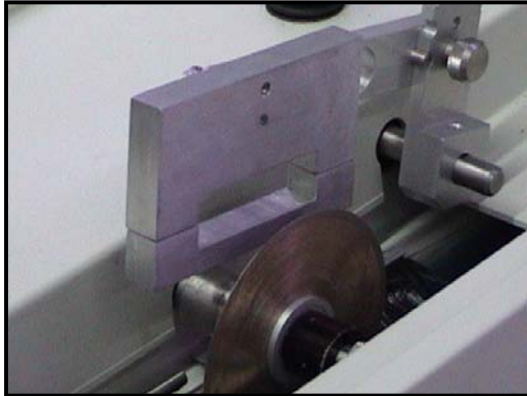
**Figura 37.** Elemento para cortar el largo de la muestra



➤ **Elemento para cortar el ancho de la muestra.**

Este dispositivo es similar al anterior pero las dimensiones de la cavidad en la cual se ubica la muestra varían debido a que este se diseñó para ser usado después de que la muestra tenga una longitud de 63.5mm y además de ello en este elemento la muestra se sujeta de tal modo que el ancho de la misma se encuentre en un plano perpendicular al disco de corte de la sierra de precisión, esto con el propósito de obtener los 25.4mm del ancho de la muestra (ver figura 38 y 39).

**Figura 38.** Elemento para cortar el ancho de la muestra



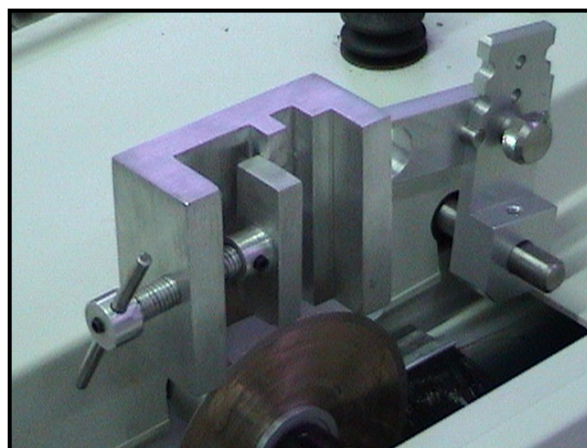
**Figura 39.** Foto de los dos elementos mencionados anteriormente



➤ **Elemento para reducir espesor de la muestra.**

El dispositivo que se muestra en la figura 40 se diseñó con el propósito de reducir el espesor de la muestra para que el bloque base pasara de un espesor de 12mm a uno de 6mm. Este dispositivo es una especie de prensa pequeña sobre la cual se ubica la muestra después de realizar los cortes previos del ancho y largo de la muestra, debido que las cavidades interiores de esta se diseñaron con base a estas dimensiones.

**Figura 40.** Elemento para reducir espesor de la muestra



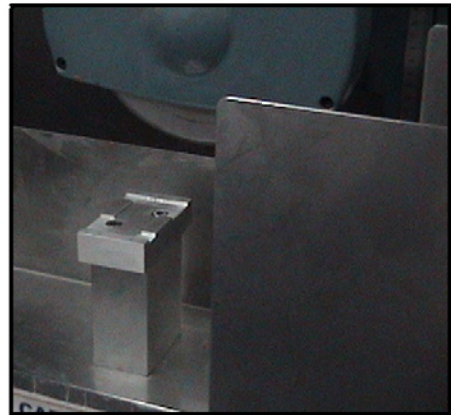
➤ **Elemento para pulir y reducir espesor de la muestra.**

El dispositivo que se muestra en la figura 41 se diseño con el propósito de pulir y rectificar el paralelismo entre las caras de la muestra, además de bajar algunos milímetros en el espesor de esta para obtener la dimensión final de 2mm.

**Figura 41.** Elemento para pulir y reducir espesor de la muestra



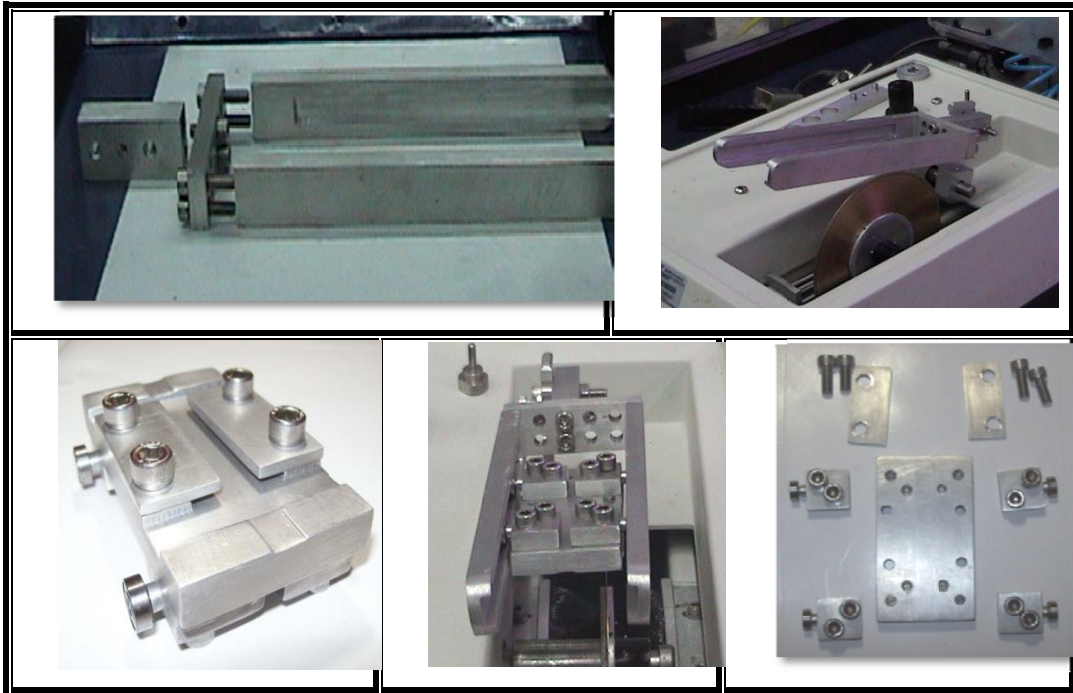
**Figura 42.** Elemento para pulir montado sobre la pulidora de caras



➤ **Dispositivo para hacer entalla en el centro de la muestra.**

El dispositivo que se muestra en figura 43 se diseño con el propósito de realizar una entalla en el centro de la muestra, este dispositivo está conformado por varias piezas que son las siguientes, un carro soporte sobre el cual se ubica la muestra, dos rieles guías sobre los cuales se desliza el carro y otros elementos de acople utilizados para ensamblar este dispositivo al brazo principal de la cortadora ISOMET.

**Figura 43.** Piezas que conforman el dispositivo para hacer la entalla



### 7.1.3 Estrategia para corte y preparación de muestras

Luego de haber definido las herramientas, los equipos de corte, los elementos de sujeción para corte y las dimensiones de la roca sobre la cual se va a trabajar, el siguiente paso fue diseñar y ejecutar la estrategia para corte y preparación de muestras.

➤ **Primer paso.**

Realizar cortes longitudinales sobre plugs de 1.5pulg de diámetro para obtener dos pedazos de roca con las siguientes dimensiones: 70mm de longitud, 25.4mm de ancho y 12mm de espesor como se puede observar en la figura numero 36.

➤ **Segundo paso.**

Pulir los bloques de (70mmx30mmx12mm) con el propósito de rectificar sus caras y asegurar que estas estén paralelas y ortogonales entre sí, para prevenir planos inclinados o cortes imperfectos en operaciones posteriores.

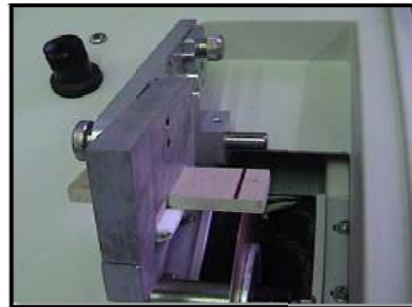
➤ **Tercer paso.**

Marcar las líneas de corte con las dimensiones finales de la muestra (ver figura 44) y realizar los respectivos cortes con los elementos de sujeción para cortar el ancho y el largo de la muestra como se observa en la figura 45 y 46.

**Figura 44.** Líneas de corte marcadas sobre la muestra.



**Figura 45.** Elemento para cortar el largo de la muestra



**Figura 46.** Elemento para cortar el ancho de la muestra



➤ **Cuarto paso**

Luego de tener dos de las dimensiones finales de la muestra, el siguiente paso es utilizar el elemento para reducir el espesor con el cual se dividirá la roca base en dos partes iguales, es decir su espesor pasara de 12mm a 6mm aproximadamente.

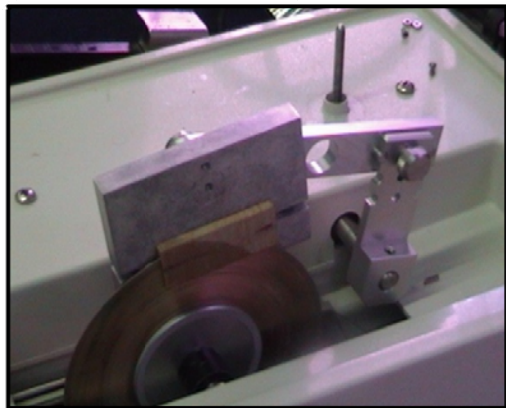
**Figura 47.** Montaje del elemento para reducir el espesor de la muestra



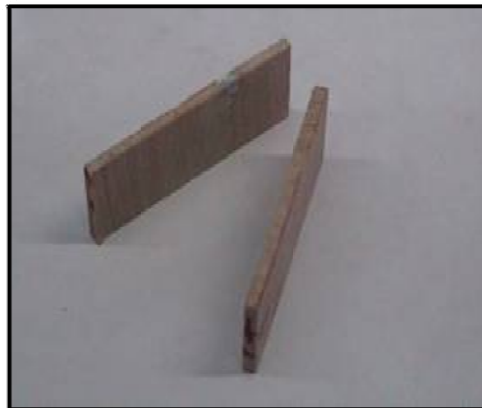
➤ **Quinto paso**

En esta parte del proceso luego de las diversas operaciones de corte, la roca debe tener las siguientes dimensiones (63.5mmx25.4mmx6mm), por lo cual se debe seguir disminuyendo el espesor de la roca hasta que se encuentre lo más cerca de los 2mm de espesor, pero el dispositivo utilizado en el paso anterior no puede usarse debido a que el espesor de la roca se ha reducido considerablemente y no ofrece un buen agarre como antes, para solucionar este problema se usa nuevamente el dispositivo para cortar el ancho de la muestra, pero con la roca montada de la forma como se muestra en la figura numero 48. Con esta forma de sujeción de la pieza se pueden cortar laminas de roca con un espesor de 2.5mm y 3mm (ver figura 49).

**Figura 48.** Montaje para cortar laminas de roca-espesores 2.5mm y 3mm



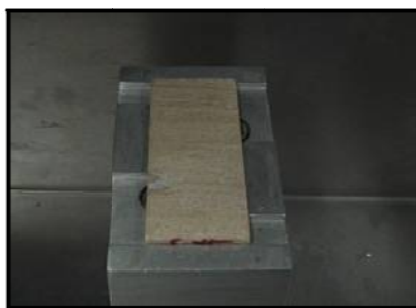
**Figura 49.** Laminas de roca-dimensiones (63.5mmx25.4mmx2.5mm)



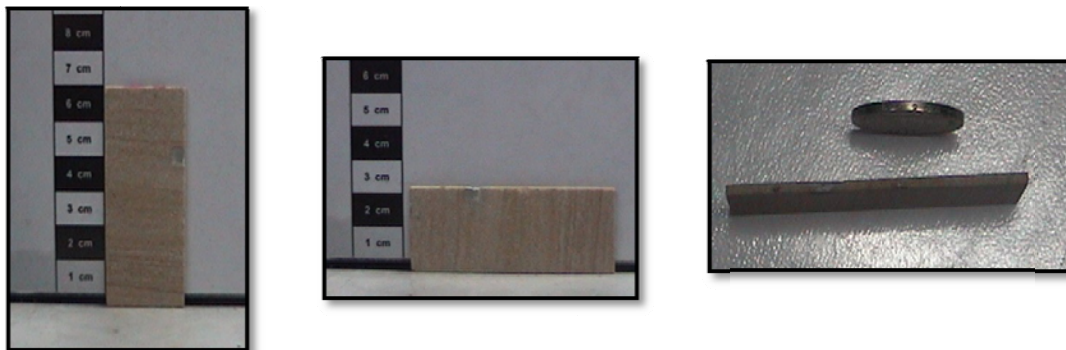
➤ **Sexto paso**

Finalmente luego de cortar las láminas de roca que se obtuvieron en el paso anterior, se procede a realizar una operación de pulido con el propósito de emparejar las caras, corregir cualquier imperfección generada por los procesos de corte anteriores y obtener el espesor final de la muestra de 2mm (ver figuras 50 y 51).

**Figura 50.** Proceso de pulido de láminas de roca-dispositivo para pulir



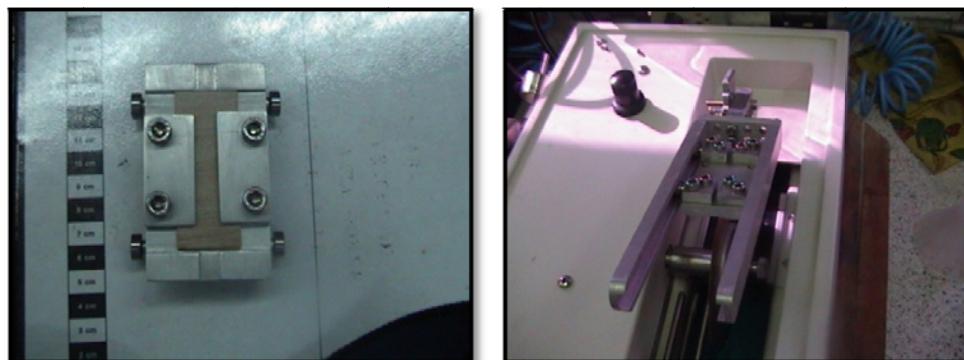
**Figura 51.** Muestra con sus dimensiones finales (63.5mmx25.4mmx2mm)



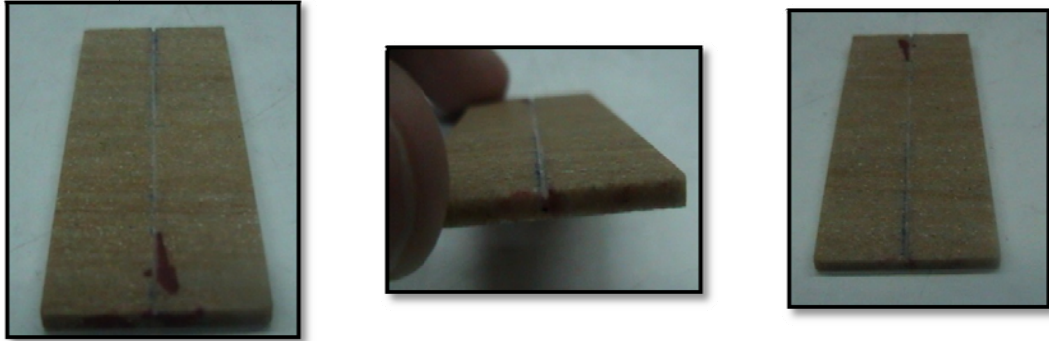
➤ **Séptimo paso**

Luego de tener la muestra con las dimensiones finales requeridas, el siguiente paso es hacer el concentrador de esfuerzos en el centro de la muestra. Para ello inicialmente se traza una línea guía en el lugar donde va la entalla (centro de la muestra) y se usa el dispositivo para hacer la entalla en el centro de la muestra, como se observa en la siguiente figura.

**Figura 52.** Montaje de muestra en dispositivo para hacer la entalla



**Figura 53.** Muestra con sus dimensiones finales (63.5mmx25.4mmx2mm)



De acuerdo a los ítems anteriores acerca del protocolo para el corte y preparación de las muestras, se desarrollo un formato con los pasos necesarios para obtener las muestras con las dimensiones y requisitos específicos. A continuación se observa el formato para el protocolo de corte y preparación de la muestra:

**Tabla 7.** Formato del protocolo para el corte y preparación de la muestra

<b>INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO</b>			
<b>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS</b>			
<b>HOJA DE PROTOCOLO PARA EL CORTE Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA</b>			
<b>PASOS</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Tener las dimensiones de la probeta (63,5mm de longitud, 25.4mm de ancho y 2mm de espesor )			
Obtener los plugs de 1.5 pulgadas de diámetro			
Sacar las dimensiones de la probeta cortando los plugs con una sierra manual, con tolerancia de 6 mm			
Colocar la muestra en la sierra de precisión ISOMET 1000 con los dispositivos de ajuste (ancho y largo)			
Obtener las dimensiones del ancho y largo de la probeta			
Colocar la muestra obtenida en el ítem anterior en la sierra de precisión ISOMET 1000 con los dispositivos de ajuste (Espesor)			
Obtener el espesor de la muestra con una tolerancia de 2 mm			
Colocar la muestra en el pulidor de Caras EFG-450 para obtener el espesor de la muestra (por las dos caras)			
Colocar la muestra en la sierra de precisión ISOMET 1000 con los dispositivos de ajuste (entalla)			
Hacer la entalla a la muestra longitudinalmente con las dimensiones específicas			

## 7.2 PROTOCOLO PARA CALIBRAR LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

En un equipo para realizar ensayos de laboratorio es de gran importancia que sus componentes o elementos de toma de datos y medidas se encuentren calibrados, ya que de esta forma se asegura que los datos leídos son los correctos y que existe repetitividad en los resultados obtenidos. Por tal razón se hace necesario calibrar y caracterizar los componentes de medición con que cuenta el banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura.

### 7.2.1 Ajuste y puesta a punto del micrómetro digital

Para ajustar y calibrar el micrómetro digital marca *MITUTOYO* se usaron los catálogos y manuales entregado por el fabricante, los cuales se encuentran en el anexo B.

#### El micrómetro y sus partes

El micrómetro para profundidades (ver figura 54) es un aparato formado por un eje móvil con una parte roscada, al extremo de la cual va montado un tambor graduado; haciendo girar el tambor graduado se obtiene el movimiento del tornillo micrométrico, y por consiguiente el eje móvil.

**Figura 54.** Micrómetro digital MITUTOYO



Para leer la medida de este instrumento, su tambor tiene marcada una escala lineal que se encuentra graduada en milímetros o pulgadas y además cuenta con una pantalla de cristal líquido.

### **Procedimiento para una buena medición y ajuste del micrómetro**

Para ajustar correctamente el micrómetro se deben seguir los siguientes pasos:

**a. Evitar someter a cambios bruscos de temperatura el micrómetro**, por tal motivo antes de usar el instrumento en algún cuarto o salón, se debe esperar un tiempo para que el micrómetro se adapte a la temperatura de la habitación en la cual se encuentra.

**b. Limpiar la base y superficies de medida**

Para este paso se debe remover todo resto de aceite y polvo de las superficies de medición limpiándolas con un paño suave.

**c. Eliminar el error de paralelismo**

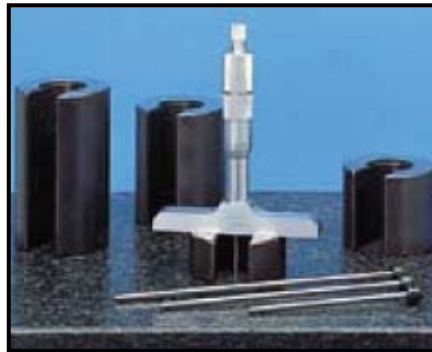
Para eliminar el error de paralelismo se debe tomar la lectura del tambor graduado solamente observándolo de frente, no se puede mirar haciendo una diagonal.

**d. Comprobar punto de referencia**

Antes de medir y después de cambiar el rango de medida, compruebe su punto de referencia usando superficies planas de referencia (platos), o galgas en forma de bloque (ver figura 55) si el eje móvil del micrómetro ha sido cambiado y sobresale de la base.

Para desarrollar este paso inicialmente es necesario limpiar las superficies de medición del micrómetro, luego de ello se comprueba su punto de referencia mediante los métodos mencionados en el párrafo anterior y observando si la línea cero del tambor graduado coincide con la línea de referencia del cuerpo graduado, de no ser así es necesario ajustar el tambor.

**Figura 55.** Bloques galga para referenciar el punto cero del micrómetro



#### **e. Cambio de rango de medida**

- El primer paso es destornillar la cubierta superior del tambor sosteniendo este con los dedos (ver figura 56).
- Retirar la varilla o eje móvil del cuerpo del micrómetro y ubicar la varilla con el rango deseado allí.
- Finalmente se atornilla la cubierta del tambor sosteniendo este.

#### **f. Ajuste del punto de referencia**

##### **Desviación de $\pm 0,01$ mm**

En primer lugar, se aprieta el botón de sujeción. A continuación, se ajusta la línea de referencia del cuerpo del micrómetro con la línea de

cero del tambor girando la llave del cuerpo del micrómetro a través del agujero que se encuentra detrás de la línea de referencia de este.

**Figura 56.** Componentes y herramientas del para micrómetro.



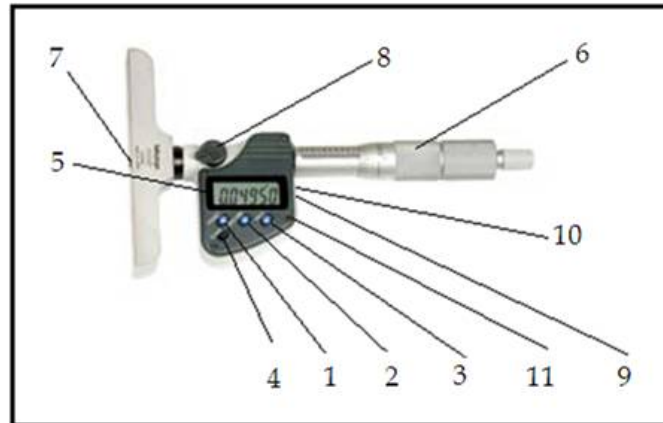
### **Modo de operación de su parte digital**

Como se puede observar en la figura un micrómetro digital está compuesto por otros accesorios electrónicos que lo hacen diferente a uno convencional, por tal razón nombraremos algunos de sus componentes adicionales:

1. Interruptor preselección (PRESET).
2. Interruptor ZERO/ABS.
3. Interruptor HOLD.
4. Interruptor de selección de pulgadas/mm.
5. Pantalla de cristal líquido.
6. Tambor.
7. Husillo.
8. Botón de fijación.
9. Conector de salida de datos.
10. Cubierta.

11. Cubierta del comportamiento de la batería (parte trasera).

**Figura 57.** Micrómetro de profundidades digital.



### **Instalación de la batería**

1. Retire la tapa del compartimiento de la batería haciendo girar en el sentido contrario a las manecillas del reloj con una moneda, etc. Colocada en la ranura.
2. Instalar la batería nueva (con el lado “+” mirando hacia arriba) y vuelva a colocar la tapa del compartimiento de la batería en el orden contrario a lo explicado arriba.

### **Función de los interruptores e indicadores de la pantalla**

#### **➤ Función de los interruptores.**

1. Interruptor HOLD (mantener): Mantiene el valor que aparece en la pantalla.
2. Interruptor zero/ABS (cero/absoluto):  
Cuando se presiona, la pantalla se pone en ceros. Se debe Presionar y mantener presionado para mostrar la medición desde el origen (superficie de medición del tope).

➤ **Indicadores de la pantalla**

**INC:** Modo incremental para mediciones comparativas.

**B:** El voltaje de la batería es bajo. Reemplace inmediatamente la batería.

**H:** El valor de la pantalla es mantenido. Para cancelarlo presione el interruptor HOLD.

**E-oS:** Se ha producido un error por ruido eléctrico o velocidad excesiva. Configure el origen.

➤ **Configuración del origen**

**Preselección del valor de origen (Ejemplo: Preseleccionar la cota 125,000mm)**

1. Pulse el botón PRESET. La letra "P" parpadeara mientras se lee el valor introducido anteriormente (tras el cambio de batería la lectura será de "000.000").
2. Mantenga pulsada la tecla PRESET hasta que parpadee el indicador del primer dígito (más a la izquierda).
3. Pulse de forma breve hasta colocar un "1" en el primer espacio.
4. Mantenga la presión hasta situarse en el segundo dígito.
5. Repita los pasos (3) y (4) para seleccionar el "2", "5" y "0" correspondiente a la cota deseada.
6. Mantenga la presión sobre el botón PRESET hasta que la "P" vuelva a parpadear.
7. Presiónelo brevemente otra vez para dar por concluida la presión (la "P" desaparece).

Con el objetivo de realizar la calibración del micrómetro digital se hizo un formato que contiene los pasos necesarios para este procedimiento, el cual se puede ver a continuación:

**Tabla 8.** Protocolo para la calibración del micrómetro digital

<b>INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO</b>			
<b>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS</b>			
<b>HOJA DE PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN PARA EL MICRÓMETRO DIGITAL MITUTOYO</b>			
Nota: Para este procedimiento se debe tener el catalogo del micrómetro			
<b>PASOS</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>Evitar exponer el micrómetro a cambios bruscos de temperatura</b>			
<b>Comprobar punto de referencia (utilizar patrón)</b>			
<b>Cambio de rango de medida (si es necesario)</b>			
1. Destornillar la cubierta superior del tambor sosteniendo este con los dedos			
2. Retirar la varilla o eje móvil del cuerpo del micrómetro y ubicar la varilla con el rango deseado allí			
3. Atornillar la cubierta del tambor sosteniendo este			
4. Ajuste del punto de referencia (utilizar patrón)			
<b>Modo de operación de su parte digital</b>			
1. Instalar la batería			
2. Configurar el origen			
<b>Configuración del origen</b>			
1. Mantener pulsada la tecla PRESET hasta que parpadee el indicador del primer dígito (más a la izquierda).			
2. Pulsar de forma breve hasta colocar un "1" en el primer espacio			
3. Mantener la presión hasta situarse en el segundo dígito			
4. Repetir los pasos (2) y (3) para seleccionar el "2", "5" y "0" correspondiente a la cota deseada			
5. Mantener la presión sobre el botón PRESET hasta que la "P" vuelva a parpadear			
7. Presiónelo brevemente otra vez para dar por concluida la presión (la "P" desaparece)			

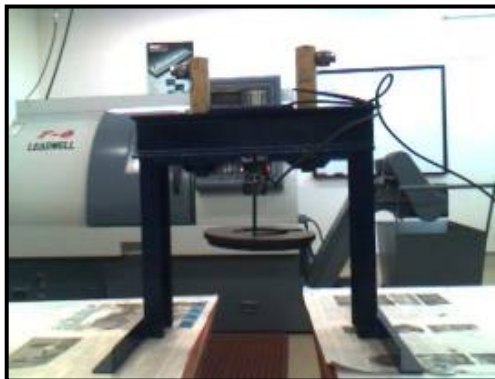
### 7.2.2 Ajuste y caracterización de la celda de carga

El ajuste y caracterización de la celda de carga es de gran importancia para el banco de pruebas, por tal motivo se hizo necesario realizar una caracterización del comportamiento de esta a través del software *OPTO-22*, con el cual se trabajara en la adquisición de datos.

Para calibrar la celda de carga tipo s-35 del banco de pruebas se deben seguir los siguientes pasos:

1. Desmontar la celda de banco de pruebas, para ello se debe desenroscar el acople que une la celda con el micrómetro, este paso se debe realizar con cuidado teniendo en cuenta de no torcer el eje del micrómetro. Para mayor facilidad se recomienda soltar los sujetadores que mantienen el micrómetro estable y levantar este un poco.
2. Buscar un soporte o estructura en la cual se pueda montar la celda para dicho proceso de calibración (ver figura 58), tal vez sean necesarias algunas arandelas, bridas y tornillos de rosca fina de un cuarto de pulga, debido a que los roscados que trae la celda en sus extremos son para esta clase de tornillos.

**Figura 58.** Ejemplo de estructura para calibración de celda



3. Usar pesas calibradas, ya que de esta manera se puede asegurar que la celda de carga está registrando la carga adecuada. Se aconseja usar las pesas del quipo de peso muerto del departamento de mantenimiento del *Instituto Colombiano del Petróleo*, debido a que estas son usadas para la calibración de otros equipos, pero es aconsejable antes de iniciar el proceso de calibración revisar su peso con la ayuda de una balanza electrónica.
4. Realizar el respectivo cableado entre los elementos electrónicos y el computador para la adquisición de de datos. En esta parte del proceso se debe configurar SNAP PAC-R, que es el controlador para leer el modulo de entrada y salida de datos SNAP AIMA-8 al cual está conectado el acondicionador de señal de la celda de carga, este modulo se encarga de recibir la señal tratada por el acondicionar proveniente de la celda de carga (ver figura 18).
5. Configurar en opto 22 los puntos de entrada que necesita el programa para adquirir la señal de la celda y diseñar la estrategia de programación, la cual se explicara detalladamente a continuación:

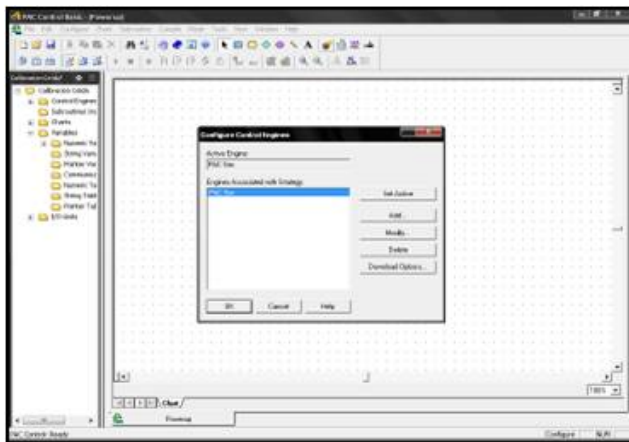
➤ **Configurar la máquina de control**

En esta parte lo que se debe hacer es configurar el nombre y la dirección del controlador que se desea usar, debido a que el controlador tiene disponible dos puertos de ethernet que pueden trabajar independientes. Para realizar este paso se debe generar una estrategia de programación en *PAC Control Basic* y pulsar con el cursor el icono para configurar la máquina de control, ver figura 59. Después de picar sobre dicho icono aparece la ventana mostrada en la figura 60, en la cual se selecciona alguna maquina de control que esté disponible o de lo contrario en caso de no existir se crea una, a la cual se le dará un nombre y establecerá una dirección IP, ver figura 61.

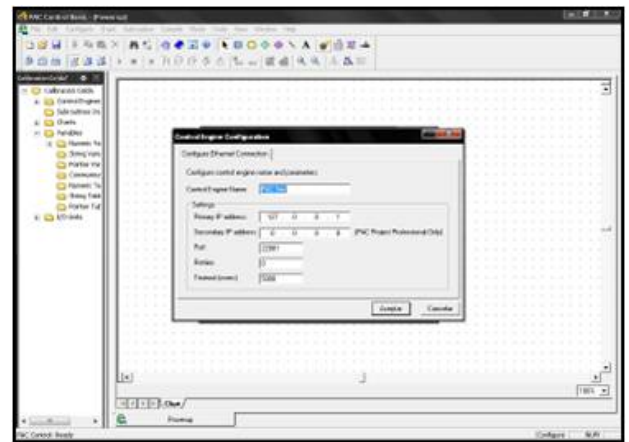
**Figura 59.** Icono para configurar la máquina de control



**Figura 60.** Ventana auxiliar que aparece para configurar o crear la máquina de control



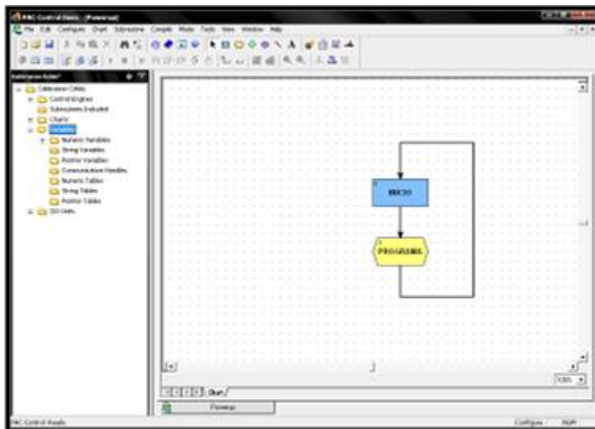
**Figura 61.** Ventana auxiliar para configurar nombre y dirección IP de la máquina de control



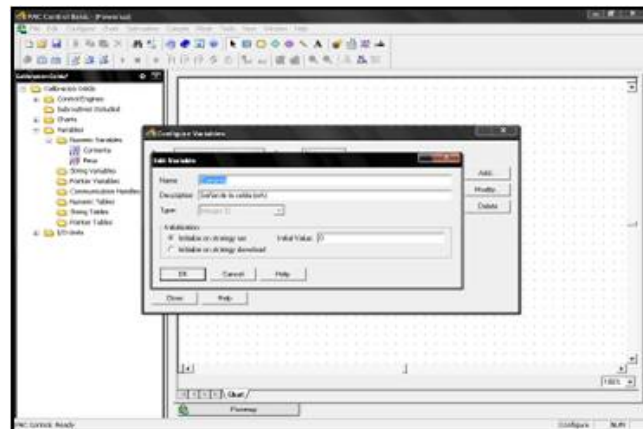
➤ **Crear variables numéricas**

En esta parte se crean o generan las variables que estarán en el lenguaje de programación del software, dichas variables se encuentran entre diversas operaciones matemáticas y lógicas. Para crear las variables numéricas se debe buscar en el menú de carpetas que se encuentra en el lado izquierdo de la pantalla la carpeta denominada variables, desplegar el submenú que ofrece esta, el cual permite crear la variable del tipo deseado, pero en este caso se creó una variable numérica, ver figura 62. Para generar dicha variable se debe utilizar un nombre, seleccionar el tipo de caracteres que esta leerá, y el valor inicial que debe tomar cada vez que corra el programa, ver figura 63.

**Figura 62.** Menús para crear las variables numéricas del programa



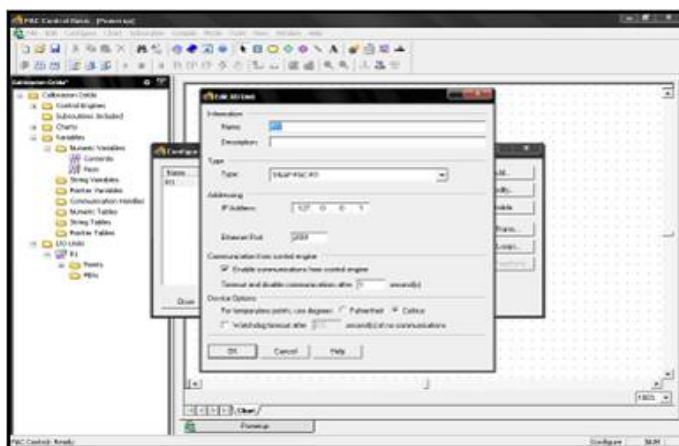
**Figura 63.** Ventana auxiliar para configurar y editar una variable numérica



➤ **Configurar las unidades de entrada o salida**

En esta parte se define el puerto de ethernet que se usara en el controlador, que para este caso en particular es R1, por tal razón se escoge el tipo SNAP-PAC-R1 y se utiliza la misma dirección IP usada para configurar la máquina de control, debido a que siempre se utilizara el mismo puerto, para realizar este proceso se debe picar sobre la carpeta de submenús I/O Units, ver figura 64.

**Figura 64.** Ventana para configura unidades de entrada o salida

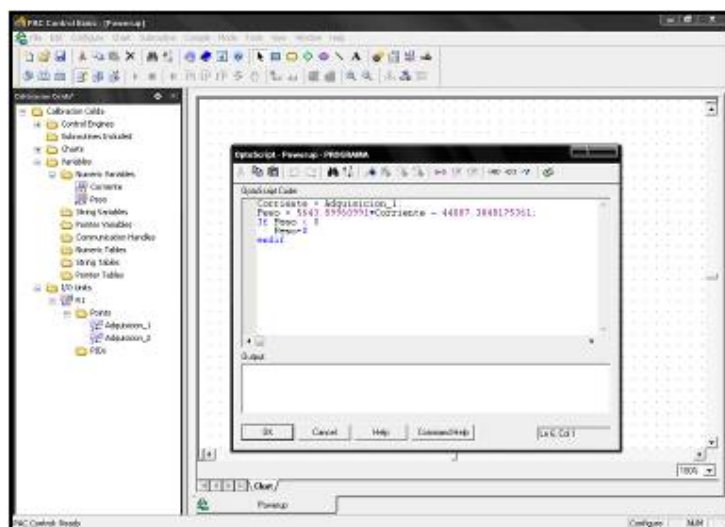




➤ **Programación en Optoscript**

Luego de configurar las principales variables y puntos de entrada para que el programa funcione de una forma acertada, el siguiente paso fue realizar el código de programación en Optoscript, en esta parte si es necesario se deberán crear otras variables dependiendo del código que se vaya escribiendo, ver figura 67.

**Figura 67.** Programación en Optoscript



Se realizo de nuevo un formato que contiene los pasos necesarios para poder realizar la calibración de la celda de carga tipo S, como se puede ver en la siguiente tabla:

**Tabla 9.** Formato para la calibración de celda de carga tipo S

<b>INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO</b>			
<b>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS</b>			
<b>HOJA DE PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN PARA LA CELDA DE CARGA</b>			
Nota: Para este procedimiento se debe tener el catalogo de la celda			
<b>PASOS</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>Desmontar la celda del banco de pruebas</b>			
<b>Buscar un soporte o estructura en la cual se pueda montar la celda para dicho proceso de calibración</b>			
<b>Usar pesas calibradas</b>			
<b>Realizar el respectivo cableado entre los elementos electrónicos y el computador para la adquisición de datos</b>			
<b>Configurar en opto 22 los puntos de entrada que necesita el programa para adquirir la señal de la celda y diseñar la estrategia de programación.</b>			
1. Configurar el controlador			
2. Crear variables numéricas			
3. Configurar las unidades de entrada o salida			
4. Configurar los puntos de entrada y salida			
5. Programación en Optoscript			

### 7.3 PROTOCOLO PARA EL PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE DOBLE TORSIÓN

Después de tener completamente ensamblado el equipo, se deben tener en cuenta algunas recomendaciones para su operación, estas son:

- Verificar:
  - Que el equipo esté nivelado
  - La ubicación de la muestra
  - Que los tornillos estén bien ajustados.
  - El punto de inicio de la aplicación de la carga.
  - El cero del micrómetro.
  - Las conexiones de los instrumentos de medición.
  - La configuración de los puntos de entrada y salida.

A continuación se realiza la prueba de la siguiente manera:

1. Introducir al programa de *opto 22* las variables de entrada: dimensiones de la probeta, distancia entre los apoyos, radio de Poisson.
2. Dar inicio al programa para calcular el índice subcrítico de fractura.
3. Girar el micrómetro lentamente a una velocidad constante.
4. Llevar la probeta hasta la fractura durante el paso 3.
5. Toma de resultados arrojados por el programa.
6. Si se desear realizar más ensayos comenzar desde el paso 1 teniendo en cuenta las recomendaciones.

Se realizo un formato teniendo en cuenta los anteriores ítems para que el operador pueda utilizarlo en el momento de realizar las pruebas:

**Tabla 10.** Formato del protocolo para el procedimiento de la prueba de doble torsión

<b>INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO</b>			
<b>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS</b>			
<b>HOJA DE PROTOCOLO PARA EL PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE DOBLE TORSIÓN</b>			
<b>PASOS</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>Verificar</b>			
1. Nivelación del equipo			
2. Comprobar punto de referencia			
3. Cero del micrómetro			
4. Conexiones de los instrumentos de medición			
5. Configuración de los puntos de entrada y salida			
<b>Realización de la prueba</b>			
1. Introducir al programa de opto 22 las variables de entrada: dimensiones de la probeta, distancia entre los apoyos, radio de Poisson			
2. Dar inicio al programa para calcular el índice subcrítico de fractura			
3. Girar el micrómetro lentamente a una velocidad constante			
4. Llevar la probeta hasta la fractura durante el paso 3			
5. Toma de resultados arrojados por el programa			

## **8. HERRAMIENTA SOFTWARE EN OPTO 22 PARA DETERMINAR EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA**

Para desarrollar la herramienta software se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

1. El modelo matemático que se debe aplicar en la herramienta software para determinar el “ISF”.
2. Determinar las variables de entrada y de salida del programa teniendo en cuenta los requerimientos del modelo matemático para determinar el “ISF”.
3. El lenguaje de programación en OPTO-22.
4. Conocer las herramientas OPTO-22 necesarias para la programación de la herramienta software como:
  - ✓ PAC Sim.
  - ✓ PAC Project.
  - ✓ PAC Control Basic.
  - ✓ PAC Display Configurator Basic.
  - ✓ PAC Display Runtime Basic.

### **8.1 PROGRAMACIÓN EN OPTO-22**

Para la programación en OPTO-22 se uso el sistema Suite de Software PAC Project de OPTO-22, que es el software ofrecido por OPTO-22 para automatizar y controlar los procesos.

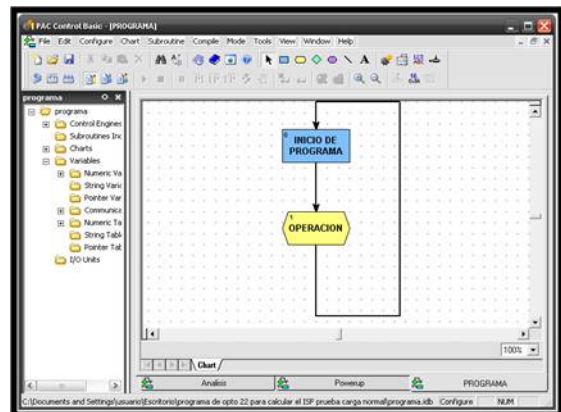
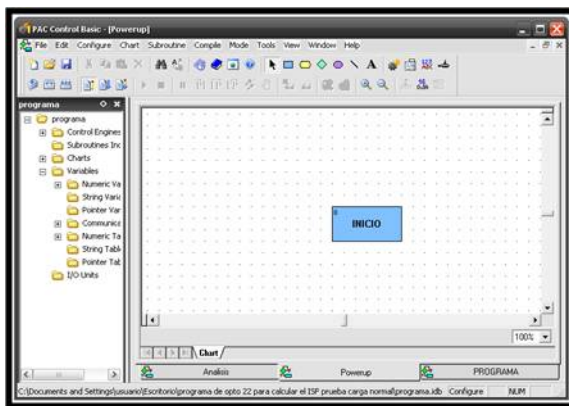
El software PAC Project de Opto 22, brinda control de las funciones, interface hombre máquina (IHM), servidor de OPC y software para comunicación a bases de datos.

Estas aplicaciones se encuentran completamente integradas entre sí, compartiendo una misma base de datos. Esto permite que los puntos configurados en PAC Control, estén disponibles de inmediato para su uso en PAC Display Configurator Basic, PAC Display Runtime Basic, OptoOPCServer, y OptoDataLink.

Para hacer la herramienta software inicialmente se configura las cartas powerup y programa, en las cuales se definieron los comandos que darán inicio al programa con el fin de que este se ejecute y corra los bloques posteriores del código de programación (ver figura 68 y 69).

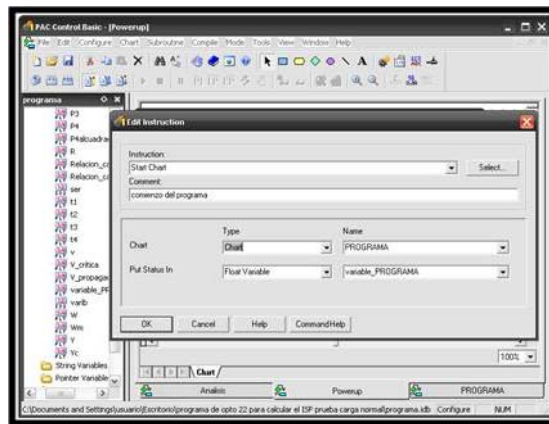
**Figura 68.** Carta powerup en PAC Control Basic.

**Figura 69.** Carta programa en PAC Control Basic.



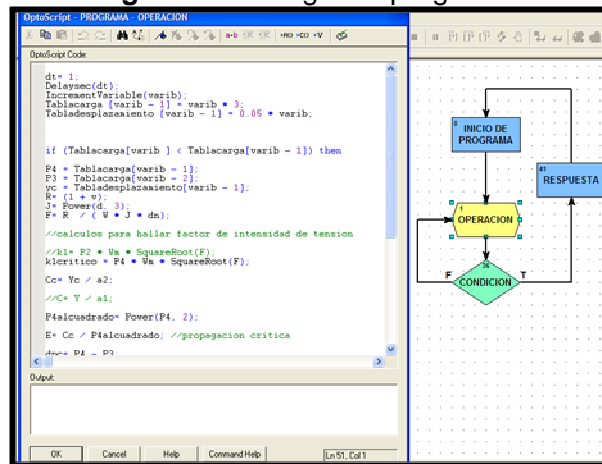
En la carta powerup se edito y definió la instrucción inicio de programa, nombre de la carta y la variable del programa (ver figura 70).

Figura 70. Configuración carta powerup.



En la carta programa, se uso la herramienta Opto script Block Tool, la cual se unió a la instrucción inicio de programa para que este se ejecutara y continuara su ejecución hasta obtener los resultados deseados. En esta herramienta también se edito el código de programación junto a los comandos y las variables utilizadas en el programa (figura 71).

Figura 71. Código del programa.



Para el desarrollo del programa se uso el lenguaje de programación de OptoScript, el cual incluye, estructuras de control (“If Statements” “Switch or Case Statements”, “While Loops”, “Repeat Loops”, “For Loops”); operadores

de comparación (==; < >; <; <=; >; >=); operadores lógicos (and, or, xor, not); tablas (Tablacarga[varib]) para almacenar datos, contadores (IncrementVariable(varib);) y temporizadores (Delaysec(dt)).

## 8.2 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

Luego de configurar las cartas powerup y programa, y de conocer un poco el lenguaje que se maneja en OptoScript, se procedió a editar el código de la herramienta software para hallar el “ISF”.

1. Se almacenaron las variables a controlar como, la magnitud de Carga de fracturamiento y el desplazamiento de la carga, en tablas, con el propósito de observar el cambio de estas en el transcurso de la prueba, así como el tiempo en que se debía realizar cada toma de datos (para este caso se configuro dicho intervalo en un segundo), para recolectar estos datos se hizo necesario el uso de un contador (figura 72 y 73).

**Figura 72.** Código para tablas, toma de datos y contador

```

OptoScript - PROGRAMA - OPERACION
OptoScript Code:
dt= 1;
Delaysec(dt);
IncrementVariable(varib);
Tablacarga [varib - 1] = varib * 3;
Tabladesplazamiento [varib - 1] = 0.05 * varib;
    
```

**Figura 73.** Carta programa en PAC Control Basic.

Index	Value
0	3
1	6
2	9
3	12
4	15
5	18
6	21
7	24
8	27
9	30
10	33
11	36
12	39

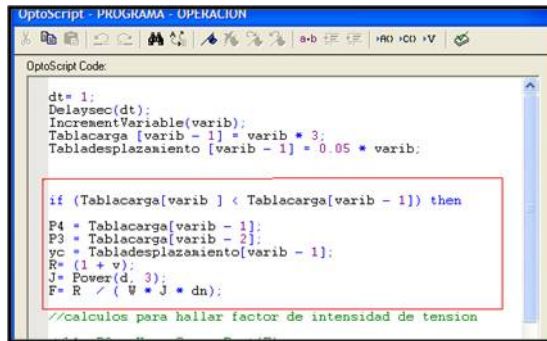
  

Index	Value
0	0.05
1	0.1
2	0.15
3	0.2
4	0.25
5	0.3
6	0.35
7	0.4
8	0.45
9	0.5
10	0.55
11	0.6
12	0.65

2. Se procedió a desarrollar una estructura de control para determinar los valores almacenados de las tablas que se debían extraer para determinar el “ISF”, para ello se indico que el programa debía detenerse cuando la carga aplicada sobre la muestra comenzara a

disminuir, fenómeno que indicaría que la probeta se encontraba fracturada (ver figura 74).

**Figura 74.** Código de estructura de control.



```
OptoScript Code:
dt= 1;
Delaysec(dt);
IncrementVariable(varib);
Tablacarga [varib - 1] = varib * 3;
Tabladesplazamiento [varib - 1] = 0.05 * varib;

if (Tablacarga[varib ] < Tablacarga[varib - 1]) then
P4 = Tablacarga[varib - 1];
P3 = Tablacarga[varib - 2];
yc = Tabladesplazamiento[varib - 1];
R= (1 + v);
J= Power(d, 3);
F= R / ( W * J * dn);
//calculos para hallar factor de intensidad de tension
```

3. Posterior al procedimiento realizado anteriormente se procedió a través de operaciones matemáticas y exponenciales obtener los resultados para calcular:
  - El factor de intensidad de esfuerzos (ver figura 75).
  - La velocidad de propagación (ver figura 76).
  - El factor de intensidad de esfuerzos crítico (ver figura 77).
  - La velocidad de propagación crítica de la fractura (ver figura.78).
  - El “ISF” (ver figura 79 y 90)

**Figura 75.** Código para hallar el factor de intensidad de esfuerzos.

```
//calculos para hallar factor de intensidad de tension
//k1= P2 * Wm * SquareRoot(F);
k1critico = P4 * Wm * SquareRoot(F);
```

**Figura 76.** Código para determinar la velocidad de propagación.

```
OptoScript - PROGRAMA - OPERACION
OptoScript Code:
P2alcuadrado= Pover(P2, 2);
//E= Cc / P4alcuadrado; //propagacion critica
H= C / P2alcuadrado; //propagacion
//dpc= P4 - P3;
dpc= dt;
dp= P2 - P1;
//dt= t2 - t1;
//Relacion_carga_tiesapocritico= dpc / dt;
Relacion_carga_tiempo= dp / dt;
V_propagacion= (1 * H) * Relacion_carga_tiempo;
```

**Figura 77.** Calculo Kcritico y Vcritico.

"k1critico" (scanning)		"V_critica" (scanning)	
Value: 360.3963		Value: 0.0002314815	
"Tablacarga" (scanning)		"Tabladepazamiento" (scanning)	
Name: Tablacarga Type: Float Table, 100000 elements Initiated: On-Run		Name: Tabladepazamiento Type: Float Table, 100000 elements Initiated: On-Run	
0	3	0	0.05
1	6	1	0.1
2	9	2	0.15
3	12	3	0.2
4	15	4	0.25
5	18	5	0.3
6	21	6	0.35
7	24	7	0.4
8	27	8	0.45
9	30	9	0.5
10	33	10	0.55
11	36	11	0.6
12	39	12	1

**Figura 78.** Código para determinar el ISF

```
n = NaturalLog(V_propagacion / V_critica) - NaturalLog(k1 / k1critico);
StopChart(PROGRAMA);
```

**Figura 79.** Valores obtenido para el ISF durante la corrida del programa.

"V_propagacion" (scanning)	Value: 0.00137741	"k1" (scanning)	Value: 330.3633
"V_critica" (scanning)	Value: 0.002314824	"k1critico" (scanning)	Value: 360.3639
"n" (scanning)	Value: 9.5		

## 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

En este capítulo se trabajara sobre las pruebas realizadas con el equipo y los resultados obtenidos con estas.

### 9.1 PRUEBA N°1

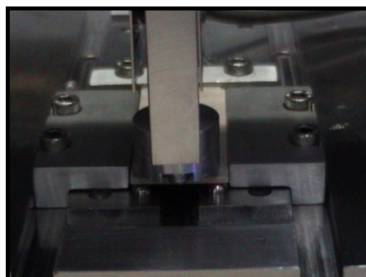
Esta prueba se realiza en una muestra extraída de una roca de formación tambor ver figura 80.

**Figura 80.** Muestra antes de la prueba



Luego de la respectiva configuración para utilizar el banco de pruebas, se debe verificar el montaje de la muestra sobre el equipo debido a que debe estar bien ubicada en los cuatro puntos de apoyo (ver figura 81). Se debe ajustar el micrómetro y ponerlo en ceros en el punto de contacto entre el dispositivo para aplicar carga y la muestra teniendo cuidado de no ejercer fuerza sobre ella, esto se hace con el propósito de que el micrómetro arranque desde cero y para prevenir errores en los datos tomados, luego de revisar y tener listo todos estos parámetros se procedió a realizar esta prueba.

**Figura 81.** Montaje de la muestra sobre el equipo



En el transcurso de la prueba se obtuvieron los siguientes datos: carga aplicada, desplazamiento de la carga y tiempo de la prueba, los cuales se pueden observar en la siguiente tabla.

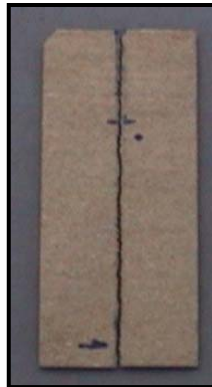
**Tabla 11.** Toma de datos prueba N° 1

Tiempo de prueba (s)	Desplazamiento (mm)	Carga aplicada (g)
0.5	0.021	226.27
1	0.06	412.83
1.5	0.073	946.881
2	0.1	1298.43
2.5	0.132	1696.719
3	0.182	1837.876
3.5	0.215	2052.156
4	0.238	2188.516
4.5	0.244	2228.971
5	0.263	2273.26
5.5	0.279	2282.918
6	0.299	2395.303
6.5	0.319	2464.234
7	0.344	2533.164
7.5	0.37	2602.094
8	0.392	2617.826
8.5	0.408	2662.029
9	0.42	2671.776
9.5	0.427	2687.502
10	0.454	2693.494
10.5	0.476	2721.221

11	0.494	2730.213
11.5	0.511	2743.698
12	0.529	2781.91
12.5	0.549	2795.395
13	0.578	2696.496
13.5	0.604	2579.613
14	0.635	1350.67
14.5	0.658	30.723
15	0.678	23.977
15.5	0.701	21.727
16	0.73	8.242

También se observó que los resultados físicos observados en la muestra fueron los esperados debido a que la fractura se propagó a través del concentrador de esfuerzos hecho previamente sobre la muestra, como se puede observar en la siguiente figura.

**Figura 82.** Muestra después de la prueba



Luego de los datos obtenidos el siguiente paso fue realizar el respectivo tratamiento y análisis de estos, para ello se usó el modelo matemático que se implementó para medir el ISF explicado en capítulos anteriores. Por tanto el primer paso fue determinar el modo uno del factor de dureza a la fractura crítica ( $KI_{critico}$ ), para ello se graficó el factor de dureza a la fractura contra el tiempo y se tomó el máximo valor que es aquel en donde la fractura de la

muestra empieza a propagarse con mayor velocidad y el valor de la carga aplicada comienza a descender, obteniéndose un  $KI_{critico}$  de 0.388471056 (Mpa-sqrt(m)), una carga critica de 27.967632 (N) y una velocidad de propagación critica de la fractura de 0.000107457 (m/s).

Figura 83. Grafica  $KI$  vs tiempo, prueba N°1

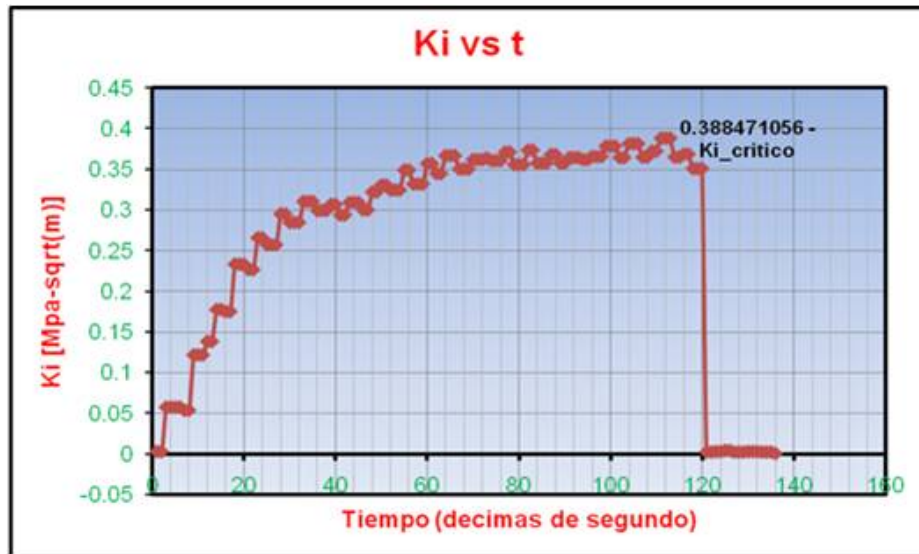


Figura 84. Grafica carga vs tiempo, prueba N°1

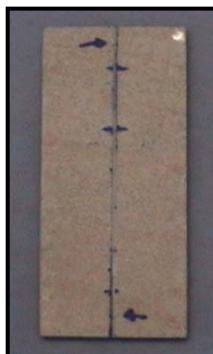


Luego de obtener estos valores el siguiente paso fue determinar el ISF de la roca analizada, para el cual se obtuvo un valor de 17, como el valor del ISF se encuentra entre un rango de 0 – 120, se puede concluir que la formación analizada tiene un índice subcrítico de fractura bajo y por lo tanto esta propensa a presentar muchas fracturas.

## 9.2 PRUEBA N°2

Para esta prueba al igual que la anterior se trabajo con una muestra de formación tambor extraída de la misma roca con el propósito de comprobar la repetitividad del equipo, del mismo modo, antes de iniciar el ensayo se realizaron los respectivos ajustes sobre el equipo y se tomaron fotos de la muestra a ensayarse.

**Figura 85.** Fotos de la muestra antes del ensayo N°2



De esta prueba se obtuvieron los datos que se muestran tabulados en la siguiente tabla.

**Tabla 12.** Datos de las prueba N°2

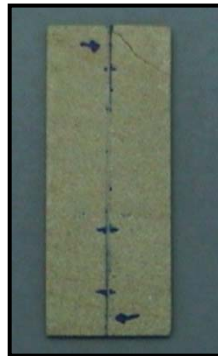
Tiempo	Carga (g)	Desplazamiento (mm)
16:13:03:07	44.211	0
16:13:03:18	394.848	0.010
16:13:03:29	394.848	0.019
16:13:03:40	408.34	0.024
16:13:03:51	408.34	0.037
16:13:03:62	408.34	0.050

16:13:03:73	902.832	0.063
16:13:03:84	902.832	0.075
16:13:03:95	902.832	0.087
16:13:04:06	871.363	0.099
16:13:04:17	871.363	0.110
16:13:04:28	1352.371	0.121
16:13:04:39	1352.371	0.132
16:13:04:50	1694.023	0.142
16:13:04:60	1694.023	0.152
16:13:04:71	1689.523	0.161
16:13:04:82	1689.523	0.170
16:13:04:93	1689.523	0.178
16:13:05:04	1905.309	0.186
16:13:05:15	1905.309	0.194
16:13:05:28	1855.855	0.201
16:13:05:37	1855.855	0.208
16:13:05:50	2004.199	0.215
16:13:05:59	2004.199	0.222
16:13:05:70	2004.199	0.229
16:13:05:81	2193.008	0.236
16:13:05:92	2193.008	0.242
16:13:06:03	2193.008	0.249
16:13:06:15	2193.008	0.256
16:13:06:25	2215.492	0.264
16:13:06:35	2503.191	0.271
16:13:06:46	2503.191	0.279
16:13:06:57	2503.191	0.288
16:13:06:68	2476.215	0.297
16:13:06:79	2476.215	0.306
16:13:06:90	2476.215	0.316
16:13:07:01	2606.59	0.327
16:13:07:14	2606.59	0.339
16:13:07:23	2745.941	0.352
16:13:07:34	2745.941	0.365
16:13:07:45	2745.941	0.380
16:13:07:56	2660.531	0.396
16:13:07:67	2660.531	0.413
16:13:07:78	2799.887	0.431
16:13:07:89	2799.887	0.451
16:13:08:00	2984.199	0.472
16:13:08:10	2984.199	0.495
16:13:08:21	2763.926	0.519
16:13:08:32	2763.926	0.545
16:13:08:43	53.203	0.573
16:13:08:54	53.203	0.603
16:13:08:65	53.203	0.635
16:13:08:76	35.219	0.670
16:13:08:87	35.219	0.707
16:13:08:98	35.219	0.746
16:13:09:09	12.742	0.788
16:13:09:20	12.742	0.832

En esta prueba se observó que el comportamiento mecánico de la fractura sobre la muestra no fue el esperado, debido a que la fractura no se propago

a través del concentrador de esfuerzos, como se puede observar en la siguiente figura, ya que la muestra fallo por una esquina.

**Figura 86.** Foto de la muestra después del ensayo N°2



Luego de los datos obtenidos el siguiente paso fue realizar el respectivo tratamiento y análisis de estos. Se determino el modo uno del factor de dureza a la fractura crítico ( $K_{I\_critico}$ ), la velocidad crítica de propagación a la fractura y la carga crítica. De estos cálculos se obtuvieron los siguientes datos, un  $K_{I\_critico}$  de 0.406215813 (Mpa-sqrt(m)), una carga crítica de 29.245 (New) y una velocidad de propagación crítica de la fractura de 0.000156955 (m/s).

**Figura 87.** Grafica  $K_I$  vs tiempo, prueba N°2

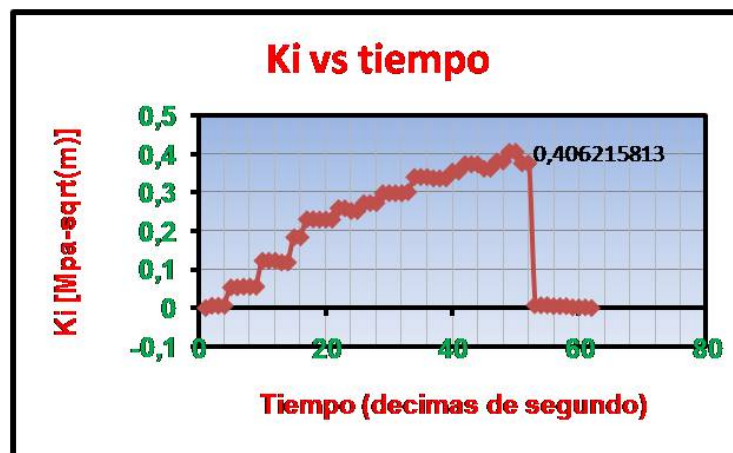


Figura 88. Grafica Carga vs tiempo, prueba N°2



Para esta prueba se obtuvo un valor de índice subcrítico de fractura de 9, como el valor del ISF se encuentra entre un rango de 0 – 120, se puede concluir que la formación analizada tiene un índice subcrítico de fractura muy bajo y por lo tanto se podría decir que tiene una densidad alta de fracturas, pero también se debe indicar que la roca no tuvo un comportamiento adecuado, algo que posiblemente pueda ser causado por una mala ubicación de la muestra sobre el banco.

### 9.3 PRUEBA N°3

En esta prueba también se trabajó con una muestra de formación tambor extraída de la misma roca con el propósito de continuar con el proceso de validación del equipo, del mismo modo antes de iniciar el ensayo se realizaron los respectivos ajustes sobre el equipo y se tomaron fotos de la muestra.

**Figura 89.** Foto de la muestra antes del ensayo N°3



Los datos obtenidos de esta prueba están tabulados en la siguiente tabla.

**Tabla 13.** Datos de las prueba N°3

tiempo	Carga (g)	Desplazamiento (mm)
17:25:29:40	0	0.007
17:25:29:51	48.703	0.011
17:25:29:95	304.945	0.019
17:25:30:06	727.508	0.040
17:25:30:17	727.508	0.059
17:25:30:28	826.414	0.078
17:25:30:39	826.414	0.097
17:25:30:50	1266.961	0.115
17:25:30:60	1266.961	0.133
17:25:30:71	1266.961	0.150
17:25:30:82	1239.984	0.167
17:25:30:93	1239.984	0.183
17:25:31:04	1819.895	0.199
17:25:31:15	1819.895	0.215
17:25:31:26	1819.895	0.230
17:25:31:37	1779.438	0.244
17:25:31:48	1779.438	0.258
17:25:31:59	1765.941	0.272
17:25:31:70	1765.941	0.285
17:25:31:81	1765.941	0.297
17:25:31:92	2242.461	0.309
17:25:32:03	2242.461	0.321
17:25:32:14	2305.395	0.332

17:25:32:25	2305.395	0.343
17:25:32:35	2408.789	0.353
17:25:32:46	2408.789	0.363
17:25:32:57	2408.789	0.372
17:25:32:68	2651.539	0.381
17:25:32:79	2651.539	0.389
17:25:32:90	2687.508	0.397
17:25:33:01	2687.508	0.404
17:25:33:12	2687.508	0.411
17:25:33:23	2916.773	0.418
17:25:33:34	2916.773	0.424
17:25:33:45	2903.281	0.429
17:25:33:56	2903.281	0.434
17:25:33:67	2903.281	0.439
17:25:33:78	3119.062	0.443
17:25:33:89	3119.062	0.447
17:25:34:00	3280.902	0.450
17:25:34:10	3280.902	0.453
17:25:34:21	3280.902	0.455
17:25:34:32	3222.461	0.457
17:25:34:43	3222.461	0.458
17:25:34:54	3465.207	0.459
17:25:34:65	3465.207	0.459
17:25:34:76	3393.281	0.459
17:25:34:87	3393.281	0.458
17:25:34:98	3393.281	0.457
17:25:35:09	3550.621	0.456
17:25:35:20	3550.621	0.454
17:25:35:31	3415.758	0.451
17:25:35:42	3415.758	0.448
17:25:35:53	3415.758	0.445
17:25:35:64	3303.379	0.441
17:25:35:75	3303.379	0.437
17:25:35:85	3159.523	0.432
17:25:35:96	3159.523	0.427
17:25:36:07	3110.07	0.421
17:25:36:18	3110.07	0.415
17:25:36:29	3110.07	0.408

17:25:36:40	3029.152	0.401
17:25:36:51	3029.152	0.393
17:25:36:62	3002.184	0.385
17:25:36:73	3002.184	0.377
17:25:36:84	3002.184	0.368
17:25:36:95	3105.582	0.358
17:25:37:06	3105.582	0.348
17:25:37:17	2889.797	0.338
17:25:37:28	2889.797	0.327
17:25:37:39	2889.797	0.315
17:25:37:50	2458.242	0.303
17:25:37:60	2458.242	0.291
17:25:37:71	2210.992	0.278
17:25:37:82	2210.992	0.265
17:25:37:93	215.031	0.251
17:25:38:04	215.031	0.237
17:25:38:15	215.031	0.222
17:25:38:26	161.09	0.207
17:25:38:37	161.09	0.192
17:25:38:48	161.09	0.175
17:25:38:59	39.711	0.159
17:25:38:70	39.711	0.142
17:25:38:81	0	0.124

En esta prueba se observó que el comportamiento físico de la fractura fue el que se esperaba, debido a que la fractura se propagó a través del concentrador de esfuerzos, como se puede observar en la siguiente figura.

**Figura 90.** Foto de la muestra después del ensayo N°3



Luego de los datos obtenidos el siguiente paso fue realizar el respectivo tratamiento y análisis de estos. Se determino el modo uno del factor de dureza a la fractura crítico ( $K_{I\_critico}$ ), la velocidad critica de propagación a la fractura y la carga critica. De estos cálculos se obtuvieron los siguientes datos, un  $K_{I\_critico}$  de 0.483318437 (Mpa-sqrt(m)), una carga critica de 34,796(New) y una velocidad de propagación critica de la fractura de 0.0000914194 (m/s).

**Figura 91.** Grafica  $K_I$  vs tiempo, prueba N°3

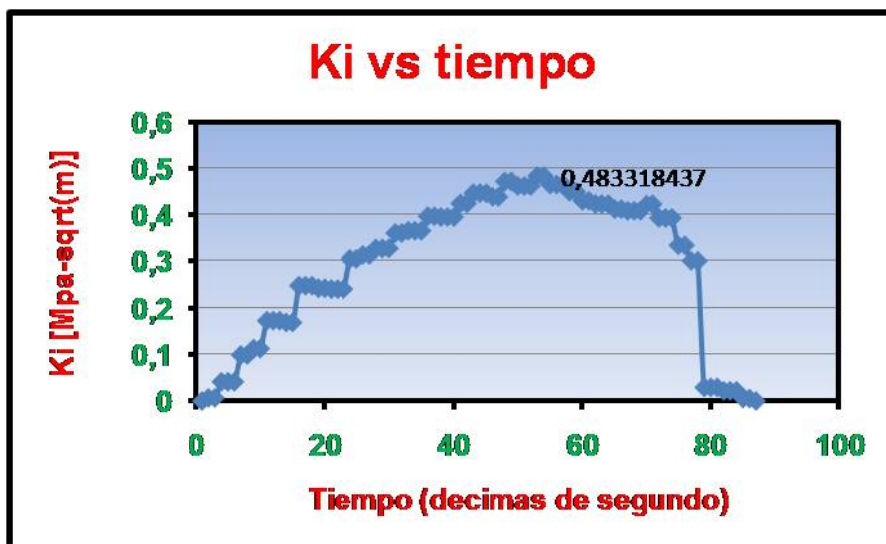


Figura 92. Grafica Carga vs tiempo, prueba N°3



Para esta prueba se obtuvo un valor de índice subcrítico de fractura de 24, como el valor del ISF se encuentra entre un rango de 0 – 120, se puede concluir que la formación analizada tiene un índice subcrítico de fractura bajo y por lo tanto se podría decir que es propensa a presentar muchas fracturas.

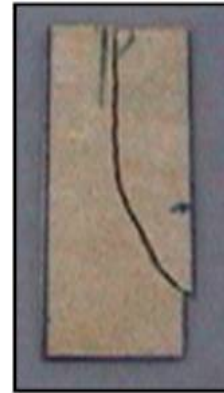
#### 9.4 RESULTADOS OBTENIDOS DE OTRAS PRUEBAS

Se realizaron otras pruebas con rocas de la misma formación tambor, debido a que se quería encontrar un parámetro o algún valor constante que diera certeza del verdadero comportamiento de esta y la repetitividad del equipo. En las figuras que se muestran a continuación se puede observar el resultado de estas pruebas.

**Tabla 14.** Datos de ensayo

<b>Datos de ensayo figura 95</b>	
<b>ISF</b>	23
<b>V_critica</b>	0.000091863 (m/s)
<b>KI_critico</b>	0.4798573(Mpa-sqrt(m))
<b>Carga Critica</b>	35.50096 (N)

**Figura 93.** Muestra ensayada



Análisis: Índice de fractura bajo, formación propensa a fracturarse

**Tabla 15.** Datos de ensayo

<b>Datos de ensayo figura 96</b>	
<b>ISF</b>	16
<b>V_critica</b>	0.000111457 (m/s)
<b>KI_critico</b>	0.3851746(Mpa-sqrt(m))
<b>Carga Critica</b>	25.58856 (N)

**Figura 94.** Muestra ensayada



Análisis: Índice de fractura bajo, formación propensa a fracturarse

**Tabla 16.** Datos de ensayo

<b>Datos de ensayo figura 95</b>	
<b>ISF</b>	16
<b>V_critica</b>	0.000121457 (m/s)
<b>KI_critico</b>	0.3679232(Mpa-sqrt(m))
<b>Carga Critica</b>	15.15511 (N)

**Figura 95.** Muestra ensayada

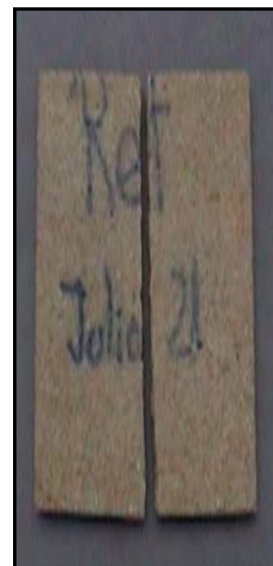


Análisis: Índice de fractura muy bajo, formación presenta alta densidades de fracturas.

**Tabla 17.** Datos de ensayo

<b>Datos de ensayo figura 96</b>	
<b>ISF</b>	22
<b>V_critica</b>	0.000091963 (m/s)
<b>KI_critico</b>	0.485763 (Mpa-sqrt(m))
<b>Carga Critica</b>	33.68691 (N)

**Figura 96.** Muestra ensayada



Análisis: Índice de fractura bajo, formación propensa a fracturarse

De los resultados obtenidos de los ensayos realizados se puede concluir que la media aritmética de estos es de 17, que la formación tabor tiende a tener un índice subcrítico de fractura bajo, dado que de los resultados obtenidos ninguno fue mayor de 25, por lo que se puede decir que esta formación tiene alta densidad de fracturas que se encuentran espaciadas irregularmente y se están propagando al mismo tiempo.

## 10. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL EQUIPO

### 10.1 FICHA TÉCNICA

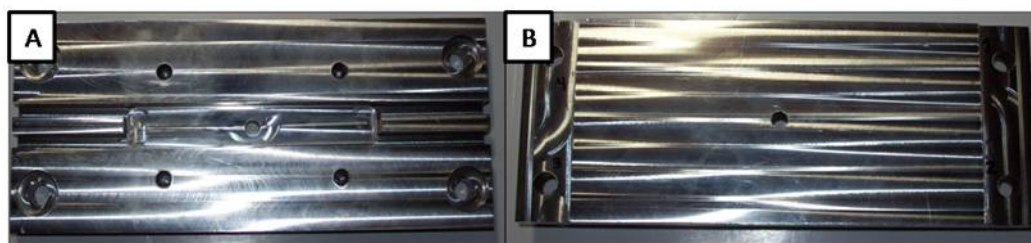
Tabla 18. Ficha técnica del banco de pruebas

<b>Descripción</b>	<b>Medición de un parámetro que indica la susceptibilidad de una formación (roca tipo arenisca) a fracturarse</b>
<b>Tipo</b>	Equipo que utiliza instrumentos para medir desplazamiento y magnitud de una carga de compresión.
<b>Sistema de medición</b>	Celda de carga tipo S con capacidad de 100 lb y micrómetro digital
<b>Peso total de equipo</b>	15 Kg aprox.
<b>Adquisición de datos</b>	Unidad de entrada y salida de datos "SNAP PAC I/O unit" de OPTO-22

### 10.2 MÓDULOS DEL EQUIPO

Para poder llevar a cabo el ensamble del todo el equipo inicialmente es necesario identificar los diferentes elementos que componen el banco de pruebas:

Figura 97. Placa superior. A) Vista superior; B) Vista inferior



**Figura 98.** Tornillos M8,5X1,25



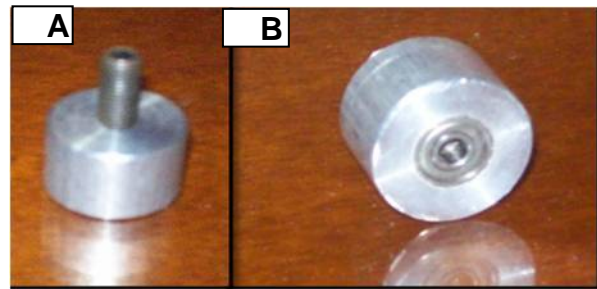
**Figura 99.** Varilla de medición del micrómetro digital



**Figura 100.** Micrómetro Digital



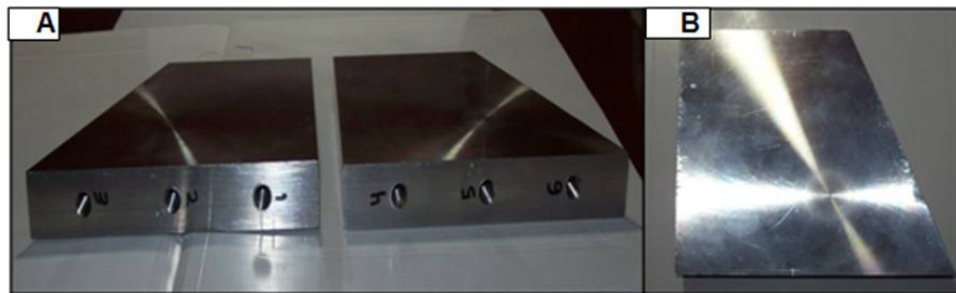
**Figura 101.** Acople celda – Micrómetro digital A) Tornillo 1/4" B) Rodamientos de bolas



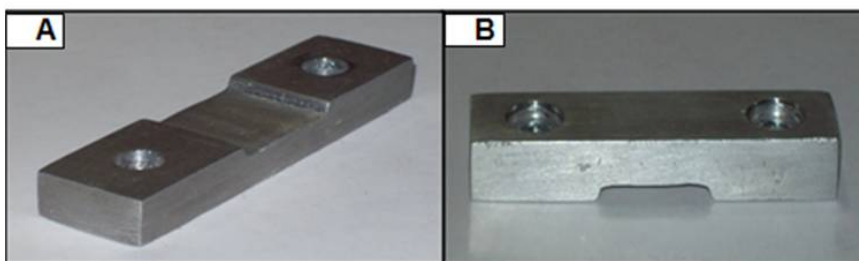
**Figura 102.** Placa Base



**Figura 103.** Placas Laterales A) Vista lateral; B) Vista superior



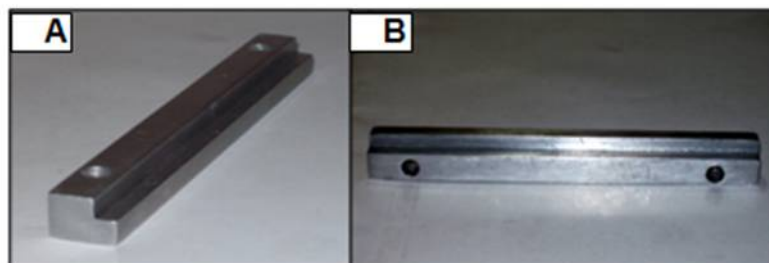
**Figura 104.** Placa para fijar el micrómetro a la celda de carga. A) Vista isométrica; B) Vista Frontal



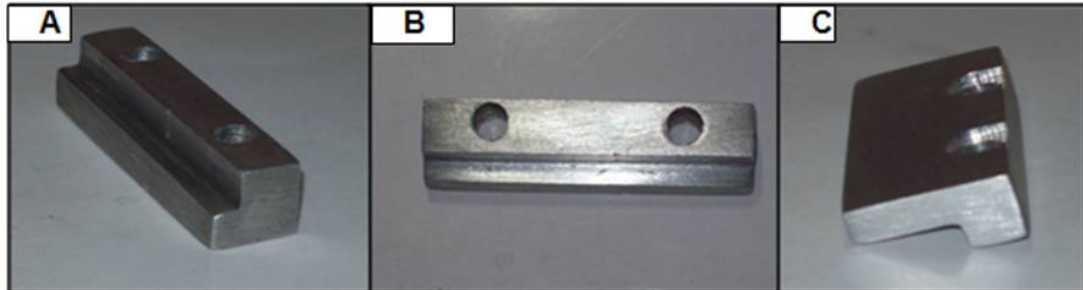
**Figura 105.** Niveladores



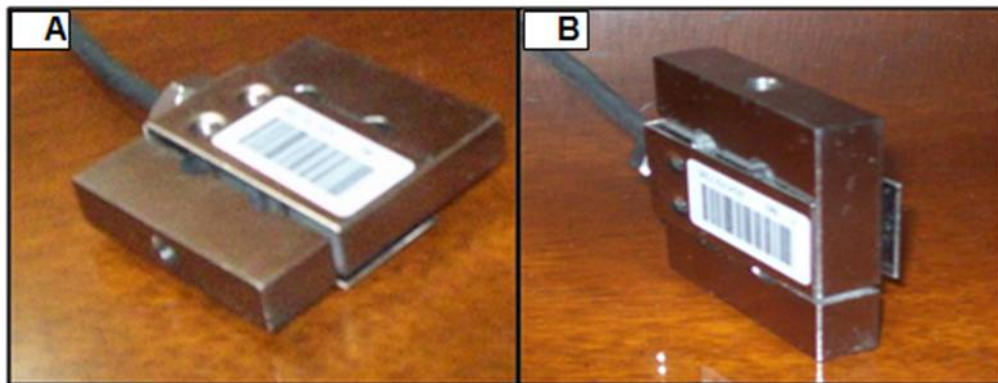
**Figura 106.** Guía para encajar la muestra - lateral  
A) Vista Isométrica; B) Vista Lateral



**Figura 107.** Guías para encajar la muestra  
A) Guía posterior; B) Guía frontal; C) Guía para probeta pequeña-lateral



**Figura 108.** Celda de carga. A) Vista superior; B) Vista isométrica



### 10.3 ENSAMBLE DEL EQUIPO

Antes de empezar el ensamble el banco de pruebas, se deben tener la siguiente consideración previa para el buen funcionamiento de este:

- ✓ La celda de carga debe estar previamente calibrada con el fin de obtener con precisión la fuerza a compresión aplicada sobre la muestra.

Teniendo en cuenta que ya se conocen todos los módulos del equipo y que la recomendación ya fue realizada, los pasos para realizar el ensamble son los siguientes:

1. Ensamblar las placas laterales con la placa base con los tornillo M8,5x1,25.

**Figura 109.** Ensamble placa laterales-placa base



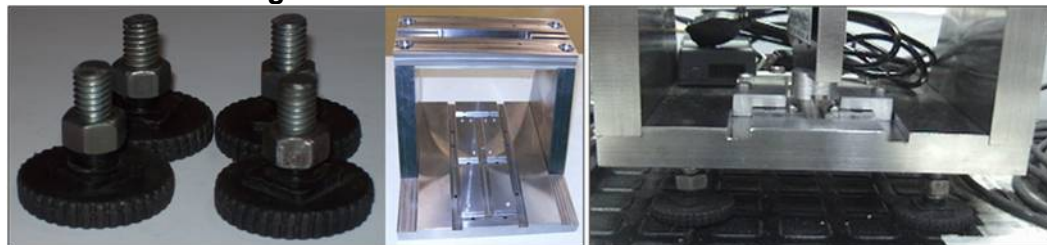
2. Ensamblar la placa superior con el ensamble anterior por medio de tornillos M8,5x1,25m, esto para armar el modulo estructural.

**Figura 110.** Modulo estructural



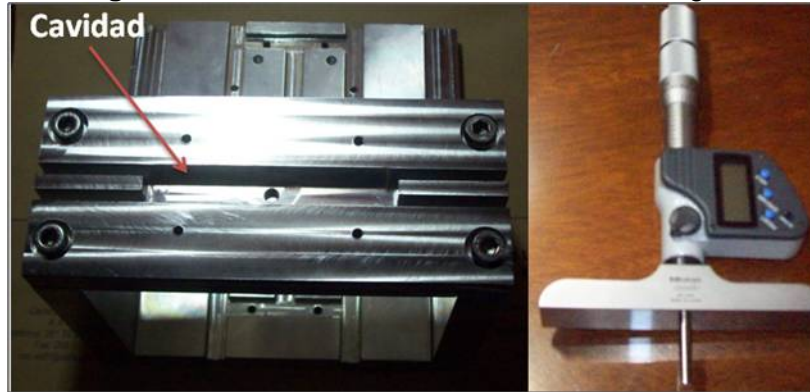
3. Colocar los cuatro niveladores en el modulo estructural

**Figura 111.** Modulo estructural-Niveladores



4. Montar el micrómetro digital sobre la cavidad superior del modulo estructural.

**Figura 112.** Modulo estructural - Micrómetro digital



Para realizar el siguiente paso es necesario insertar el rodamiento de bolas sobre el dispositivo que acopla el micrómetro digital con la celda de carga (ver figura 113).

**Figura 113.** Acople celda de carga con micrómetro digital



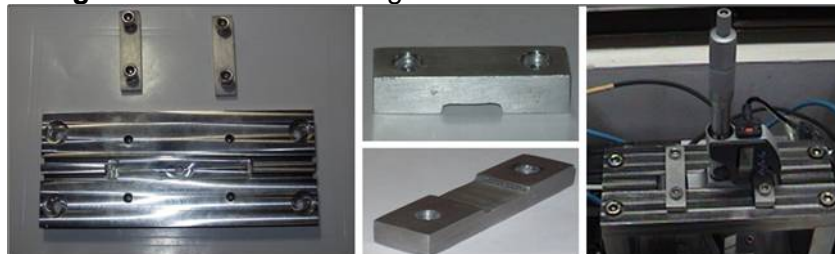
5. Con el acople anterior y el paso cuarto realizado se inserta a presión la varilla del micrómetro sobre el rodamiento de bolas, (con el cuidado de no dañar el rodamiento).

**Figura 114.** Micrómetro instalado – acople celda de carga con micrómetro



6. Asegurar el micrómetro digital con el modulo estructura a través de dos placas que van unidas a la placa superior por cuatro tornillos de M6 x 1,0.

**Figura 115.** Micrómetro digital unido al modulo estructural



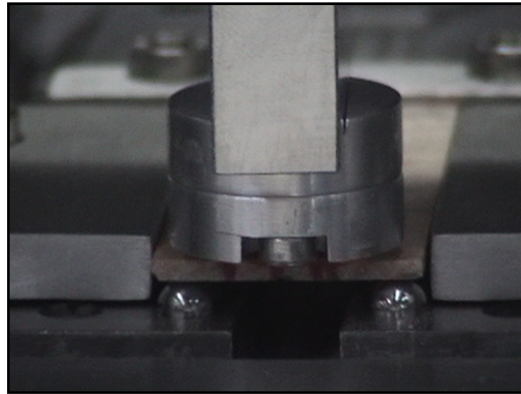
7. Ensamblar la celda de carga al montaje que se lleva hasta el momento a través de un pasador de 1/4" que va en la parte superior de la celda.

**Figura 116.** Modulo estructural – Modulo sistema de desplazamiento – Modulo Sistema de medición



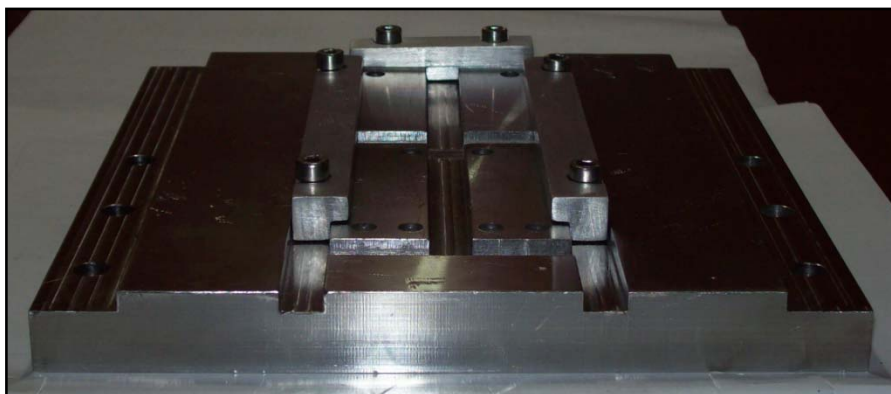
**8.** Ensamblar el dispositivo que sirve para aplicar presión sobre la probeta. Para esta operación es necesario ubicar el acople entre este dispositivo y la celda de carga, además de los dos balines que ejercen presión sobre la muestra y dos tornillos M3x1,0.

**Figura 117.** Dispositivo para aplica presión



**9.** Ensamblar las guías que sirven para encajar la muestra, primero se ubican los 4 balines sobre la placa base, estos balines son los apoyos para situar la probeta. Posteriormente se colocan las guías laterales y posteriores para que la muestra quede bien posicionada sobre los 4 apoyos y cumpla con los requisitos del ensayo de doble torsión.

**Figura 118.** Guías para encajar la muestra



10. Finalmente el proceso de ensamble de las piezas que conforman el banco de pruebas es terminado, se prosigue a conectar la celda de carga y el micrómetro digital con el sistema de adquisición de datos. Por último garantizar con los niveladores que el banco de pruebas se encuentre en condiciones estables de operación.

**Figura 119.** Banco de pruebas ensamblado



#### **10.4 PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO**

Para la operación normal del banco de pruebas, el mantenimiento es mínimo debido a que el equipo no está bajo condiciones severas de operación. El mantenimiento general que se le debe realizar al equipo es un mantenimiento preventivo.

##### **10.4.1 Sistema de medición**

En el sistema de medición, se debe tener especial cuidado sobre la celda de carga, se debe estar comprobando periódicamente (3 meses) que la celda se

encuentra calibrada, para esto se desmonta la celda del banco de pruebas y se realiza el procedimiento que se explico en la sección para la calibración de la celda de carga.

#### **10.4.2 Sistema de desplazamiento**

La varilla de medición del micrómetro digital está expuesta a la oxidación, para evitar esto se debe revisar este elemento periódicamente. Para comprobar si la varilla esta oxidada se gira el micrómetro y no debe haber ninguna restricción en su giro. Si existe un inconveniente es debido a que la varilla se encuentra oxidada y el paso a seguir es desmontar el micrómetro, junto con la varilla y posteriormente lijar y lubricar este elemento con cuidado. Luego se hace el mismo procedimiento para montar y acoplar el micrómetro con la celda de carga. Durante el proceso de desmontar el micrómetro el rodamiento de bolas se daña y se tiene que cambiar e insertar de nuevo a presión sobre el acople celda de carga-micrómetro.

#### **10.4.3 Condiciones ambientales de operación**

Debido a los instrumentos de medición utilizados en el banco de pruebas, se recomienda que las condiciones de operación sean parecidas a los requisitos de confort. Si no se puede cumplir esta recomendación el equipo no debe estar expuesto a un ambiente húmedo y corrosivo.

#### **10.4.4 Módulos restantes del equipo**

Para los demás módulos del banco, se debe tener en cuenta que el mantenimiento es preventivo. Es recomendable revisar visualmente todas las partes y módulos que componen el equipo antes de llevar a cabo un ensayo, con el fin de detectar posibles efectos de un mal ensamble del equipo, errónea nivelación, etc.

## CONCLUSIONES

- ✓ El uso de los software CAD, CAM, CAE y maquinas herramientas CNC brindan precisión y tolerancias ajustadas en el proceso de construcción con resultados óptimos para el presente proyecto.
- ✓ La definición de los protocolos requeridos para el manejo del equipo permiten enmarcar los procedimientos técnicos necesarios para realizar ensayos con el banco de pruebas de medición del índice subcrítico de fractura en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP de forma estandarizada.
- ✓ El diseño del banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura cumplió con los requerimientos geométricos y físicos del montaje para realizar el ensayo de doble torsión, dado que se está aplicando una carga vertical de compresión en el centro de la muestra.
- ✓ Los resultados de las pruebas dependen de la buena preparación de las muestras, razón por la cual deben revisarse detalladamente en cada paso del proceso de corte y pulido, debido a que las tolerancias dimensionales deben estar en el rango establecido para no producir errores en los datos obtenidos.
- ✓ Las propiedades físicas de las rocas influyen de forma significativa en el proceso de preparación de las muestras, debido a que la permeabilidad y el tamaño de grano pueden ocasionar que no se obtengan las medidas finales deseadas de la muestra, por lo cual se debe manejar con mayor cuidado este tipo de roca.

- ✓ El objetivo del proyecto de investigación de diseñar y construir un banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura se cumplió a cabalidad bajo los parámetros establecidos y se convierte en una técnica adicional para estudiar el comportamiento mecánico de rocas en el Instituto Colombiano del Petróleo.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda revisar el acople para aplicar la carga antes de cada ensayo, debido a que la mala ubicación de este puede generar cargas excéntricas y que no se cumpla con los requerimientos del modelo del ensayo de doble torsión, falla que puede producir errores en los datos obtenidos durante la prueba.

Se debe realizar una revisión permanente del cableado y conexiones electrónicas que hacen parte del sistema de adquisición del equipo con el propósito de reducir los errores durante la toma de datos que se puedan generar por ruido en estos, causado por una mala conexión o cables deteriorados.

Se recomienda realizar pruebas geológicas en la roca a estudiar como complemento a los ensayos realizados en el banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura.

Se recomienda hacer una cubierta para proteger los elementos electrónicos como el controlador y los módulos de entrada y salida de datos del banco de pruebas para cuando este sea trasladado a campo.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] **SHIGLEY, Joseph Edward**, Diseño en Ingeniería Mecánica. Mc. Graw Hill. 2002. 6ª Edición.

[2] **BEER, Ferdinand P. y RUSSELL, Johnston E**, Mecánica de Materiales. Mc. Graw-Hill. 2000.

[3] **NARA, Yoshitaka**. Subcritical Crack Growth in Rock. COE Postdoctoral Fellow, Division of Field Engineering for Environment.

[4] **Ko, T. Y. and Kemeny, J.** Experimental study of subcritical crack growth under mode I, mode II and mode III loading - 2008. The University of Arizona, Department of Mining and Geological Engineering, Tucson, AZ, U.S.A.

[5] **Namsu Park, B.S., M.S.** Discrete Element Modeling of Rock Fracture Behavior: Fracture Toughness and Time-Dependent Fracture Growth, Dissertation by Doctor Philosophy-2006 The University of Texas at Austin.

[6] Normativa **ASTM E4-07, ASTM D6026-06, ASTM D653-07f, ASTM D4543-08.**

[7] Disciplina Control Numérico Computarizado (CNC), Universidad Industrial de Santander, Departamento de ingeniería mecánica.

[8] Tutoriales software opto 22.

[9] **M. Ciccotti, G. Gonzato, F. Mulargia.** The double torsion loading configuration for fracture propagation: an improved methodology for the load-

relaxation at constant displacement. Dipartimento di Fisica, Settore di Geofisica, Università di Bologna – 2000

**[10]** M. Saadaouia P. Reynauda, G. Fantozzi, F. Peronnet, J.P. Caspar. Slow crack growth study of plaster using the double torsion method – 1999.

## **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**CATALOGO DE LA CELDA DE CARGA – TIPO S**  
**CAPACIDAD 100 LB, HMB**

# S35

## Load Cell

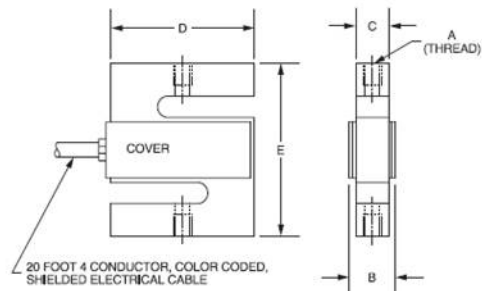
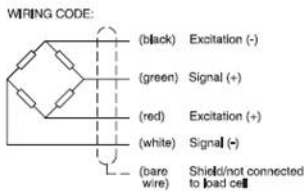


### Special Features

- Capacity range from 50 to 20,000 Lbs.
- Stainless steel construction
- 3 mV/V output, 350 ohm bridge
- Environmentally sealed to IP65

### Dimensions: inch (mm)

CAPACITY	A	B	C	D	E
50 LB	1/4-28 UNF 2B	0.65 (16.5)	0.46 (11.7)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
100 LB	1/4-28 UNF 2B	0.65 (16.5)	0.46 (11.7)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
200 LB	1/4-28 UNF 2B	0.65 (16.5)	0.46 (11.7)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
250 LB	1/4-28 UNF 2B	0.65 (16.5)	0.46 (11.7)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
300 LB	1/4-28 UNF 2B	0.65 (16.5)	0.46 (11.7)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
500 LB	1/2-20 UNF 2B	0.90 (22.9)	0.71 (18.0)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
750 LB	1/2-20 UNF 2B	0.90 (22.9)	0.71 (18.0)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
1000 LB	1/2-20 UNF 2B	0.90 (22.9)	0.71 (18.0)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
1500 LB	1/2-20 UNF 2B	1.15 (29.2)	0.96 (24.3)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
2000 LB	1/2-20 UNF 2B	1.15 (29.2)	0.96 (24.3)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
2500 LB	1/2-20 UNF 2B	1.15 (29.2)	0.96 (24.3)	2.00 (50.8)	2.40 (61.0)
3000 LB	1/2-20 UNF 2B	1.15 (29.2)	0.96 (24.3)	3.00 (76.2)	3.90 (99.1)
5000 LB	3/4-16 UNF 2B	1.15 (29.2)	0.96 (24.3)	3.00 (76.2)	3.90 (99.1)
10000 LB	3/4-16 UNF 2B	1.15 (29.2)	0.96 (24.3)	3.00 (76.2)	3.90 (99.1)
15000 LB	1-14 UNS 2B	1.69 (42.9)	1.50 (38.1)	4.00 (101.6)	5.50 (139.7)
20000 LB	1 1/4-12 UNF 2B	2.19 (55.6)	2.00 (50.8)	5.00 (127.0)	7.00 (177.8)



## Specifications

Model Type	S35																
Accuracy class	NTEP CLASS III																
Maximum number of load cell intervals ( $n_{LC}$ )	3000 DIVISIONS SINGLE																
Maximum capacity ( $E_{max}$ )	lb	50	100	200	250	300	500	750	1000	1500	2000	2500	3000	5000	10,000	15,000	20,000
Minimum load cell verification interval ( $V_{min}$ )	lb	0.004	0.008	0.016	0.020	0.024	0.040	0.060	0.080	0.120	0.160	0.200	0.240	0.400	0.800	1.200	1.600
Sensitivity ( $C_n$ )	mV/V	3 ± 0.3															
Zero balance		0 ± 0.03															
Temperature effect on zero balance ( $TK_0$ )		± 0.018															
Temperature effect on sensitivity ( $TK_c$ ) <sup>1)</sup>	% of $C_n$ / 10°C	± 0.021															
Temperature range +20...+40°C [+70...+105°F]		± 0.014															
-10...+20°C [+15...+70°F]		± 0.030															
Hysteresis error ( $d_{hy}$ ) <sup>9)</sup>	% of $C_n$	± 0.030															
Non-linearity ( $d_{lin}$ ) <sup>9)</sup>		± 0.030															
Creep ( $d_{cr}$ ) over 30 min.		0.025															
Input resistance ( $R_{LC}$ )	Ω	> 350															
Output resistance ( $R_O$ )		350 ± 3															
Reference excitation voltage ( $U_{ref}$ )	V	5															
Maximum excitation voltage ( $U_{max}$ )		15															
Insulation resistance ( $R_{ig}$ )	GΩ	10															
Nominal temperature range ( $B_T$ )	°C [°F]	-10...40 [14...104]															
Service temperature range ( $B_{tu}$ )		-15...70 [5...158]															
Storage temperature range ( $B_{st}$ )		-15...85 [5...185]															
Safe load limit ( $E_L$ )	% of $E_{max}$	120															
Ultimate load limit ( $E_d$ )		200															
Lateral load limit ( $E_{lq}$ )		100															
Permissible dynamic load ( $F_{srei}$ ) (vibration amplitude according to DIN 50100)		70															
Deflection at $E_{max}$ ( $S_{nom}$ ), approx.	in	< 0.015															
Weight, approx.	lb	1					2					4	11	22			
Protection class to EN60529 (IEC529)		IP65															
Material: Measuring element		Stainless Steel															
Cable Fitting Gland		Stainless Steel															
Cable Sheath		PVC															
Coating/Plating		-															

<sup>1)</sup> The sum of data for Non-linearity, Hysteresis and Temperature effect on sensitivity meets the requirements of NTEP HB 44

**ANEXO B**  
**CATALOGO DE MICRÓMETRO DIGITAL – SERIE 329-350**  
**MARCA MITUTOYO**

# CARACTERÍSTICAS DEL MICRÓMETRO

## Depth Micrometer

SERIES 329, 129, 229 — Interchangeable Rod Type

### FEATURES

- 4mm interchangeable rods, with lapped measuring end, provide a wide measuring range.
- The rod length can be adjusted in 25mm or 1" increments.
- With ratchet stop for constant force.
- With measuring rod clamp.
- With SPC output (Series 329).
- With digit counter (Series 229).
- Supplied in fitted plastic case.



### SPECIFICATIONS

Range	Order No.	Base Size	Rod Qty.
0 - 150mm	329-350	101.6x16mm	6 rods
0 - 300mm	329-351	101.6x16mm	12 rods

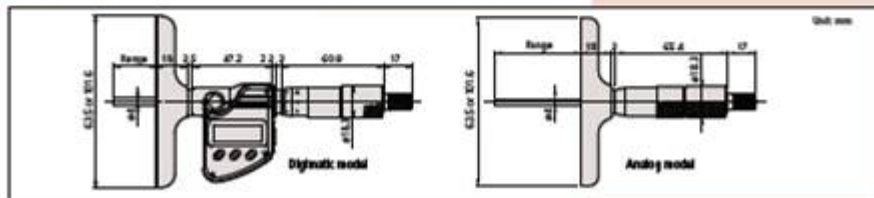
Range	Order No.	Base Size	Rod Qty.
0 - 50mm	129-300	63.5x16mm	2 rods
0 - 100mm	129-311	63.5x16mm	4 rods
0 - 100mm	129-315	101.6x16mm	4 rods
0 - 150mm	129-312	63.5x16mm	6 rods
0 - 150mm	129-316	101.6x16mm	6 rods

Range	Order No.	Base Size	Rod Qty.
0 - 6"	329-350	4"x.63"	6 rods
0 - 152.4mm	329-351	4"x.63"	12 rods

Range	Order No.	Base Size	Rod Qty.
0 - 4"	229-127	2.5"x.63"	4 rods
0 - 4"	229-131	4"x.63"	4 rods
0 - 6"	229-128	2.5"x.63"	6 rods
0 - 6"	229-132	4"x.63"	6 rods

Range	Order No.	Base Size	Rod Qty.
0 - 4"	129-127	2.5"x.63"	4 rods
0 - 4"	129-131	4"x.63"	4 rods
0 - 6"	129-128	2.5"x.63"	6 rods
0 - 6"	129-132	4"x.63"	6 rods
0 - 12"	129-140	2.5"x.63"	12 rods
0 - 12"	129-150	4"x.63"	12 rods

### DIMENSIONS



### Technical Data

Accuracy:  $\pm 0.00127$  mm for micrometer head head (excluding quantizing error for digital models)  
 $\pm 0.0008$   $\pm 0.0004$  mm  
 R: max. measuring length (inch)  
 $\pm 0.4/0.75$  mm for interchangeable rod,  
 L: max. measuring length (mm)  
 Resolution: 0.001mm or 0.0005"/0.001mm  
 Graduation: 0.01mm or .001"  
 Flatness of reference face: 0.0005" R/2.571.2µm for 63.5mm width base, 0.0008" R/4.70µm for 101.6mm width base  
 Flatness of measuring rod face: 0.2µm  
 Parallelism between reference face and measuring rod face: (0.0016  $\pm$  (0.0004 x R))"  
 R: max. measuring length (inch)  
 L: max. measuring length (mm)  
 Measuring rod diameter: 157.74mm  
 Display: LCD  
 Battery: SR44 (1 pc.), 899862  
 Battery life: Approx. 3.5 years under normal use  
 \*Digital model \*\*Analog model

### Function of Digimatic Model

Original, Zero-setting, Data hold, Data output, active conversion (on inch/metric models only)  
 Alarm: low voltage, Counting value comparison error

### Optional Accessories for Digimatic Model

MSZAA62: SPC cable with data switch (40" / 1m)  
 MSZAA63: SPC cable with data switch (80" / 2m)



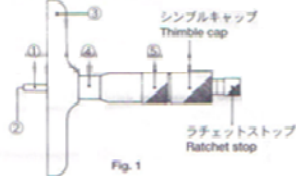
# CATALOGO PARTE MECÁNICA DEL MICRÓMETRO

## 海外移転に関するご注意

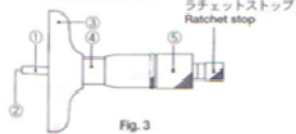
本製品は、「外国為替及び外国貿易法」の規制対象品です。本製品やその技術を海外移転する場合は、事前に弊社にご相談ください。

### 1 各部の名称

#### ●129シリーズ/ Series 129



#### ●128シリーズ/ Series 128



- ① ロッド (スピンドル)
- ② 測定面
- ③ ベース
- ④ スリーブ
- ⑤ ラチェットストップ

129, 128シリーズでは、ベースの裏面に「クランプツマミ」があります。

### 2. 測定の注意

(1) ベース・測定面はきれいに  
測定前に、ベースおよび測定面の油、ゴミ、切粉などをきれいに拭きとってください。

(2) 測定力  
ベースを基準面にしっかりあて、ラチェットストップを使用し、必ず一定の測定力で測定してください。測定力は、ラチェットストップを3~4回(1.5~2回転)回す程度が適切です。(130シリーズにはラチェットストップはありません。)

(3) 視差の防止  
測定値の読み取りはスリーブの基線とシムル目盛の合致点の垂直上より行います。



Fig. 5 基線/Reference line

(4) 基点の確認  
測定前や、測定範囲を変更した場合には必ず基点の確認を行ってください。Fig.6, Fig.7に依り、精密定盤など平らな面上に測定面をあてます。読み取り値がおかしい場合は基点調整を行います(5. 参照)。

- 測定範囲0~25mmの場合  
●Range: 0~25mm(0~1")
- 測定範囲25~50mm以上の場合  
●Range: 25~50mm(1~2")  
and over



Fig. 6



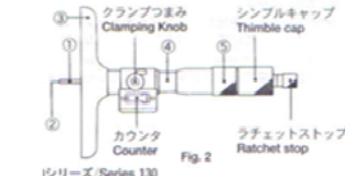
Fig. 7

## Export Control Compliance

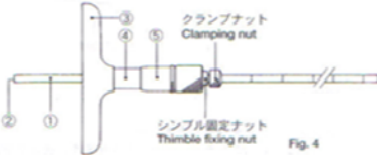
The goods, technologies or software described herein may be subject to National or International, or Japanese Export Controls. To export directly or indirectly such matter without due approval from the appropriate authorities may therefore be a breach of export control regulations and the law.

### 1. Nomenclature

#### ●229シリーズ/ Series 229



#### ●130シリーズ/ Series 130



- ① Rod (Spindle)
- ② Measuring surface
- ③ Base
- ④ Sleeve
- ⑤ Thimble

A clamping knob is provided on the rear side of the base of Series 129 and Series 128.

### 2. Tips on Measurement

(1) Clean base and measuring surface  
Before measurement, wipe the base and the measuring surface clean with soft and lint-free cloth.

(2) Apply constant measuring force  
Apply constant measuring force by turning the ratchet stop about two turns, which are appropriate for iron and steel workpieces, after contacting the measuring surface with a work surface. Series 130 is not provided with the ratchet stop.

(3) Eliminate parallax error  
Take reading of the thimble/sleeve from the view point specified in Fig.5 to eliminate the parallax error.

(4) Check datum point  
Before measurement and after changing the measuring range, check the datum point referring to Fig. 6 and Fig. 7. First, wipe the base and the measuring surface clean. Next, set the measuring surface on a flat surface such as a precision surface plate and apply an appropriate measuring force. Then, make sure the zero line of the thimble coincides with the reference line of the sleeve. If not, adjust the datum point referring to 5.

●測定範囲の最小値のサイズのゲージブロック(2個)をご使用ください。  
例: 測定範囲25~50mm: 25mmのゲージブロック2個。

\* Use two gauge blocks of the minimum size of the range of the mike.  
EX: Two 25mm gauge blocks for the 25-50mm mike.

### 3. 目盛の読み方

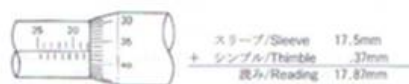


Fig. 8

●229シリーズでは、1/100mmまでカウントで読み取れます。

### 4. 測定範囲の変更

#### ●129・229シリーズ

- ① シンブルを指で固定し、シンブルキャップを外します。
- ② 取り付けられているロッドを抜き、適切なロッドを差し込みます。
- ③ ①と逆の要領で、シンブルキャップをしっかり取り付けます。

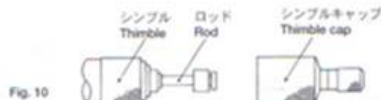


Fig. 10

#### ●128シリーズ

測定範囲の変更はできません。

#### ●130シリーズ

- ① クランプナットをゆるめます。
- ② ロッドを適切な測定範囲にスライドさせます。適切な測定範囲とは、測定範囲を100~125mmにする場合、ロッド上の数字、125の左の円周上の刻み目がクランプナット内部でクリック（軽く引っかかる状態）される位置のことです。
- ③ クランプナットを締めます。

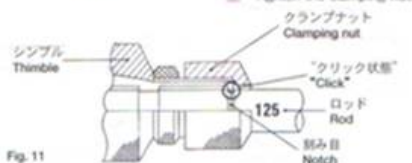


Fig. 11

### 5. 基点調整

#### 5.1 129・229シリーズ

##### 5.1.1 シンブルの基点誤差が±0.01mm以内の場合

クランプつまみを締め、付属のスパナAをスリーブの基準の裏にある穴に差し込み、スリーブを回転させて、基準をシンブル目盛に合わせます。

##### 5.1.2 シンブルの基点誤差が±0.01mmに入らない場合

- ① クランプつまみを締めます。
- ② シンブルが回転しないように指で固定しながら、シンブルキャップを外し、付属のスパナAでシンブル固定ナットをゆるめます。
- ③ シンブルをシンブル固定ナットの方向に押しと自由に回転します。シンブルの目盛をスリーブの基準に合わせます。
- ④ シンブルをスリーブの方向に軽く押し、スパナAでシンブル固定ナットを締めます。このとき、シンブルが回転しないようご注意ください。

### 3. Taking Measurement



Fig. 9

●As for Series 229, 0.01mm (.001") can be also read on the counter.

### 4. Changing Measuring Range

#### ●Series 129 & 229

- ① Unscrew the thimble cap while holding the thimble in your fingers.
- ② Pull the rod out from the thimble, and set a rod of the appropriate size there.
- ③ Screw the thimble cap into the thimble while holding the thimble in your fingers.

#### ●Series 128

Measuring range cannot be changed.

#### ●Series 130

- ① Loosen the clamping nut.
- ② Slide the rod through the clamping nut until the rod clicks in the notch adjacent to the range mark "125 (5")", to obtain the range 100-125mm (4-5").

#### ③ Tighten the clamping nut.

### 5. Datum Point Adjustment

#### 5.1 Series 129 & 229

##### 5.1.1 Deviation within ±0.01mm (.001")

First, tighten the clamping knob. Next, align the reference line of the sleeve with the zero line of the thimble by turning the sleeve with the wrench A (provided) set in the hole behind the reference line of the sleeve.

##### 5.1.2 Deviation out of ±0.01mm (.001")

- ① Tighten the clamping knob.
- ② While holding the thimble in your fingers, unscrew the thimble cap. Then loosen the thimble fixing nut by rotating it with the wrench A (provided) set in the hole on the thimble fixing nut.
- ③ Push the thimble toward the thimble fixing nut, and rotate the thimble so that the zero line of the thimble is aligned with the reference line of the sleeve.
- ④ Push the thimble slightly back toward the sleeve. Tighten the thimble fixing nut with the wrench A while holding the thimble in your fingers.

- ⑤ シンプルキャップを取り付け、クランプつまみをゆるめます。 ⑤ Screw the thimble cap into the thimble, and loosen the clamping knob.

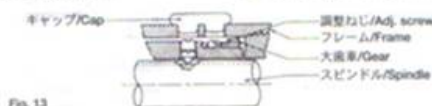


### 5.1.3 シンプルの表示が正しく、カウンタの表示が誤っている場合 (229シリーズ)

- ① カウンタの上のキャップを外し、右の穴の底に調整ねじが見えるまでシンプルを回します。
- ② 調整ねじをゆるめ、ドライバで調整ねじを伸ばします。シンプルを回し、カウンタ表示値にシンプルの目盛を合わせるところで調整ねじを締めます。左の穴底のねじは絶対に回さないでください。
- ③ 基点の確認を行い、キャップを取り付けます

### 5.1.3 If the reading is correct on the thimble/sleeve while incorrect on the counter (Series 229).

- ① First, remove the cap located above the counter. Then, rotate the thimble until the adj. screw is located at the bottom of the right hole.
- ② Loosen the adj. screw. Holding the screw with the screwdriver, rotate the thimble so that the thimble/sleeve reads the same value as that of the counter, and tighten the screw there. Never attempt to rotate the screw at the bottom of the left hole.
- ③ Check the datum point, and replace the cap.



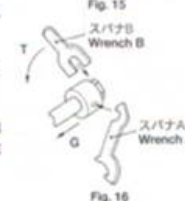
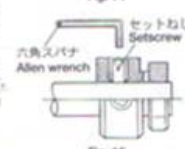
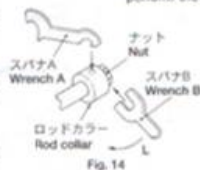
### 5.1.4 ロッドの基点調整

ロッドは、出荷時に基点調整済みですので、次のチェックを行ってからロッドの調整の必要性を判断します。0.25mmのロッドを使って、5.1.1、もしくは5.1.2の方法でデプスマイクロ本体の基点調整を行ったあと、使用する測定範囲のロッドを取り付け、基点の確認を行います。そのとき、基点誤差がある場合、以下の手順で調整します。

### 5.1.4 Datum adjustment of rod

The rods have been datum-adjusted before shipment, so, refrain from further adjustment unless a deviation is found in the following check. First, check that the datum point is set properly using the 0-25mm (0-1") rod referring to 2. (4) and 5.1.1 or 5.1.2, then check the datum point using a rod of size intended for measurement. If deviation is found, perform the following steps.

- ① シンプルを指で固定し、シンプルキャップを外します。
- ② 取り付けられているロッドを抜きます。
- ③ ロッドカラーとナットに付属のスパナA、Bをそれぞれ差し込み、矢印Lの方向にナットを約半回転ゆるめます。
- ④ 付属の六角スパナでロッドカラーのセットねじ (2個) をゆるめ、ロッドカラーをナットの端面まで移動させ、セットねじを軽く締めます。
- ⑤ スパナA、Bをロッドカラーとナットに差し込み、矢印Tの方向にナットを締めます。ロッドカラーは少しずつ矢印Gの方向に移動します。
- ⑥ ロッドを測時本体にセットし、ロッドの基点誤差を除きます。
- ⑦ 終了したら、ロッドカラーのセットねじ (2個) を確実に締めます。



- ① Unscrew the thimble cap, holding the thimble in your fingers.
- ② Pull the rod out from the thimble.
- ③ First, set wrench A to the rod collar and wrench B to the nut. Then, rotate the nut about a half way round in the direction of arrow L as shown in Fig. 14.
- ④ Loosen the two setscrews on the rod collar using the Allen wrench, push the rod collar toward the nut and tighten the two setscrews slightly at that point.
- ⑤ Set wrench A to the rod collar and wrench B to the nut. Rotate the nut in the direction of arrow T as shown in Fig. 16. The rod collar moves in the direction of arrow G as the nut is rotated.
- ⑥ Set the rod in the mike and check the datum point. Repeat steps ③ and ⑤ to adjust the rod.
- ⑦ If rod adjustment is complete, tighten the two setscrews on the rod collar securely.

Note: Do not hold the rod for a long time as this will cause expansion of the rod and spoil the datum adjustment.

長時間ロッドを持って調整しますと、ロッドが膨張し、正確な基点調整ができなくなります。ご注意ください。

### 5.2.1 基点誤差が±0.01mm以内の場合

クランプつまみを締め、付属のキースパナをスリーブの基線の裏にある穴に差し込み、スリーブを回転させて、基線をシンブル目盛に合わせます。

### 5.2.2 基点誤差が±0.01mmに入らない場合

- ① クランプつまみを締めます。
- ② 付属のキースパナをラチェットストップ側面にある穴に差し込み、ラチェットストップをゆるめます。このとき、シンブルが回転しないように、指で固定します。

### 5.2.1 Deviation within $\pm 0.01\text{mm}$ (.001")

First, tighten the clamping knob. Next, align the reference line of the sleeve to the zero line of the thimble by turning the sleeve with the key wrench (provided) set in the hole behind the reference line of the sleeve.

### 5.2.2 Deviation out of $\pm 0.01\text{mm}$ (.001")

- ① Tighten the clamping knob.
- ② Loosen the ratchet stop by rotating it with the wrench (provided) set in the hole on the ratchet stop.

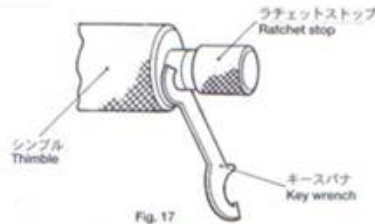


Fig. 17

- ③ シンブルをラチェットストップの方向に押しと自由に回転します。シンブルの目盛をスリーブの基線に合わせます。
- ④ シンブルをスリーブの方向に軽く押し、キースパナでラチェットストップを締めます。このとき、シンブルが回転しないようにご注意ください。
- ⑤ クランプつまみをゆるめます。

- ③ Push the thimble toward the ratchet stop, and rotate the thimble so that the zero line of the thimble is aligned with the reference line of the sleeve.
- ④ Push the thimble slightly back to the sleeve. Screw in the ratchet stop with the key wrench, holding the thimble in your fingers.
- ⑤ Loosen the clamping knob.

## 5.3 130シリーズ

### 5.3.1 基点誤差が±0.01mm以内の場合

付属のキースパナをスリーブの基線の裏にある穴に差し込み、スリーブを回転させて、基線をシンブル目盛に合わせます。このとき、シンブルが回転しないように、指で固定します。

### 5.3.2 基点誤差が±0.01mmに入らない場合

- ① 付属のキースパナをシンブル固定ナット側面にある穴に差し込み、シンブル固定ナットをゆるめます。このとき、シンブルが回転しないように、指で固定します。

## 5.3 Series 130

### 5.3.1 Deviation within $\pm 0.01\text{mm}$ (.001")

Holding the thimble in your fingers, align the reference line of the sleeve with the zero line of the thimble by turning the sleeve with the key wrench (provided) set in the hole behind the reference line of the sleeve.

### 5.3.2 Deviation out of $\pm 0.01\text{mm}$ (.001")

- ① Holding the thimble firmly in your fingers, loosen the thimble fixing nut by rotating it with the key wrench (provided) set in the hole on the thimble fixing nut.

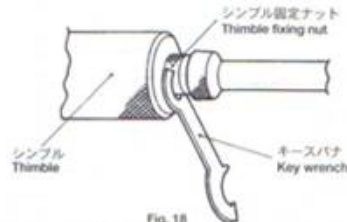


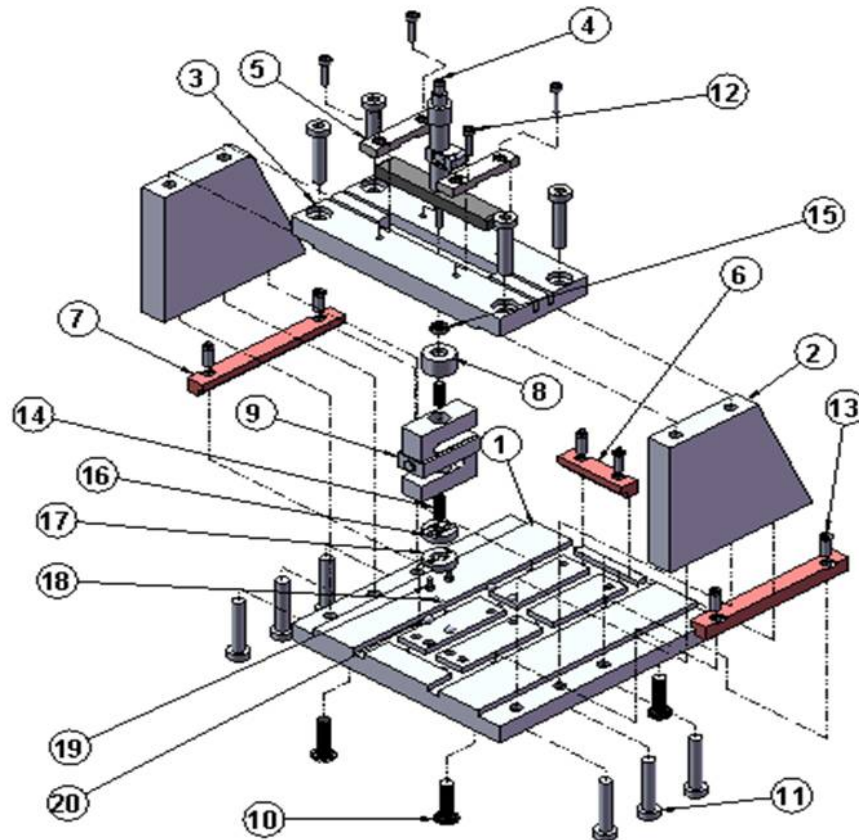
Fig. 18

- ② シンブルをシンブル固定ナットの方向に押しと自由に回転します。シンブルの目盛をスリーブの基線に合わせます。
- ③ シンブルをスリーブの方向に軽く押し、キースパナでシンブル固定ナットを締めます。このとき、シンブルが回転しないようにご注意ください。

- ② Push the thimble toward the thimble fixing nut, and rotate the thimble so that the zero line of the thimble is aligned with the reference line of the sleeve.
- ③ Push the thimble slightly back toward the sleeve. Screw in the thimble fixing nut with the key wrench, holding the thimble firmly in your fingers.

**ANEXOS C**  
**PLANOS**

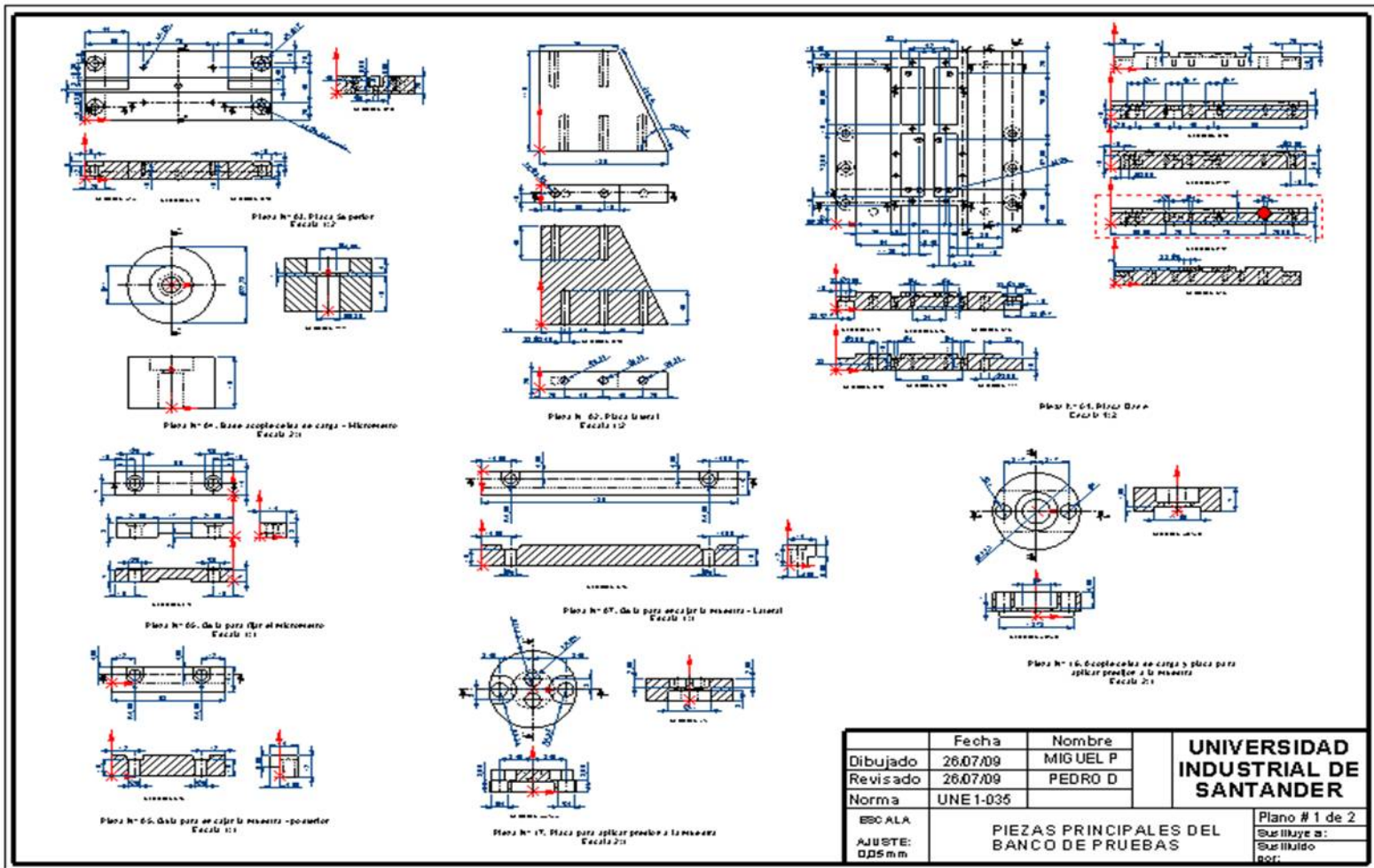
**EXPLOSIÓN DE BANCO DE PRUEBAS PARA CALCULAR  
EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA  
NÚMERO DE PIEZAS:49  
ESCALA 1:2**



MODULOS	PIEZAS	ITEM	CANTIDAD
Estructura	Placa Base	1	1
	Placa Lateral	2	2
	Placa Superior	3	1
Sistema de Medición	Celda de Carga Tipo S	9	1
Sistema de desplazamiento	Micrómetro Digital	4	1
Acoples	Base acople celda de carga-micrómetro	8	1
	Acople celda de carga y pieza de presión	16	1
	Rodamiento de bolas	15	1
	Tornillo 1/4"	14	2

Item	Descripción	Cantidad	Observaciones
1	Placa Base	1	Acero inoxidable
2	Placa lateral	2	Acero inoxidable
3	Placa Superior	1	Acero inoxidable
4	Micrómetro	1	Digital
5	Placa para fijar el micrómetro	2	Distaluminio
6	Gua para escalar la muestra, posterior	1	Perfiles L
7	Gua para escalar la muestra, lateral	2	Perfiles L
8	Base acople celda de carga-micrómetro	1	Distaluminio
9	Celda de carga	1	Capacidad 100Lb
10	Nivelador	4	Capacidad 150kg
11	Tornillo M8X1,25	10	8 rsktbl
12	Tornillo M6X1,0	4	8 rsktbl
13	Tornillo M6X1,0	6	8 rsktbl
14	Tornillo 1/4"	2	Acero inoxidable
15	Rodamiento de bolas	1	sellado
16	Acople celda de carga y pieza de presión	1	Distaluminio
17	Pieza de presión	1	Distaluminio
18	Balls para alisar presión a la muestra	2	diam. 4 mm
19	Tornillo M3X1,0	2	8 rsktbl
20	Balls para mostrar la muestra	4	Diam. 4 mm

Dibujado	26.07.09	Nombre	MIGUEL P	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Revisado	26.07.09		PEDRO D	
Norma	UNE 1-035			
ESCALA:1:2	EXPLOSIÓN BANCO DE PRUEBAS PARA CALCULAR EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA			Página # 1 de 1
AJUSTE: 0,25 mm				Sustituye a: Sustituido por:



	Fecha	Nombre	<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
Dibujado	26.07.09	MIGUEL P	
Revisado	26.07.09	PEDRO D	
Norma	UNE 1-035		
ESCALA: AJUSTE: 0,05 mm	PIEZAS PRINCIPALES DEL BANCO DE PRUEBAS		Plano # 1 de 2 Sustituye a: Sustituido por:

**ANEXOS D**  
**PAPER**

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MEDIR EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS PARA EL INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO

Miguel Fernando Palencia Muñoz, Sergio Celis Ariza. Instituto Colombiano del Petróleo – Universidad Industrial de Santander.

### Resumen

El objetivo del proyecto es diseñar y construir un banco de pruebas que permite medir el Índice Subcrítico de Fractura. Dicha necesidad se debe a que no existe en el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo un equipo que permita medir la dureza de la fractura en rocas (tipo arenisca) y a su vez medir el Índice Subcrítico de Fractura, con el fin de caracterizar las formaciones fracturadas de origen natural en Colombia. Todo esto con el propósito de reducir costos de perforación ocasionados por problemas de inestabilidad durante las perforaciones<sup>1</sup> en el *pie demonte llanero*. Para llevar a cabo esto se implementa la prueba de la doble torsión. Para determinar el ISP los datos son llevados a un PC y por medio de un programa en *Opto 22* se calcula este parámetro. El banco cuenta con especificaciones de excelente rigidez, facilidad en el montaje, estable bajo condiciones de operación y puede ser transportado a cualquier lugar ya que es liviano.

### Introducción

En el campo de la industria petrolera es importante comprender la mecánica de la fractura en la roca tipo arenisca antes de la perforación de los pozos de petróleo y gas, debido a que se debe garantizar su integridad y estabilidad. Existen dificultades en los experimentos de laboratorio debido a los siguientes factores: recoger y analizar muestras débilmente cementadas, analizar individualmente las propiedades petrofísicas y llevar los problemas que surgen de las propiedades a escala de laboratorio a escala de campo.

Debido a las razones mencionadas anteriormente, es de vital importancia el estudio de las propiedades mecánicas de la fractura en rocas que no han sido consolidadas y que son jóvenes geológicamente. Hoy en día se está dando gran importancia al estudio de la caracterización de formaciones fracturadas de manera natural en Colombia, las cuales han sido sometidas a través del tiempo a cargas cíclicas que han ocasionado fracturas que tienden a propagarse a valores de intensidad de esfuerzos menores a los críticos, fenómeno conocido como "*crecimiento subcrítico de la fractura*".

Se puede determinar en experimentos de laboratorio un índice subcrítico de fractura, el cual es una medida del crecimiento subcrítico de la grieta y está influenciado por propiedades petrofísicas tales como: tipo de cemento, volumen, porosidad y tamaño de grano. Este índice es un parámetro que permite saber antes y durante la perforación si la formación en la que se está trabajando es susceptible a fracturarse o se encuentra fracturada. De allí surge la necesidad para el Instituto Colombiano del petróleo de construir un equipo para determinar este parámetro.

### IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL ENSAYO DE DOBLE TORSIÓN PARA MEDIR EL ÍNDICE SUBCRÍTICO DE FRACTURA

Según Park et al. 2008, la prueba de doble torsión (DDT) fue introducida por Kies y Clark (1969) como un método para determinar las velocidades de la grieta en función de la fuerza conductora. Esta prueba utiliza muestras más pequeñas con una geometría sencilla y de fácil preparación, con la cual también se obtienen valores confiables de *dureza de fractura* y además se puede

<sup>1</sup> Información suministrada por el grupo de investigación en Estabilidad de Pozo, [www.wellborestability.org](http://www.wellborestability.org)

determinar el índice subcrítico de fractura<sup>2</sup>. Por esta razón se implementa esta prueba en el banco de pruebas.

### Principio de la prueba de la doble torsión

El principio de funcionamiento de la prueba DDT, se basa en aplicar una fuerza vertical en una muestra plana delgada que tiene las siguientes dimensiones: 1,78 – 3 milímetros de espesor (d), 25,4 – 38,1 milímetros de ancho (W), y 63,5 – 76,2 milímetros de longitud (L). Además de estas características, el espécimen tiene una entalla de 0,5 milímetros de profundidad ubicada longitudinalmente en todo su centro para guiar la fractura a lo largo del centro de esta (ver figura 1).

La muestra con las dimensiones previamente establecidas se ubica sobre cuatro puntos de apoyo espacialmente ubicados en sus extremos, con el fin de generar un momento flector que guíe la fractura a través de la entalla en el instante que se aplica la carga. La fuerza se debe aplicar en el punto medio de un extremo de la muestra donde la línea de acción de la carga se intercepta perpendicularmente con la línea que une los apoyos 1 y 2 (ver Figura 1).

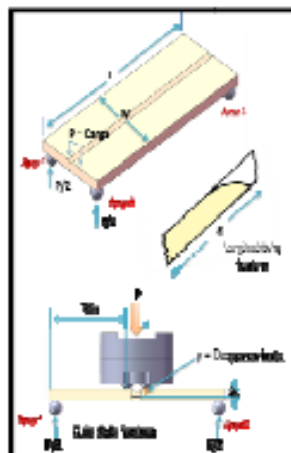


Figura 1. Diagrama esquemático del ensayo de la doble torsión

### Modelo de fracturas de origen subcrítico

El modelo geotécnico usado para predecir la fractura del subsuelo, es un modelo basado en el crecimiento de la fractura subcrítico. En este caso, una fractura se propagará a la velocidad de ruptura, siempre que la intensidad de tensión (MI) en el instante de la fractura exceda la intensidad de tensión crítica (SIC) del material. Sin embargo, las fracturas pueden desarrollarse y propagarse a menores velocidades bajo largos periodos de estado de carga, incluso cuando la intensidad de tensión (MI) es menor que la intensidad de tensión crítica (SIC) del material.

Esta condición, en la cual una fractura se propaga a valores de (MI) < (SIC), es llamada crecimiento subcrítico de la fractura. La velocidad de propagación, V, para el crecimiento subcrítico de la grieta puede ser descrita por la relación empírica:

Donde:

V = Velocidad de propagación de la fractura

MI = Factor de intensidad de tensión

SIC = Factor de intensidad de tensión crítica (Dureza de la fractura)

A = velocidad crítica de propagación de la fractura (constante)

n = Índice subcrítico de fractura

El índice de fractura es un parámetro que indica cuando una formación es más fracturada que otra, esto quiere decir, con valores de n bajos las formaciones están más fracturadas o son más susceptibles a fracturarse comparados con n (ISP) altos, debido a que la velocidad de propagación de la grieta no se alcanza rápidamente lo que le da tiempo a la grieta que se ramifique.

### DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

La alternativa de diseño seleccionada implementa la prueba de Doble Torsión, el objetivo de este ensayo es generar un momento flector que guíe la fractura a través de la muesca o entalla hecha sobre dicho espécimen, y además este sistema debe controlar la profundidad y magnitud de la carga aplicada.

<sup>2</sup> Evans(1972)

Para el diseño del equipo se tuvieron en cuenta requerimientos básicos como:

- ✓ Que sea portable.
- ✓ Ensamble por módulos sencillo.
- ✓ Bajo costo.
- ✓ Debe tener repetitividad.
- ✓ El peso total del equipo debe ser inferior a 30 kg

### Módulos del equipo

En esta sección se muestra todos los módulos que conforma el banco de pruebas. Estos módulos son los siguientes: Estructural, de medición, desplazamiento, adquisición de datos y de acoples. (Ver figura 2).

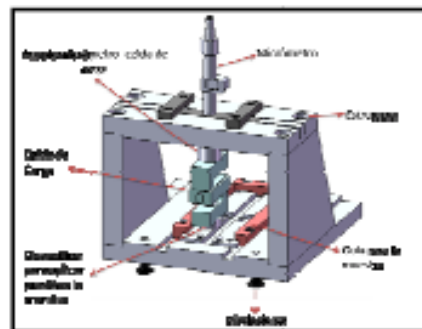


Figura 2. Módulos del Banco de Pruebas

Los módulos cuentan con otros elementos que permiten ensamblar y operar adecuadamente el banco de pruebas (ver figura 3).

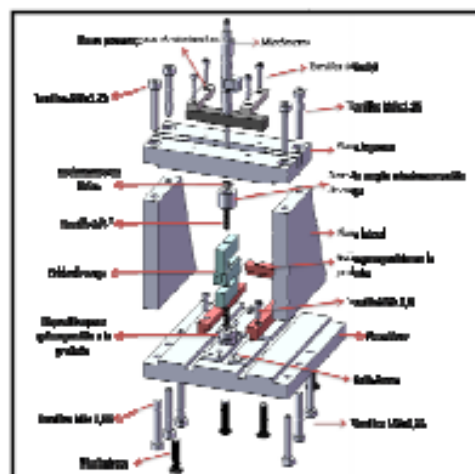


Figura 3. Componentes del banco de pruebas

El análisis estructural del banco de pruebas fue realizado examinando cada una de las partes de los módulos, teniendo en cuenta las cargas actuantes en cada elemento y los factores de seguridad conservadores para evitar algún riesgo de accidente durante su operación. Se realizó una simulación del comportamiento mecánico de los diferentes módulos más críticos del equipo (módulo estructural), aplicándoles sus respectivas cargas. Para este análisis estructural se utilizó el software ANSAS Workbench, para conocer los esfuerzos y deformaciones a los que están sometidos los diferentes elementos del equipo. De este análisis se llegó a la conclusión que el banco de pruebas está sobre diseñado, debido a las dimensiones (espesor 20mm), material (Acero inoxidable 136) y cargas actuantes sobre las piezas que conforman el módulo estructural.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

Luego de la respectiva configuración para utilizar el banco de pruebas para medir el ISP, el siguiente paso fue realizar los respectivos ensayos de doble torsión, para ello se ensamblaron y conectaron todos los módulos y elementos electrónicos que conforman el equipo. Posteriormente se colocó la muestra sobre el banco de pruebas asegurándose que esta estuviera bien ubicada en los cuatro puntos de apoyo (ver figura 4). El siguiente paso fue cuadrar el micrómetro y ponerlo en cero en el punto inicial de contacto entre el dispositivo para aplicar carga y la muestra, pero sin ejercer fuerza sobre ella, esto se hace con el propósito que el micrómetro arranque desde cero y así prevenir errores en los datos tomados.

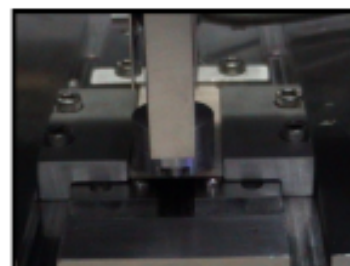


Figura 4. Muestra ubicada sobre el equipo

Configurado el banco se procedió a aplicar carga poco a poco sobre la muestra hasta conducirla a la fractura, al mismo tiempo que se realizaba la respectiva adquisición de datos de la celda y el micrómetro a través de opto-22 y Excel respectivamente, obteniéndose los siguientes datos (ver tabla 1).

Tiempo (s)	Desplaz (mm)	Carga (g)
0.5	0.021	226.27
1	0.06	412.83
1.5	0.073	946.881
2	0.1	1298.43
2.5	0.132	1696.719
3	0.182	1837.876
3.5	0.215	2052.156
4	0.238	2188.516
4.5	0.244	2228.971
5	0.263	2273.26
5.5	0.279	2282.918
6	0.299	2395.303
6.5	0.319	2464.234
7	0.344	2533.164
7.5	0.37	2602.094
8	0.392	2617.826
8.5	0.408	2662.029
9	0.42	2671.776
9.5	0.427	2687.502
10	0.454	2693.494
10.5	0.476	2721.221
11	0.494	2730.213
11.5	0.511	2743.698
12	0.529	2781.91
12.5	0.549	2795.395
13	0.578	2696.496
13.5	0.604	2579.613
14	0.635	1350.67
14.5	0.658	30.723
15	0.678	23.977
15.5	0.701	21.727
16	0.73	8.242

Tabla 1. Datos obtenidos durante la prueba

Se observó que la muestra tuvo un comportamiento esperado en cuanto que esta

fallo por su punto más débil, la entalla, como se puede observar en la figura 5.



Figura 5. Muestra fracturada

Luego de los datos obtenidos el siguiente paso fue realizar el respectivo tratamiento y análisis de estos, para ello se usó el modelo matemático que se implementó para medir el ISP explicado anteriormente. Por tanto el primer paso fue determinar el modo uno del factor de dureza a la fractura crítico ( $K_{I\_critico}$ ), para ello se graficó (MI) contra el tiempo y se tomó el máximo valor que es aquel en donde la muestra empieza a fracturarse y el valor de la carga aplicada comienza a disminuir, obteniéndose un  $K_{I\_critico}$  de 0.388471056 (Mpa- $\sqrt{m}$ ), una carga crítica de 27.967632 (N) y una velocidad de propagación crítica de la fractura de 0.000107457 (m/s).

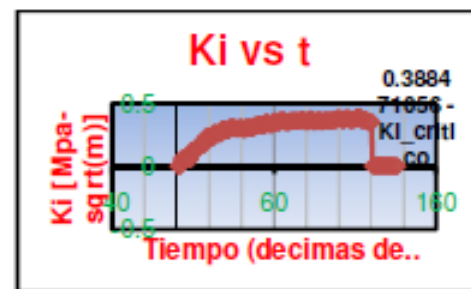


Figura 6. Grafica Ki vs tiempo

Luego de obtener estos valores el siguiente paso fue determinar el ISP de la roca analizada, para el cual se obtuvo un valor de 17, como el valor del ISP se encuentra entre un rango de 0 – 120, se puede concluir que la formación analizada tiene un índice subcrítico de fractura bajo y por lo tanto esta propensa a presentar muchas fracturas.

## CONCLUSIONES

El uso de los software CAD, CAM, CAE y maquinas herramientas CNC brindan precisión y tolerancias ajustadas en el proceso de construcción con resultados óptimos en el presente proyecto.

El diseño del banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura cumplió con los requerimientos geométricos y físicos del montaje para realizar el ensayo de doble torsión, dado que se está aplicando una carga vertical de compresión en el centro de la muestra.

La definición de los protocolos requeridos para el manejo del equipo permite enmarcar los procedimientos técnicos necesarios para realizar ensayos con el banco de pruebas de medición del índice subcrítico de fractura en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP de forma estandarizada.

Los resultados de las pruebas dependen de la buena preparación de las muestras, razón por la cual deben revisarse detalladamente en cada paso del proceso de corte y pulido, debido a que las tolerancias dimensionales deben estar en el rango establecido para no producir errores en los datos obtenidos.

El objetivo del proyecto de investigación de diseñar y construir un banco de pruebas para medir el índice subcrítico de fractura se cumplió a cabalidad bajo los parámetros establecidos y se convierte en una técnica adicional para estudiar el comportamiento mecánico de rocas en el instituto colombiano del petróleo.

#### REFERENCIAS

- [1] **NARA, Yoshitaka.** Subcritical Crack Growth in Rock. COE Postdoctoral Fellow, Division of Field Engineering for Environment.
- [2] **Ko, T. Y. and Kemeny, J.** Experimental study of subcritical crack growth under mode I, mode II and mode III loading - 2008. The University of Arizona, Department of Mining and Geological Engineering, Tucson, AZ, U.S.A.
- [3] **Namsu Park, B.S., M.S.** Discrete Element Modeling of Rock Fracture Behavior: Fracture Toughness and Time-Dependent Fracture

Growth, Dissertation by Doctor Philosophy-2006 The University of Texas at Austin.

[4] Normativa **ASTM D4543-08.**

[5] **M. Ciccotti, G. Gorzato, F. Mulargia.** The double torsion loading configuration for fracture propagation: an improved methodology for the load-relaxation at constant displacement. Dipartimento di Fisica, Settore di Geofisica, Università di Bologna – 2000

[6] **M. Saadaouia P. Reynauda, G. Fantozzi, F. Peronnet, J.P. Caspar.** Slow crack growth study of plaster using the double torsion method – 1999.