

**“DESARROLLO DE CORRELACIONES ENTRE EL MODULO DE  
INDENTACIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO EN MATERIAL ROCOSO”**

**DEYNA DAYANA MARTÍNEZ DÍAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO – MECANICA**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**BUCARAMANGA 2012**

**“DESARROLLO DE CORRELACIONES ENTRE EL MODULO DE  
INDENTACIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO EN MATERIAL ROCOSO”**

**DEYNA DAYANA MARTÍNEZ DÍAZ**

**Trabajo de investigación, presentado como requisito de grado para optar al  
título de Ingeniera Civil**

**Directores:**

**M.Sc. WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ  
Docente Escuela de Ingeniería Civil**

**Ing. JENNY MABEL CARVAJAL  
Ingeniera de petróleos ICP**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO – MECANICA**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**BUCARAMANGA 2012**

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor extiende sus agradecimientos a:

La Escuela de Ingeniería Civil, a sus docentes por que fueron el abono para cosechar este logro, sus administrativos Nury y Sonia por la ayuda y la confianza en mis años de auxiliar.

El grupo de investigación “Estabilidad de pozos” por la oportunidad de realizar el este trabajo.

A la Ing. Jenny Mabel Carvajal por su colaboración, al profesor Wilfredo director del proyecto.

Al equipo de laboratorio de Mecánica de rocas: Hernán, Erick, Javier, y a todos los de una u otra forma me brindaron su colaboración en el desarrollo de las pruebas.

Al instituto Colombiano del Petróleo ICP, por facilitar sus Instalaciones y los recursos para el desarrollo de esta investigación.

## DEDICATORIA

Gracias, a Dios y a mi alma mater por la oportunidad de realizar y culminar mis estudios.

A mi Mamá por estar pendiente de mí, a Mi Papá por su apoyo incondicional, a los dos por sus ánimos y cuidados.

A mis hermanas, Ivonne, Erika, y Yadira, el motor para dejar un buen ejemplo.

A Juan David mi pareja y confidente por su ayuda,

A Juan Andrés mi hijo, por Él da animo de seguir adelante.

Deyna Dayana Martínez Díaz

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>17</b>
<b>1. DESCRIPCION DEL PROYECTO</b>	<b>18</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2. OBJETIVOS	19
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
<b>2. MARCO TEORICO</b>	<b>20</b>
2.1. GENERALIDADES	20
2.2. ROCAS SEDIMENTARIAS	20
2.3. LOCALIZACIÓN DE ROCAS SEDIMENTARIAS EN COLOMBIA	21
2.4. PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ROCAS	21
2.4.1. Parámetros elásticos	23
2.5. ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO	24
2.5.1. Criterio de falla de Mohr-Coulomb	26
2.5.2. Envolventes de Mohr	28
2.5.3. Criterio de Micro –Fracturas (Griffith)	29
2.6. PRUEBAS DE LABORATORIO	29
2.6.1. Compresión confinada en muestras de suelo (I.N.V.E-152-07)	29
2.6.2. Parámetros de resistencia del suelo mediante compresión triaxial (I.N.V. E – 153 – 07)	30
2.7. PRUEBA DE INDENTACION	35
2.7.1. Descripción de la prueba	35
2.7.2. Montaje de la probeta	36
<b>3. DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	<b>40</b>
3.1. HIPOTESIS	40
3.2. VARIABLES	40
3.2.1. Variable independientes	41
3.2.2. Variables dependientes	41
3.3. MUESTRAS	42
3.4. TAMAÑO DE LAS MUESTRAS	42
3.5. ESTIMACION DE PARAMETROS	43

<b>4. PRUEBAS PRELIMINARES</b>	<b>45</b>
4.1. PRUEBAS PRELIMINARES, MEDIANTE LA PRUEBA ESTANDAR DEL LABORATORIO:	47
4.2. PRUEBAS PRELIMINARES VARIANDO PARAMETROS EN LA PRUEBA DE INDENTACIÓN	52
4.3. PRUEBAS DE INDENTACION VARIANDO LA VELOCIDAD DE PENETRACION PARA LAS PRUEBAS PRELIMINARES:	52
4.3.1 .Análisis en la zona de carga de las curvas de indentacion variando la velocidad durante la prueba:	55
4.3.2. Análisis en la zona de descarga de las curvas de indentacion variando la velocidad durante la prueba:	57
4.4. FAMILIA DE CURVAS DE LAS PRUEBAS VARIANDO LA FUERZA MAXIMA DE PENETRACION.	58
4.4.1 Análisis en la zona de carga de las curvas de indentacion variando la fuerza maxima de penetracion:	61
4.4.2. Análisis en la zona de descarga de las curvas de indentacion variando la fuerza maxima de penetracion:	62
4.5. FAMILIA DE CURVAS DE LAS PRUEBAS VARIANDO LA VELOCIDAD FINAL DE LA PRUEBA:	64
4.5.1 Análisis en la zona de carga de las curvas de indentacion teniendo en cuenta la velocidad de descarga de la prueba.	65
4.5.2. Análisis en la zona de descarga de las curvas de indentacion teniendo en cuenta la velocidad de descarga de la prueba.	67
4.6. CONSOLIDANDO RESULTADOS EN LAS PRUEBAS PRELIMINARES	68
<b>5. FORMACION LA LUNA</b>	<b>70</b>
<b>6. ANGULOS DE FRICCIÓN INTERNO HALLADOS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL ICP MEDIANTE PRUEBAS DE COMPRESION UNIAXIAL INCONFINADA CON ENVOLVENTE DE FALLA SOBRE LA FORMACION LA LUNA</b>	<b>72</b>
<b>7. PRUEBAS DE INDENTACION</b>	<b>74</b>
<b>8. CORRELACIONES EXPERIMENTALES ENTRE EL MODULO DE INDENTACION Y AL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO SOBRE MATERIAL ROCOSO DE LA FORMACION LA LUNA</b>	<b>80</b>
8.1. CONSTRUYENDO CORRELACIONES EXPERIMENTALES CON EL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO Y LA PRUEBA ESTANDAR DE INDENTACION	80

<b>8.3. EVALUANDO DE LA CORRELACION ENTRE EL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA O EL COEFICIENTE DE FRICCION O EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y EL MODULO DE INDENTACION</b>	<b>89</b>
<b>8.4. METODOLOGIA RECOMENDADA PARA LA APLICACIÓN DE LAS CORRELACIONES EXPERIMENTALES ENTRE PARAMETROS DE INDENTACION Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA O EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.</b>	<b>96</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>98</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>100</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>101</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>103</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Algunas relaciones de los Módulos Elásticos. Fuente: Fjaer 1996 .....	24
Tabla 2 Muestras para pruebas preliminares .....	47
Tabla 3 resultados de las pruebas de indentación estándar.....	50
Tabla 4 Tabla 5 resultados de las pruebas de indentación estándar .....	50
Tabla 6 Tabla 7 resultados de las pruebas de indentación estándar .....	50
Tabla 8 Parámetros de error .....	50
Tabla 9 Resultados de las pruebas de indentación estándar zona descarga.....	51
Tabla 10 Resultados de las pruebas de indentación estándar zona descarga.....	51
Tabla 11 Resultados de las pruebas de indentación estándar zona descarga.....	51
Tabla 12 Parámetros de error prueba estándar zona descarga.....	51
Tabla 13 Parámetros Datos a variar durante la prueba de Indentación.....	52
Tabla 14 Datos de los resultados en la zona de carga .....	55
Tabla 15 Datos de los resultados en la zona de carga .....	56
Tabla 16 Datos de los resultados en la zona de carga .....	56
Tabla 17 Parámetros de error .....	56
Tabla 18 Datos de los resultados en la zona de descarga.....	57
Tabla 19 Datos de los resultados en la zona de descarga.....	57
Tabla 20 Datos de los resultados en la zona de descarga.....	57
Tabla 21 Parámetros de error .....	58
Tabla 22 Datos de los resultados en la zona de carga .....	61
Tabla 23 Parámetros de error .....	62
Tabla 24 Datos de los resultados en la zona de descarga.....	62
Tabla 25 Parámetros de error .....	62
Tabla 26 Datos de los resultados en la zona de carga .....	65
Tabla 27 Datos de los resultados en la zona de carga .....	66
Tabla 28 Parámetros de error .....	66
Tabla 29 Datos de los resultados en la zona de carga .....	67
Tabla 30 Datos de los resultados en la zona de carga .....	67
Tabla 31 Parámetros de error .....	67
Tabla 32 Número de repeticiones obtenidas .....	68
Tabla 33 Información Petrofacies Formación La luna. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas .	70
Tabla 34 Datos de AFI.....	72
Tabla 35 Intervalos de Confianza en función de los errores máximos esperados para los parámetros de indentación en la zona de carga. Fuente: El Autor .....	74

Tabla 36 Intervalos de Confianza en función de los errores máximos esperados para los parámetros de indentación en la zona de descarga. Fuente: El Autor.....	74
Tabla 37 Resultados del modulo de Indentación Formación la Luna. Fuente: Autor.....	75
Tabla 38. Resultados del modulo de Indentación Formación la Luna. Fuente: Autor .....	76
Tabla 39 Datos Obtenidos de la prueba de indentación modificada. Fuente: Autor .....	77
Tabla 40 Datos obtenidos en zona de descarga. Fuente: Autor .....	78
Tabla 41 Datos para correlación Prueba estándar de laboratorio. Fuente: Autor .....	81
Tabla 42 Datos de Carga prueba modificada .....	83
Tabla 43 Datos de descarga prueba modificada.....	84
Tabla 44 Datos prueba modificada. ....	85
Tabla 45 Datos de descarga .....	87
Tabla 46 Datos Prueba Modificadas .....	88
Tabla 47. Datos para evaluar correlaciones.....	89
Tabla 48 Fuente: Autor. ....	90
Tabla 49 Fuente: Autor .....	91
Tabla 50 Fuente: Autor .....	92
Tabla 51 Evaluación de Correlaciones .....	92
Tabla 52 Evaluación de Correlaciones .....	93
Tabla 53 Evaluación de Correlaciones .....	93
Tabla 54 Evaluando resultados .....	95

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Grafica Indentación .....	38
Grafica 2 Curvas de Fuerza vs desplazamiento prueba estándar prueba estándar muestra 200705954 .....	48
Grafica 3 Curvas de Fuerza vs desplazamiento prueba estándar muestra 200718966 ..	48
Grafica 4 Curvas de Fuerza vs desplazamiento prueba estándar muestra 200717195 ..	49
Grafica 5 Curvas de Fuerza vs desplazamiento prueba estándar muestra 200717203 ..	49
Grafica 6 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando velocidad muestra 200694200	53
Grafica 7 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando velocidad muestra 200698088	54
Grafica 8 Curvas de vs desplazamiento variando velocidad muestra 200705967 .....	54
Grafica 9 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando velocidad muestra 200718970	55
Grafica 10 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando Fuerza Máxima de Penetración muestra 200682920.....	59
Grafica 11 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando Fuerza Máxima de Penetración muestra 200694200 .....	60
Grafica 12 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando Fuerza Máxima de Penetración muestra 200698091 .....	60
Grafica 13 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando Fuerza Máxima de Penetración muestra 200705954 .....	61
Grafica 14 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando la velocidad final muestra 200705957 .....	64
Grafica 15 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando la velocidad final muestra 200705956 .....	65
Grafica 16 Familias de Fragilidad. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas .....	71
Grafica 17 Fragilidad vs Profundidad. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas .....	71
Grafica 18 Coeficiente de fricción vs profundidad .....	73
Grafica 19. Dispersión de Modulo de Indentación vs Profundidad prueba estándar. Fuente: Autor .....	76
Grafica 20 Dispersión de datos IM vs Profundidad. Tabla 39 y 40 Fuente: Autor .....	78
Grafica 21 Datos Ángulo de fricción vs Modulo indentación .....	82
Grafica 22 Datos Ángulo de fricción vs Modulo indentación .....	82
Grafica 23 Datos AFI VS Modulo indentación .....	83
Grafica 24 Datos de Carga Tabla 42 .....	84
Grafica 25 Datos de Descarga Tabla 43 .....	85
Grafica 26 Datos tabla 44.....	86
Grafica 27 Datos tabla 46.....	87
Grafica 28 Datos Tabla 46 .....	88

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Diagrama de Cuerpo Libre .....	24
Ilustración 2 Grafica Indentación. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas.....	25
Ilustración 3 Indentador durante la carga y descarga. Fuente: Autor .....	25
Ilustración 4 Relación entre el ángulo y los esfuerzos principales criterio de falla de Mohr-Coulomb. ....	26
Ilustración 5 Envolventes de Mohr. ....	28
Ilustración 6 Esquema del ensayo del corte (a) Sencillo y (b) del corte doble. Fuente: I.N.V.E.154-07 .....	32
Ilustración 7 Dispositivo para el ensayo de Corte Directo. Fuente: I.N.V.E.154-07 .....	33
Ilustración 8 Punto del Indentador .....	36
Ilustración 9 Muestras en el molde.....	36
Ilustración 10 Probeta en el Indentador para prueba. Fuente: Autor.....	37
Ilustración 11 Grafica de resultados Prueba de Indentación. Fuente: Autor .....	38
Ilustración 12 Indentador. Fuente: Autor .....	45
Ilustración 13 Ventana datos prueba estándar .....	47
Ilustración 14 Ventana del Software del Indentador .....	53
Ilustración 15 Ventana del Software del Indentador .....	59

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Esfuerzos.....	26
Ecuación 2 Coeficiente de fricción .....	26
Ecuación 3 Relación ángulos de la ilustración 2.....	27
Ecuación 4 Relación ángulo de fricción y coeficiente de fricción .....	28
Ecuación 5 Deformación Unitaria .....	30
Ecuación 6 Modulo de Indentación .....	39

## RESUMEN

**TITULO:** DESARROLLO DE CORRELACIONES ENTRE EL MODULO DE INDENTACIÓN Y EL ANGULO DE FRICCIÓN INTERNO EN MATERIAL ROCOSO\*.

**AUTOR:** MARTINEZ DIAZ, Deyna Dayana\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Angulo de fricción interno (AFI), modulo de indentación, correlaciones.

## RESUMEN

En este trabajo se desarrollo una correlación que permitirá conocer el ángulo de fricción interno de material rocoso de manera indirecta con el modulo de indentación que es un dato hallado, mediante la prueba de indentación la cual es una prueba sencilla de realizar y cuenta con un equipo portable lo que facilitaría su uso en el diseño de un modelo geomecánico para un yacimiento el cual involucra un conocimiento detallado, de esta forma se pretende tener un mejor control del parámetro de la fricción el cual es uno de los parámetros con mayor incertidumbre, de igual forma ayudara a disminuir costos de operación ya que las muestras utilizadas para realizar esta prueba son los ripios de perforación que se producen de forma constante en la zona de perforación y no se necesitaría de corazones los cuales son muy difícil y costosos de obtener para realizar la prueba triaxial con envolvente de falla para conocer el ángulo de fricción.

Lo que se pretende con este proyecto es el de demostrar la factibilidad de usar una prueba sencilla para hallar una correlación que permita el control de una propiedad mecánica en tiempo real y con el nivel de confianza necesario para garantizar un ajuste adecuado en los modelos geomecánico.

---

\* Trabajo de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: M.Sc. Wilfredo del Toro. Co directora: Ing. Jenny Mabel Carvajal.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOPMENT OF CORRELATIONS BETWEEN INDENTATION MODULE AND INTERNAL FRICTION ANGLE ROCK MATERIAL \*.

Author: MARTINEZ DIAZ, Deyna Dayana \*\*

**KEY WORDS:** internal friction angle (AFI), indentation modulus, correlations.

### **DESCRIPTION:**

In this paper we develop one correlation that will reveal the internal friction angle of rock material indirectly with the indentation modulus that is a fact found by the indentation test which is a simple test to perform and has a team portable thereby facilitating their use in the design of a geo-mechanical model for a field which involves a detailed understanding, of this shape is to have better control of the friction parameter which is one of the parameters with further uncertainty, of equal will help to reduce operating costs because the samples used for this test are the drill cuttings that occur constantly in the area and would not require drilling of hearts which are very difficult and costly to obtain for the triaxial test failure envelope to know the angle of friction.

The aim with this project is to demonstrate the feasibility of using a simple test to find a correlation that allows control of a mechanical property in real time and with the level of confidence necessary to ensure a proper fit in geo-mechanical models.

---

\*Faculty of Physical Engineering

\*\*Mechanics, School of Civil Engineering, Director: M.Sc. Wilfredo del Toro. CoDirector Eng: Jenny Mabel Carvajal.

## INTRODUCCIÓN

Existen pruebas de laboratorio para caracterizar algunas propiedades mecánicas de manera directa como lo es la prueba triaxial con la cual se puede hallar la resistencia compresiva uniaxial (UCS) y si se hace una envolvente de falla también se puede conocer el ángulo de fricción interna (AFI) el problema de esta prueba radica en la complejidad que existe durante su ejecución, por este motivo no se puede realizar un seguimiento a algunos parámetros durante la perforación y muchas veces se presentan problemas de inestabilidad que se relacionan con la respuesta mecánica ante la nueva condición de esfuerzos, el ángulo de fricción interno actualmente es uno de los parámetros con mayor incertidumbre durante el diseño de un modelo geomecánico.

El desarrollo de correlaciones experimentales confiables que permitan obtener el ángulo de fricción interno mediante el uso de la prueba de indentación realizada sobre ripios obtenidos durante la perforación producto de la inestabilidad del pozo, lo que podría contribuir con la posibilidad de caracterizar el AFI en tiempo real debido a que el equipo para el desarrollo de la prueba es compacto y portátil lo que daría como consecuencia un adelanto técnico y económico.

# 1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cómo utilizando la prueba de indentación podemos obtener el ángulo de fricción interno de una roca y de qué manera ayuda a conocer este parámetro? Al realizar una perforación se altera la distribución de esfuerzos y el equilibrio existente en el suelo o la roca, por tal efecto debemos realizar diferentes pruebas directas o indirectas para conocer el comportamiento mecánico del material y los diferentes parámetros que lo caracterizan como lo son: UCS, Cohesión, Fricción, Módulos elásticos, entre otros. Por tal motivo se realiza el diseño de un modelo geomecánico en él se involucran parámetros que tienen una gran incertidumbre y los cuales se deben controlar antes y después de la perforación. Una de esas variables es el ángulo de fricción interno (AFI) de las rocas, del cual no tenemos un control en tiempo real ya que las pruebas existentes se deben realizar en el laboratorio creando esto demoras y aumento de tiempos no productivos. Por otra parte existe una gran dificultad para obtener muestras que sirvan para utilizarlas en la prueba triaxial, ya que con esta prueba es con la cual se calcula el ángulo de fricción interno.

Para facilitar el control de esta parámetro (AFI) lo se quiere con este proyecto es realizar una correlación entre el ángulo de fricción interno y los datos obtenidos en la prueba de indentación. Se selecciono la prueba de indentación debido a que es una prueba fácil, rápida y que se puede realizar en campo debido a que no se requiere de ambientes o condiciones especiales o controladas para su ejecución; tampoco se requieren muestras especiales y puede realizarse sobre ripsos de perforación.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Proponer dos metodologías que permitan correlacionar la prueba de indentación sobre rocas con el ángulo de fricción.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar y realizar pruebas de indentación.
- Hallar valores de correlaciones entre el ángulo de fricción interno y los datos obtenidos en las prueba de indentación.
- Realizar pruebas triaxiales para validar los valores obtenidos en las correlaciones.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1. GENERALIDADES

La descripción de un modelo geomecánico involucra un conocimiento detallado de algunas propiedades mecánicas de las rocas, tener una idea del comportamiento del material rocoso frente a la acción de una fuerza aplicada, es decir cómo se deforma y/o falla.

### 2.2. ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias se originan de los materiales extraídos de la superficie terrestre por agua, viento, glaciares y procesos químicos que la atacan y que constituyen los sedimentos que podemos definir como cualquier material fragmentario orgánico e inorgánico. [1]

La roca sedimentaria se forma en cuatro etapas principales, que son: meteorización, transporte de sedimentos, sedimentación y diagénesis.

**Meteorización:** Es la desintegración y descomposición de las rocas.

**Transporte de sedimentos:** Según la revista ciencia y biología, existen tres tipos de transporte suspensión, saltación y por carga de fondo. En el transporte en suspensión la partícula transportada se mantiene en el seno del fluido y es capaz de recorrer largas distancias sin tener contacto con el suelo. En el transporte de saltación, la partícula en principio se eleva y luego vuelve a caer y así hasta que se para, en este caso la partícula se puede elevar de una a mil veces su diámetro. El transporte por carga de fondo consiste en que la partícula se eleva una pequeña fracción de su diámetro y luego vuelve a caer, se desplaza pocas veces su diámetro.

**Sedimentación:** Proceso por el cual un material transportado se depositan.

**Diagénesis:** Proceso de formación de una roca a partir de sedimentos sueltos que sufren un proceso de compactación.

Las rocas sedimentarias de mayor interés en la industria del petróleo son: areniscas y pizarras de tiza, y una diferencia principal entre estas rocas la encontramos en sus granos o poros de tamaño que van desde 0,1mm hasta 1mm en las arenas y hasta el nanómetro rango en las pizarras, esto afecta las características petrofísicas como la permeabilidad, porosidad, además la transmisión de fuerzas a escalas micro son diferentes en los entornos nanómetros y milimétrico

La **porosidad** y **permeabilidad** de las rocas se originan durante el proceso de depósito, las partículas de los sedimentos se ponen en contacto entre sí, dejando espacios libres entre ellas. Estos espacios vacíos se llaman poros y la relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total de poros de la roca, se denomina porosidad. Al encontrarse los poros conectados de tal forma que los fluidos puedan circular, se dice que la roca tiene permeabilidad; Estos conceptos son fundamentales al momento de realizar estudios de exploración y explotación de petróleo, agua subterránea y gas.

### **2.3. LOCALIZACIÓN DE ROCAS SEDIMENTARIAS EN COLOMBIA**

Las rocas sedimentarias en Colombia cubren aproximadamente el 70% a 80% del territorio del país, siendo de gran interés ya que asociadas a ellas se encuentran minerales no renovables de gran importancia para la economía del país: calizas, hierro, sal, yeso, minerales y agregados pétreos, así mismo depósitos energéticos, principalmente petróleo, gas y carbón.

### **2.4. PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ROCAS**

La industria de la construcción ha sido consiente que las condiciones del terreno deben ser consideradas para que las edificaciones no se asienten, inclinen o colapsen. Las construcciones antiguas se realizaban en base a la experiencia del constructor, sin embargo no fue sino hasta en 1776, cuando Coulomb introdujo sus teorías de presión de tierras, Mohr en 1871 presento una teoría de falla para materiales idealmente plásticos, que en combinación con el trabajo de Coulomb, se produjo la expresión de resistencia constante de suelos  $\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\phi$ .

Más recientemente Terzaghi dice: “La mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o la descomposición química de las rocas, independientemente de que tengan o no materia orgánica”, con Terzaghi la Mecánica de Suelos fue reconocida como una disciplina principal de la Ingeniería Civil. La Mecánica de Rocas es una disciplina desarrollada y practicada por ingenieros y geólogos en la industria petrolera y minera.

Dentro de la mecánica de suelos encontramos:

- Teorías de los comportamientos de los suelos sujetos a cargas, basados en simplificaciones necesarias dados el estado actual de la teoría.
- Investigaciones del estado físico de los suelos.
- Aplicación del conocimiento teórico y empírico de los problemas prácticos.

La evaluación de la conducta mecánica de una roca requiere conocer los parámetros que la caracterizan, a continuación algunas definiciones importantes.

- ESFUERZO
- TENSION
- DEFORMACION

Los parámetros mecánicos de una formación rocosa pueden ser clasificados en: parámetros elásticos, parámetros de resistencia, esfuerzos in situ, estos últimos no son propiedad mecánica, pero si influyen en los parámetros elásticos y de resistencia.

#### **2.4.1. Parámetros elásticos**

La mayoría de los materiales tienen la propiedad de resistir y recuperarse de las deformaciones producidas cuando son sometidos a una fuerza, esta capacidad se denomina elasticidad y es la relación lineal entre fuerza aplicada y deformaciones. Cuando el material sufre deformaciones pequeñas por lo general puede recuperarse, la teoría elástica, Ley de Hooke se basa en las diferentes relaciones que pueden existir entre esfuerzo y deformación, mientras su relación siga siendo lineal se originan los módulos elásticos:

- Modulo de Young o modulo elástico (E): Es una medida de rigidez, es decir la resistencia del material a ser comprimido.
- Relación de Poisson ( $\nu$ ): Es la relación entre la expansión lateral y la contracción longitudinal.
- Parámetros de Lamé ( $\lambda$ , G):
- Modulo Bulk (K): Es definido como la relación entre la compresión hidrostática y la deformación volumétrica.

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

Tabla 1 Algunas relaciones de los Módulos Elásticos. Fuente: Fjaer 1996

## 2.5. ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO

En un modelo geomecánico se requieren de algunos datos de entrada como lo es el ángulo de fricción interno (AFI) y se podría definir como la capacidad de una masa de roca para soportar una fuerza cortante; debido a la fricción que se produce entre sus partículas es el ángulo ( $\phi$ ) medido entre la fuerza normal (N) y la fuerza resultante(R), el cual se logra justo antes de que ocurra la falla.

Otras definiciones de fricción indican que es la resistencia al deslizamiento causado por el rozamiento que hay entre las superficies de contacto.

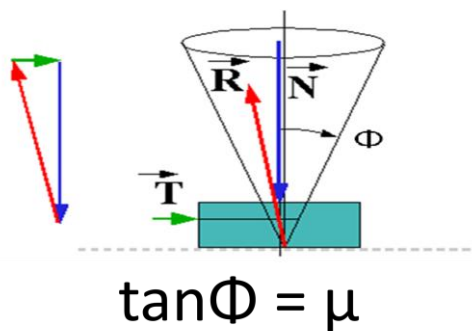


Ilustración 1 Diagrama de Cuerpo Libre

Analogías entre la fuerza de Fricción y la prueba de indentación:

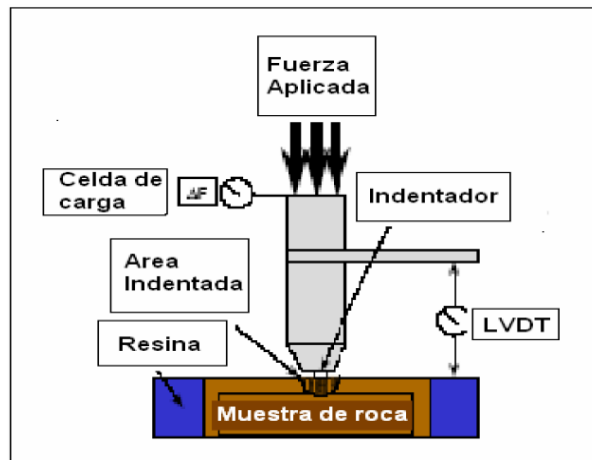
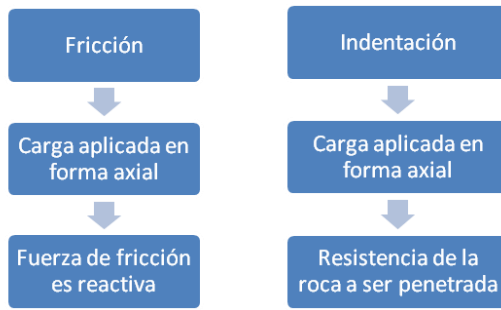


Ilustración 2 Grafica Indentación. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas

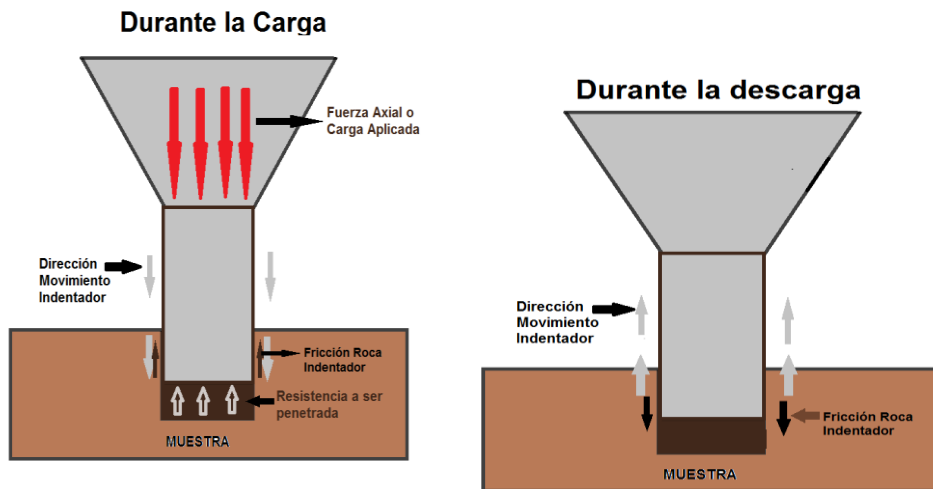


Ilustración 3 Indentador durante la carga y descarga. Fuente: Autor

La ilustración 3 muestra las fuerzas que intervienen durante la carga y descarga del indentador.

### 2.5.1. Criterio de falla de Mohr-Coulomb

Las definiciones de los diferentes criterios de falla son aplicables para predecir el punto de fractura basado en propiedades mecánicas del material las cuales se pueden obtener por medio de pruebas mecánicas simples y estandarizadas.

El criterio de falla busca la manera de relacionar los esfuerzos principales de falla y el ángulo de fricción interno de la siguiente manera:

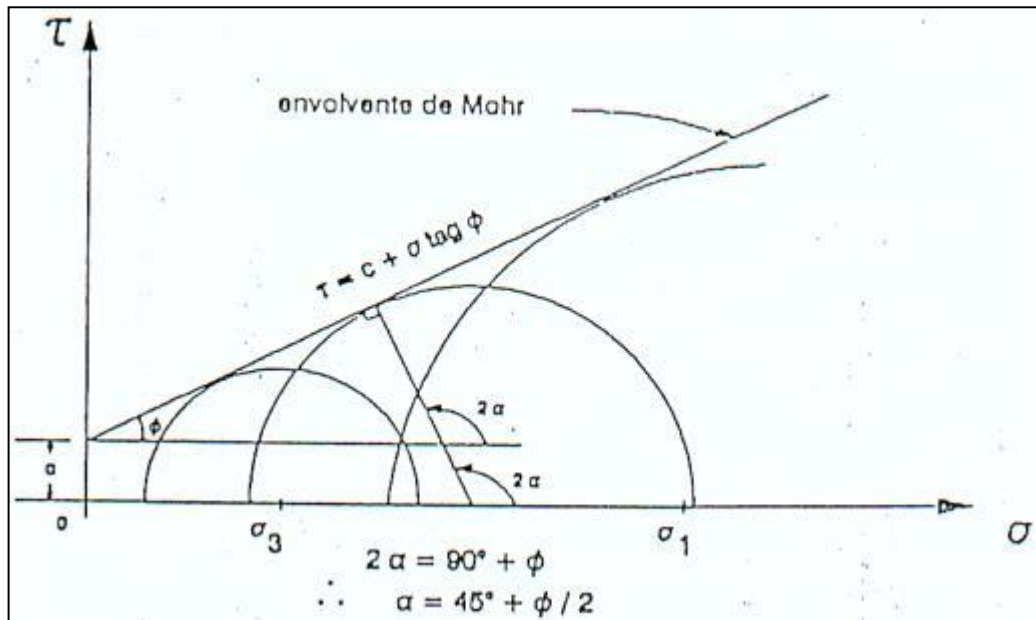


Ilustración 4 Relación entre el ángulo y los esfuerzos principales criterio de falla de Mohr-Coulomb.

Matemáticamente la relación lineal planteada por el criterio de falla de Mohr-Coulomb, predice que el material falla si el esfuerzo cortante en un plano de fractura excede el valor dado por el producto del esfuerzo normal y el coeficiente de fricción interna más un cierto valor inicial.

$$|\tau| = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

Ecuación 1 Esfuerzos

$$\mu = \tan \phi$$

Ecuación 2 Coeficiente de fricción

$\tau$  : Es el esfuerzo de cizalla

$\mu$  : Coeficiente de fricción interna

$\sigma$  : Esfuerzo Normal

$c$  : Cohesión de la roca

La cohesión es la fuerza requerida para sujetar un grano a la superficie de la roca (Higgins Shannon, 2006), y el coeficiente de fricción interna es la resistencia al movimiento a lo largo del plano de cizalla debido a fuerzas friccionante (Rahim, 2003).

Según la Mecánica de suelos de Juarez Badillo, utiliza como criterio de falla líneas curvas, se atribuye la falla al esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y acepta que este depende del esfuerzo normal ( $\sigma$ ) actuante en el plano de falla, se acepta también que la relación entre ambos esfuerzos no es constante. A partir de la ilustración 2, en esta figura la línea recta representa la línea de falla y el círculo que toca la línea de falla, indica el momento de ruptura de la roca, según esto se define:

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\text{sen } 2\beta$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta$$

$\sigma_3$  : Presión de Confinamiento en Psi

$\sigma_1$  : Carga total aplicada en Psi

$2\beta$  : Ángulo formado entre el punto en donde coinciden el círculo de Mohr y la línea de falla

Los ángulos  $\alpha$  y  $\phi$  representados en la ilustración 2 se relacionan así:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\phi}{2}$$

**Ecuación 3 Relación ángulos de la ilustración 2**

Según esta ecuación  $\phi$  varía entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , en la práctica varía entre  $30^\circ$  y  $40^\circ$ , y  $\alpha$  varía entre  $45^\circ$  y  $90^\circ$ .

$$\text{Tan } \phi = \mu$$

#### Ecuación 4 Relación ángulo de fricción y coeficiente de fricción

$\phi$  : Ángulo de fricción, es el ángulo formado por la línea de falla con la horizontal.

### 2.5.2. Envolventes de Mohr

Al dibujar la envolvente de falla se necesitan de ensayos en los que se alcance el nivel de esfuerzos que demanda la falla, cada círculo representa la combinación de esfuerzos compresivos necesaria para producir la rotura. La envolvente representa el conjunto de las combinaciones de esfuerzos compresivos y de cortante que dan lugar a la rotura del material. Si se incrementa la tensión de confinamiento  $\sigma_1$ , aumenta la tensión necesaria para romper el material, el diámetro del círculo se hace mayor.

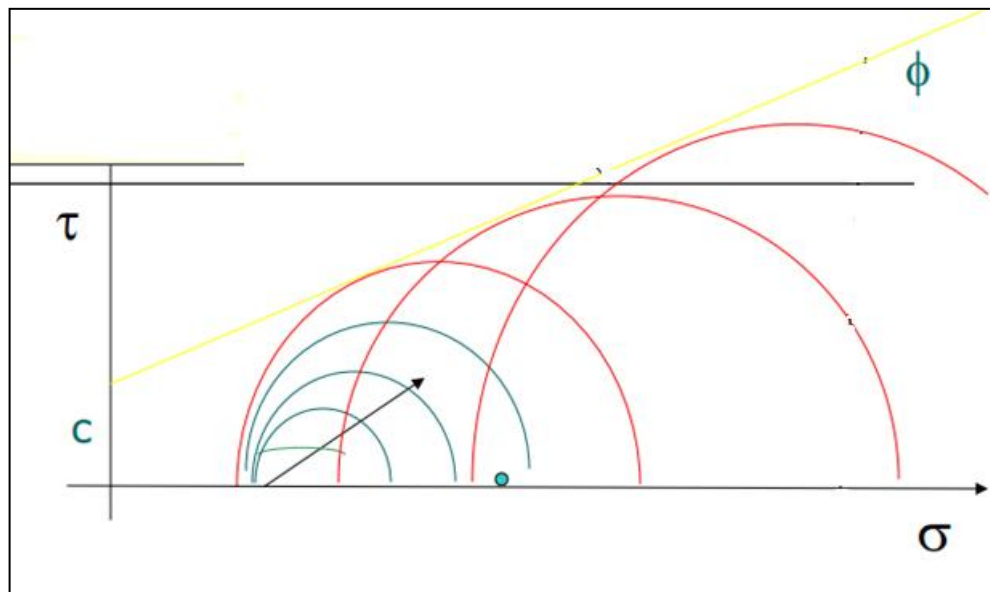


Ilustración 5 Envolventes de Mohr.

### **2.5.3. Criterio de Micro –Fracturas (Griffith)**

Cuando la falla ocurre bajo niveles de esfuerzo muchos menores a los que predice el criterio de fractura, significa que hay otros procesos que pueden estar dominando y se atribuyen a micro fracturas, las cuales se propagan bajo la concentración de esfuerzos que ocurren en la punta de una fractura o grieta.

## **2.6. PRUEBAS DE LABORATORIO**

A continuación se hará una breve reseña de algunas de las pruebas de laboratorio más usadas para caracterizar una roca:

### **2.6.1. Compresión inconfiada en muestras de suelo (I.N.V.E-152-07)**

El objetivo de esta prueba es determinar la compresión in confinada de suelos cohesivos bajo condiciones inalteradas o remodeladas, aplicando carga axial, usando cualquiera de los métodos de resistencia controlada o deformación controlada, la resistencia compresiva inconfiada, es la carga por unidad de área a la cual una probeta de suelo, cilíndrica o prismática, falla en el ensayo de compresión simple, el ensayo se puede realizar controlando la deformación o controlando la carga.

Antes de escoger cual parámetro se controla, la probeta debe ser medida en su diámetro en tres puntos que resultan de dividir la probeta en cuarto.

Para el caso de **controlar la deformación**, la velocidad de deformación unitaria de la probeta debe estar comprendida entre ½% y 2% por minuto. Se toman medidas de las deformaciones y de las cargas cada 30 segundos hasta que las cargas comienzan a disminuir o hasta llegar a una deformación axial del 15%, (lo

que primero suceda). Se escogerá una velocidad en que la rotura ocurra en un lapso entre 1 y 10 minutos.

En el caso de **esfuerzos controlados**, se aplicara la carga para que produzca una deformación axial a una rata de 0.50% a 2% por minuto y se registrara los esfuerzos y las deformaciones cada 30 segundos. La rata de deformación se regulara en tal forma que la falla de probetas sin enfrentar nunca sobrepase de 10 minutos. La carga se deberá proseguir hasta que decrezcan los valores de la carga con el aumento de sección que se produce en la probeta durante la rotura, lo cual se traduce en una disminución de esfuerzo aplicado.

La deformación unitaria, E, se calculará con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Ecuación 5 Deformación Unitaria

### **2.6.2. Parámetros de resistencia del suelo mediante compresión triaxial (I.N.V. E – 153 – 07)**

Los parámetros de resistencia de los suelos mediante el ensayo de compresión triaxial. Los métodos descritos son: el ensayo no consolidado no drenado (UU) con o sin medición de las presiones de poros y el ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado (CU) con o sin medición de la presión de poros. Los parámetros obtenidos son la cohesión no drenada del suelo ( $c_u$ ), o el ángulo de fricción interna ( $f$ ) y la cohesión ©, respectivamente para cada tipo de ensayo y cuando se midan las presiones de agua en los poros, se podrán calcular los valores efectivos de la fricción interna y la cohesión, ( $f'$  y  $c'$ ).

- **Ensayo no consolidado no drenado (UU):** Este método cubre la determinación de los esfuerzos y de las relaciones esfuerzo-deformación de una muestra cilíndrica de suelo inalterada o remoldeada. Las muestras son sujetas a un confinamiento por la presión que ejercerá un fluido en una cámara del triaxial. El drenaje de la muestra no se permite durante la prueba y ni en el corte por compresión, el cual se realizará a una velocidad constante de deformación axial (deformación controlada).

Este método de prueba, provee los datos para determinar las propiedades de esfuerzo y las relaciones del esfuerzo-deformación en condiciones no drenadas del suelo. Los esfuerzos obtenidos serán expresados en esfuerzos totales, no serán corregidos por la presión de poros.

- **Ensayo consolidado no drenado (CU):** Este método cubre la determinación de los esfuerzos y de las relaciones esfuerzo-deformación de una muestra cilíndrica de suelo saturada, que puede ser inalterada o remoldeada, cuando es isotrópicamente consolidada para luego someterla a corte por compresión en condiciones no drenadas, el cual se realizará a una velocidad constante de deformación axial (deformación controlada)

Con este método de prueba se obtendrá el esfuerzo total, el esfuerzo efectivo y la presión de agua de los poros, así como también datos útiles para determinar las propiedades de esfuerzo y deformación del suelo tal como la envolvente de esfuerzos de Mohr y el módulo de Young. Generalmente se prueban tres muestras consolidadas a diferentes esfuerzos de consolidación efectivos, según lo que se desee obtener del ensayo y sus requerimientos, para definir una envolvente de esfuerzos.

El tamaño de las probetas deberán tener un diámetro mínimo de 33 mm (1.3”) y el mayor tamaño de partícula dentro de la muestra de ensayo deberá ser menor que 1/10 de su diámetro. Para muestras con diámetro de 71 mm (2.8”) o más, la

partícula mayor deberá ser menor que 1/6 del diámetro. Si después de la conclusión del ensayo de una muestra inalterada, se encuentran partículas de mayor tamaño, se deberán hacer las anotaciones correspondientes en el Informe. La relación altura-diámetro (h/d) debe estar entre 2 y 2.5, siendo preferible 2.

### 2.6.3. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE MÉTODO DE CORTE DIRECTO (CD) (I.N.V.E-154-07)

Los resultados del ensayo de corte directo son aplicables en situaciones de campo, en donde ha ocurrido la consolidación completa bajo una sobrecarga existente y se produce lentamente la falla, así que el exceso de las presiones de poros se disipa. El ensayo también es útil para la determinación en el material de la máxima resistencia al corte y de la resistencia residual a lo largo de planos conocidos de baja resistencia, el ensayo no da relaciones exactas para relaciones de esfuerzo-deformación.

El ensayo se podrá hacer con corte sencillo o un corte doble, se puede realizar en todos los tipos de suelos, ya sean muestras inalteradas o remoldeadas.

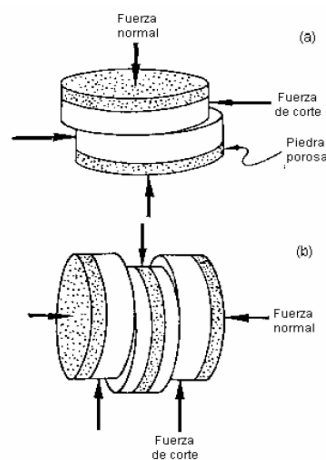
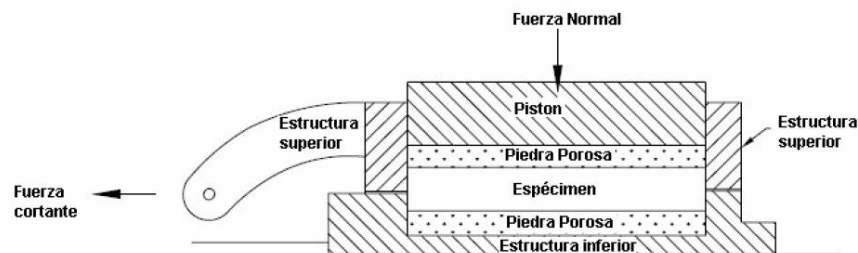


Ilustración 6 Esquema del ensayo del corte (a) Sencillo y (b) del corte doble. Fuente: I.N.V.E.154-07

El ensayo consiste en:

- Colocación de la muestra de ensayo en el dispositivo de corte directo.
- Aplicación de una carga normal determinada.
- Disposición de los medios de drenaje y humedecimiento de la muestra.
- Consolidación de la muestra bajo la carga normal.
- Liberación de los marcos que sostienen la muestra.
- Aplicación de la fuerza de corte para hacer fallar la muestra (Figuras 1 y 2).

Generalmente tres o más muestras son ensayadas, cada una bajo fuerza normal diferente, para determinar los efectos sobre la resistencia al corte y las deformaciones. El intervalo de las cargas normales usadas deberá ser el apropiado y en concordancia para las condiciones del suelo investigado.



**Ilustración 7 Dispositivo para el ensayo de Corte Directo. Fuente: I.N.V.E.154-07**

El dispositivo de corte directo deberá sostener la probeta con seguridad entre dos piedras porosas colocadas una en cada cara, de tal manera que no se presenten movimientos de torsión sobre ella. Debe estar provisto de los dispositivos necesarios para aplicar una fuerza normal en las caras de la muestra, para determinar los cambios en el espesor de la muestra, para permitir el drenaje del agua a través de las piedras porosas insertadas en el fondo y parte superior de la muestra y para sumergir la muestra en agua. El equipo debe ser capaz de aplicar y medir una fuerza de corte para hacer fallar la muestra a lo largo de un determinado plano (corte simple) o de determinados planos (corte doble), los

cuales serán paralelos a las caras de la muestra y determinar los desplazamientos laterales de ésta. Los marcos que sostienen la probeta deben ser lo suficientemente rígidos para evitar su deformación durante el corte. Las diferentes partes del dispositivo deben ser de un material resistente a la corrosión por sustancias contenidas en el suelo o por la humedad del mismo.

El Dispositivo para la aplicación de la fuerza normal debe estar capacitado para aplicar rápidamente la fuerza especificada sin excederla y para mantenerla con una variación máxima de  $\pm 1\%$  durante el proceso de ensayo.

La capacidad del Dispositivo para la aplicación de la fuerza de corte depende más que todo del tipo de control; con control de deformaciones o con control de esfuerzos. Se prefiere, generalmente, con control de deformaciones por la facilidad para determinar tanto el esfuerzo último como la carga máxima. El equipo con control de deformaciones debe tener la capacidad para cortar la muestra a una velocidad de desplazamiento uniforme, con una desviación de  $\pm 5\%$  y debe permitir el ajuste de la velocidad de desplazamiento dentro de un rango que permita ajuste de la rata de desplazamiento de 0.0025 a 1.0 mm/min. La velocidad de aplicación de la carga, depende de las características de consolidación del suelo. Se logra usualmente por medio de un motor con caja de transmisión y la fuerza de corte se determina por medio de un indicador de carga, anillo calibrado o celda de carga.

Las muestras que se utilizan depende si son muestras inalteradas deben ser suficientemente grande para proveer un mínimo de tres probetas de ensayo idénticas, le preparación de la probeta se debe efectuar de tal manera que la perdida de humedad sea insignificante, debe determinarse el contenido de humedad inicial.

Para muestras de suelo compactados, la compactación se deberá hacer con las condiciones de humedad y densidad deseadas, se puede efectuar directamente en el dispositivo de corte o en un molde de dimensiones iguales o mayores al dispositivo de corte, el diámetro mínimo de las nuestras circulares o el ancho

mínimo para muestras rectangulares debe ser alrededor de 50 mm (2”), pero no menor de diez veces el tamaño máximo de las partículas del suelo y el espesor mínimo de la muestra de ensayo, debe ser alrededor de 13 mm (1/2”), pero no menor de seis veces el tamaño máximo de las partículas del suelo. La relación mínima diámetro/espesor o ancho/espesor, según la forma geométrica de la muestra, debe ser 2:1.

## **2.7. PRUEBA DE INDENTACION**

Originalmente se uso para realizar pruebas de dureza (**Durezas brinell, vickers, knoop, y rockwell**), en las cuales la geometría del indentador podría ser de esfera, de pirámide, o cono; la prueba se realizaba sobre metales y luego materiales cerámicos. La prueba de Indentación es una prueba fácil de usar, económica y rápida, el equipo puede ser portátil; de aquí la importancia por encontrar relaciones entre los parámetros que intervienen en la prueba y algunas propiedades mecánicas de las rocas útiles en la industria petrolera.

### **2.7.1. Descripción de la prueba**

En la prueba de Indentación lo que se hace es aplicar de forma axial una carga a un cuerpo y a la vez registrar la respuesta mecánica de dicho cuerpo, la prueba registra la resistencia de las muestras a ser penetradas por un indentador estándar de punta plana el cual se encarga de aplicar la fuerza. El indentador con el cual se realizaran todas las pruebas de este proyecto es una pieza mecánica, de 1 mm de longitud en punta y 1 mm de diámetro



Ilustración 8 Punto del Indentador

La prueba de indentación es una prueba índice debido a que los resultados de la prueba son sometidos a análisis estadísticos muy sencillos con el fin de obtener valores promedios tomadas en cada probeta de ripios.

### 2.7.2. Montaje de la probeta

Para realizar la probeta de ensayo se siguen los siguientes pasos:

- Seleccionar los ripios a indentar, hasta obtener el número de muestras necesario.
- Pulir manualmente cada muestra de roca usando una lija fina hasta obtener una superficie uniforme.
- Verificar que los moldes de las probetas estén limpios y libres de acrílico.
- Colocar las muestras seleccionadas dentro de los moldes de indentación.



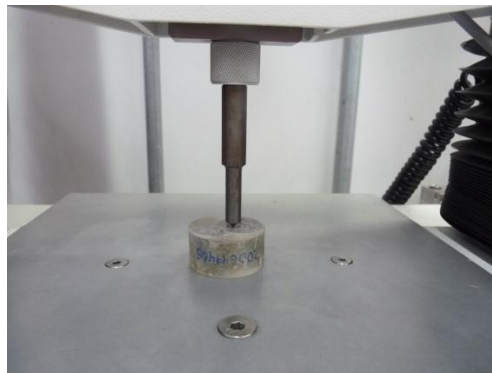
Fig. 2: Muestras ubicadas en el molde



Fig. 3: Molde completo con Muestras

Ilustración 9 Muestras en el molde

- Preparar la resina acrílica en una porción de 2 ml de Resina Polimetacrílica (base sólida) por cada 1 ml de metil metacrilato (parte líquida), agitar la mezcla durante 5 segundos.
- Verter rápidamente la resina en el molde de indentación.
- Dejar solidificar la probeta en una cámara extractora de gases durante 4 horas.
- Retirar la parte inferior del molde y extraer la probeta de ensayo.
- Para finalizar se llevan a pulido los bordes y las caras de la probeta, las muestras deben quedar expuestas y paralelas a la cara que no tiene muestras.
- Se marcan los puntos donde se realizarán las indentaciones en cada muestra de la probeta.



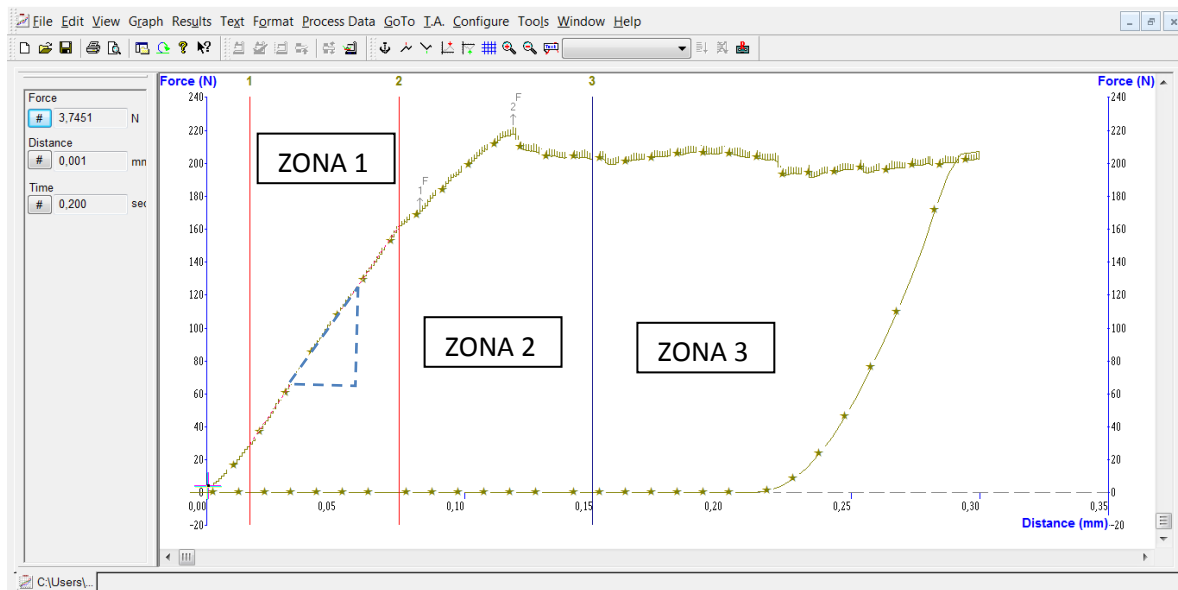
**Ilustración 10** Probeta en el Indentador para prueba. Fuente: Autor

Los pasos antes mencionados fueron validados y son usados en el laboratorio de Mecánica de rocas del ICP (Instituto Colombiano del Petróleo), la resina acrílica que se utiliza es usada por los dentistas, sus características mecánicas dan soporte a las muestras, encapsulándolas y facilitando realizar el ensayo en muestras tan pequeñas, para que la resina no aporte un esfuerzo adicional a la

roca el punto de indentación debe estar como mínimo a 3 mm hacia el interior del ripio y distanciadas 5 mm entre puntos indentados.

El equipo apto para llevar a cabo las pruebas de indentación debe tener en su esquema general dos dispositivos básicos, que son: una celda de carga que permite registrar permanentemente la magnitud durante la prueba y un LDVT (Lineal Variable Differential Transducer) que es el encargado de registrar la profundidad de penetración del indentador en la roca.

La prueba de indentación nos arroja una grafica de Carga versus Penetración según la grafica y la forma de interpretar esta grafica es :



Grafica 1. Grafica Indentación

### Ilustración 11 Grafica de resultados Prueba de Indentación. Fuente: Autor

- ZONA 1: Es la zona donde se evalúa el Modulo de Indentación (IM), zona de proporcionalidad, la muestra de material rocoso presenta su comportamiento elástico, la grafica nos muestra una línea recta.

$$IM = \frac{C_2 - C_1}{D_2 - D_1} \left( \frac{N}{mm} \right)$$

**Ecuación 6**Modulo de Indentación

$C_2$  y  $C_1$  son la carga inicial y final respectivamente.

$D_2$  y  $D_1$  son el desplazamiento inicial y final respectivamente.

- ZONA 2: Región de transición es en esta zona donde la roca pasa de su estado elástico a uno plástico o de deformación permanente sin que existan aumento considerable de carga, la Fuerza Crítica de Transición (CTF).
  
- ZONA 3: Región de descarga algunas veces llega a ser una zona de fractura donde el ripio de perforación se deforma de manera permanente hasta fracturarse, es decir ya no hay proporcionalidad entre la deformación de la roca y la carga aplicada.

### **3. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Diseño experimental es una serie de pruebas en las cuales se introducen cambios en algunos de las variables de entrada de un proceso o sistema, de tal manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios que se producen en la respuesta de salida.

#### **3.1. HIPOTESIS**

- La prueba de indentación puede que se encuentre relacionada mediante una ecuación o expresión matemática a la fricción interna de las rocas debidas a la analogía entre el modelo físico de la fricción y el modelo físico de la prueba de indentación.
- Puede el modelo físico de la Fricción no encontrarse relacionado con el modelo físico de la prueba de indentación.

#### **3.2. VARIABLES**

Variable es una característica (magnitud, vector o número) que puede ser medida, adoptando diferentes valores en cada uno de los casos de un estudio. En este proyecto intervienen varias variables, las cuales hacen parte de las pruebas de laboratorio que intervienen en la prueba de indentación y en la prueba de Compresión Uniaxial (no confinada).

### 3.2.1. Variable independientes

- PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN: es la profundidad a la cual el equipo detiene la aplicación de la carga, este es de 0,3 mm.
- FUERZA APLICADA: Se puede determinar cuanta fuerza utilizar en cada prueba.
- VELOCIDAD DE INCREMENTO DE LA CARGA: Velocidad a la cual al indentador va penetrando la muestra.
- COMPOSICIÓN Y ESTADO DEL MATERIAL ROCOSO: Muestra a la cual se le va a realizar la prueba de indentación.
- TAMAÑO DE LA MUESTRA: Como vamos a trabajar con ripios, el rango normal de tamaño va de 4mm a 6 mm.
- Tiempo de Carga Sostenida: Es el tiempo que el indentador va a estabilizarse para llegar y alcanzar la profundidad, se tiene en cuenta según la librería que se utilice para los ensayos de indentación.
- PROFUNDIDAD: hace referencia a la profundidad de donde se obtiene la muestra para realizar las pruebas de indentación.

### 3.2.2. Variables dependientes

- Fuerza critica de Transición (CTF): Esta variable se mide luego de realizada la prueba y va a depender de los datos de entrada.
- Modulo de Indentación (IM): Esta variable es el valor de la pendiente en la grafica de fuerza versus desplazamiento y va a depender de los datos de entrada.
- Tiempo de las pruebas: En la prueba de compresión va a del tiempo que demore la roca en fallar, y en la prueba de indentación va a depender de el tiempo que transcurra cuando el indentador alcance la profundidad dada.

- Fricción: entre dos superficies en contacto, es la fuerza que se opone al movimiento entre ambas superficies

### **3.3. MUESTRAS**

Las muestras utilizadas para realizar las pruebas preliminares son muestras que corresponden a pozo y fueron obtenidas en el valle medio del río Magdalena, a estas muestras se determinarán el ángulo de fricción mediante la prueba de Compresión Uniaxial.

Los ripios de perforación son una fuente potencial de información acerca del comportamiento mecánico de las rocas, son de tamaño irregular y se presentan durante toda la perforación y lo más importante es que ellos representan la perforación. Los problemas de inestabilidad ocurren a lo largo de toda la perforación, si se realizara la caracterización en pozo de este material se podría tener información confiable, eficiente y en tiempo real de lo que sucede en toda la sección del pozo, para este trabajo simularemos los ripios de los corazones extraídas de pozo ya que se le realizarán a estas mismas muestras la prueba de Compresión Uniaxial para evaluar el ángulo de fricción interno.

### **3.4. TAMAÑO DE LAS MUESTRAS**

El tamaño de las probetas que se utilizan para la prueba triaxial en el laboratorio de rocas poseen una longitud permisible que oscila entre 2.0 a 3.5 pulgadas y un diámetro de 1 a 1.5 pulgadas.

### 3.5. ESTIMACION DE PARAMETROS

Hace referencia al número de repeticiones en un estudio de investigación y es un factor muy importante ya que afecta la precisión de las estimaciones de las medidas de los tratamientos y la potencia de las pruebas estadísticas para detectar las diferencias entre las medidas de los grupos en tratamiento. Las repeticiones solo se aplican a la prueba de indentación, ya que es una prueba indirecta de las propiedades mecánicas de las rocas, en las pruebas de compresión Uniaxial no es necesario ya que la prueba es una prueba directa y se realiza sobre cada plug.

➤ **Intervalo de confianza**

Rango de valores calculado en una muestra en el cual se encuentra el valor del parámetro, con una probabilidad determinada.

➤ **Tamaño de la muestra**

Depende del nivel de confianza  $100(1-\alpha)\%$  que se desee para los resultados y de la amplitud del intervalo de confianza, es decir del error máximo que se esté dispuesto a admitir.

$$E = Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Fijados  $(1-\alpha)$  y  $E$ , es posible calcular el tamaño mínimo de la muestra que debe emplearse.

$$n = \left( Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{E} \right)^2$$

Se reemplaza la desviación estándar poblacional ( $\sigma$ ) por la desviación estándar muestral ( $\delta$ ), entonces las dos ecuaciones anteriores quedaran de la siguiente forma:

$$E = Z_{\alpha/2} \frac{\delta}{\sqrt{n}}$$

$$n = \left( Z_{\alpha/2} \frac{\delta}{E} \right)^2$$

Para estimar el número de repeticiones y el intervalo de confianza para las pruebas de indentación fue necesario realizar unas pruebas de indentación preliminares

.

#### 4. PRUEBAS PRELIMINARES

Debido a que este proyecto es un proyecto de investigación se requiere de unas pruebas preliminares que nos permitan conocer cuál es la dispersión de los datos tener obtenidos en las pruebas de indentación y de esta forma hallar el número de repeticiones requeridas para tener valores promedios adecuados.

Las pruebas de este proyecto se realizaran con el analizador de texturas (Ver Ilustración 10) el cual es un equipo adaptado para realizar ensayos de indentación en muestras de roca, el cual consta de dos dispositivos básicos que dan forma a esta prueba, una celda de carga la cual permite registrar permanentemente la magnitud de la carga aplicada durante la prueba y un LVDT (Linear Variable Differential Transducer) que registra la profundidad de penetración del indentador en la roca, y los datos serán analizados por el Software Exponent texture 32 para el control automático del TA-HD plus, este equipo se encuentra en las instalaciones del laboratorio de Mecánica de Rocas del ICP (Instituto Colombiano del Petróleo).



Ilustración 12 Indentador. Fuente: Autor

Las especificaciones técnicas del equipo Duty-texture analyzer (TA-HD) son:

- Capacidad de Carga : 5kg a 750kg
- Capacidad de penetración: 0,1mm a 524mm
- Resolución de distancia:0,001mm
- Capacidad de velocidad de carga: para cargas menores a 500kg (0,01mm/seg hasta 20mm/seg) y para cargas de 500kg a 700kg(0,01 mm/seg hasta 13mm/seg)

Los parámetros que se deben cargar en el momento de realizar la prueba son:

- Modo de prueba: Se selecciona la opción de Compresión.
- Velocidad pre-prueba: Velocidad del indentador antes de entrar en contacto con la muestra.
- Velocidad de prueba: Velocidad de penetración del indentador.
- Velocidad pos-prueba: Velocidad con la que el indentador sale de la muestra.
- Modo de Objetivo: Se selecciona distancia, el desplazamiento máximo del indentador, que es la profundidad a la cual el equipo detiene la aplicación de la carga, este es de 0,3 mm (30% de la longitud de la punta aproximadamente).
- Tipo de sensor seleccione fuerza.
- Fuerza de sensor.
- Unidades de prueba son mm, New, sec.
- Se ubica la probeta de ensayo debajo del indentador, garantizando que la punta del indentador quede en dirección del punto de aplicación de la carga.

#### 4.1. PRUEBAS PRELIMINARES, MEDIANTE LA PRUEBA ESTANDAR DEL LABORATORIO:

MUESTRAS	PROFUNDIDAD [ft]	PROFUNDIDAD [m]	FORMACION
200682920	9379,130	2858,759	La Luna
200694200	9671,250	2947,797	La Luna
200698088	9963,380	3036,838	La Luna
200698091	10147,380	3092,921	La Luna
200699830	10386,380	3165,769	La Luna
200705954	10544,670	3214,015	La Luna
200705957	10716,080	3266,261	La Luna
200705956	10696,330	3260,241	La Luna
200705967	11136,250	3394,329	La Luna
200718966	11434,330	3485,184	La Luna
200718970	11724,920	3573,756	La Luna
200717195	12006,000	3659,429	La Luna
200717203	12302,000	3749,650	La Luna

Tabla 2 Muestras para pruebas preliminares

A continuación alguna de las curvas de carga versus desplazamiento para los grupos de profundidades mostradas en la tabla 2, donde se puede ver el comportamiento mecánico de la muestra de roca, las demás curvas aparecen en los anexos N°.1.

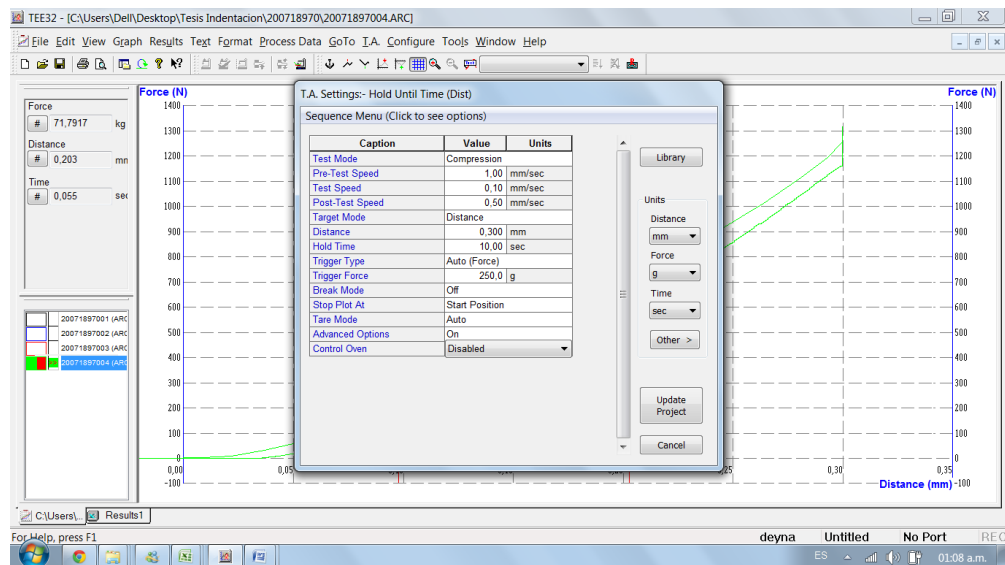
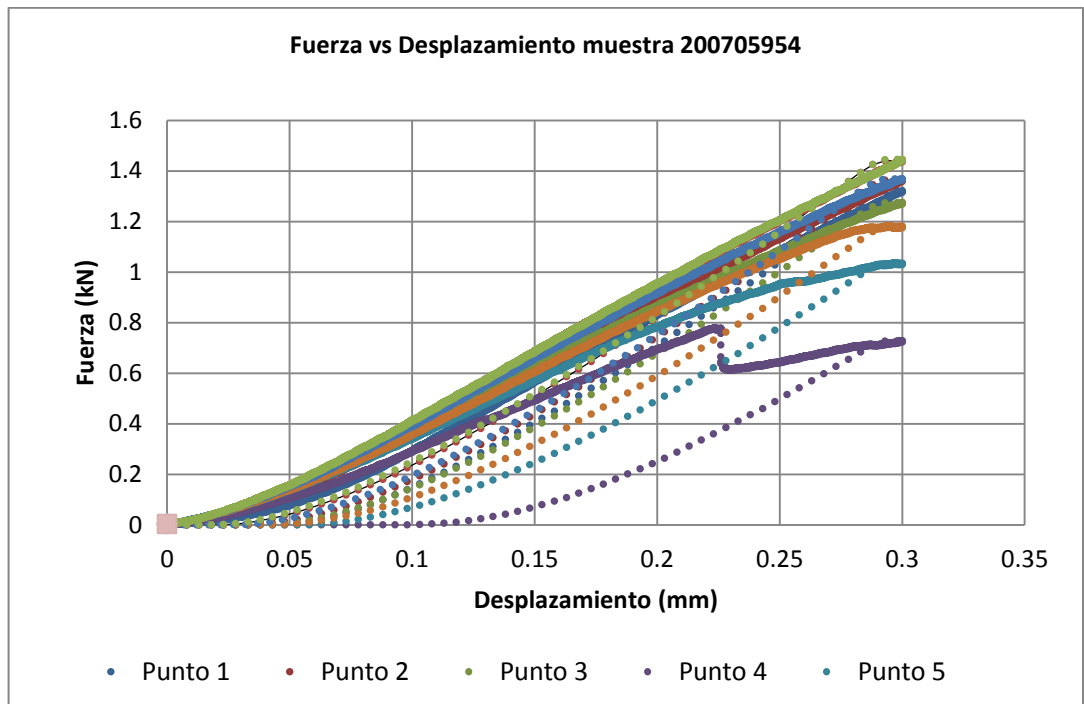
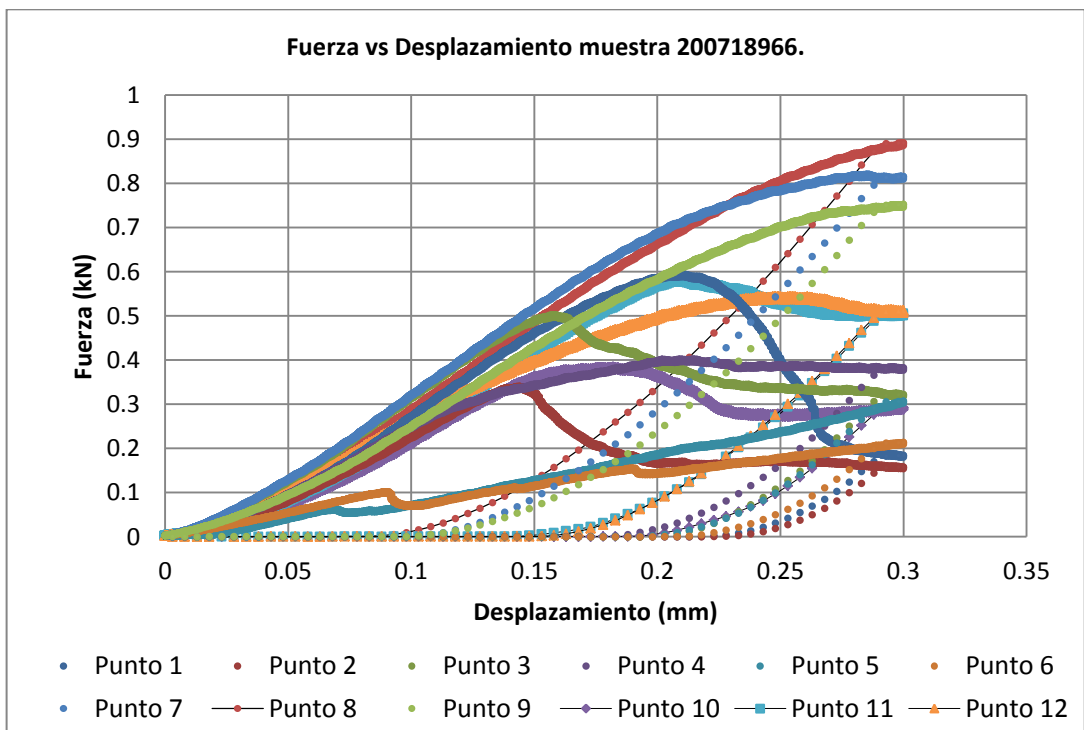


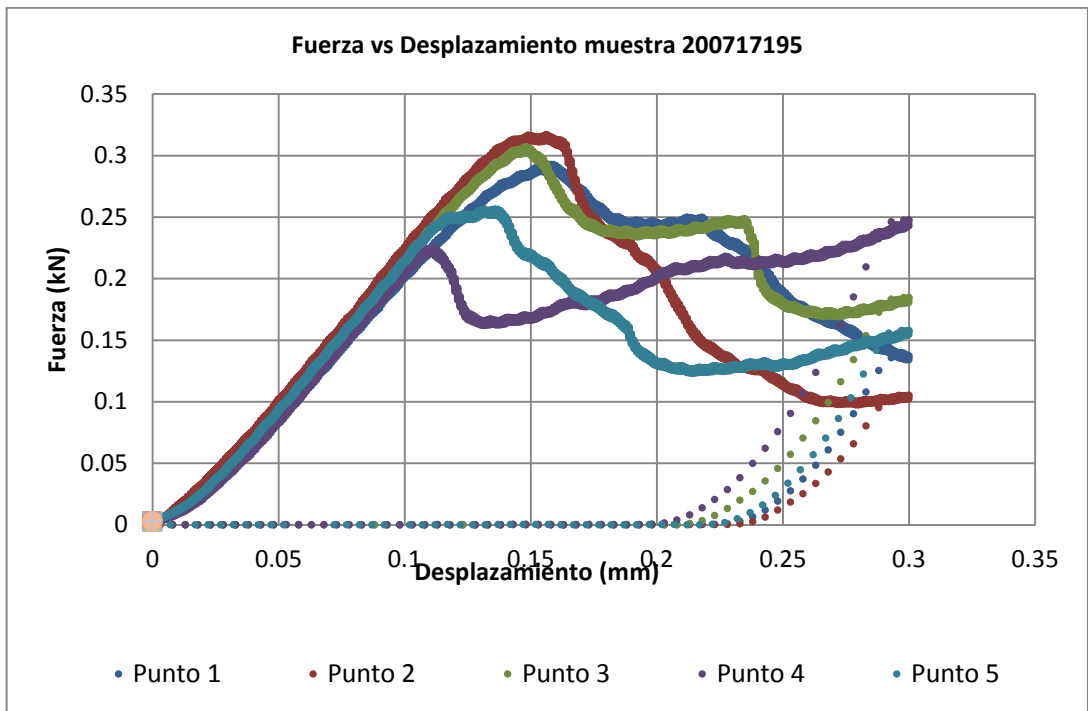
Ilustración 13 Ventana datos prueba estándar



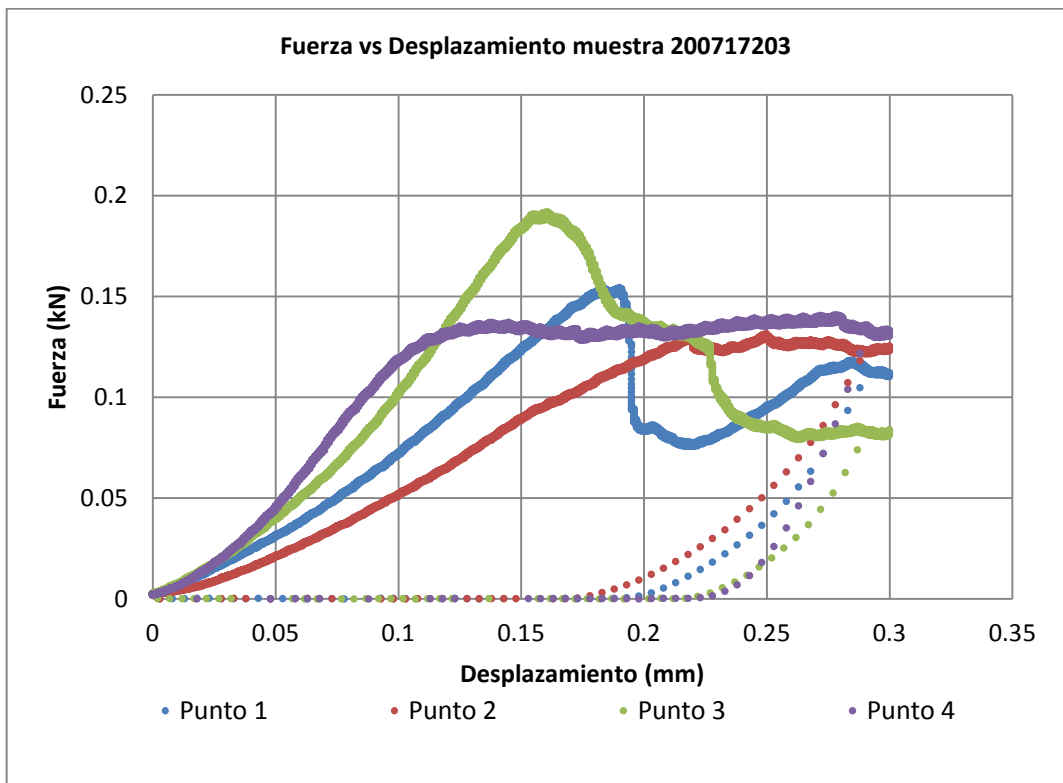
Grafica 2 Curvas de Fuerza vs desplazamiento prueba estándar muestra 200705954



Grafica 3 Curvas de Fuerza vs desplazamiento prueba estándar muestra 200718966



Grafica 4 Curvas de Fuerza vs desplazamiento prueba estándar muestra 200717195



Grafica 5 Curvas de Fuerza vs desplazamiento prueba estándar muestra 200717203

#### 4.1.1. Análisis zona de Carga

	200682920	200698088	200698091	200699830
<b>PROMEDIO</b>	1963,347	2326,971	2516,662	1718,625
<b>DESVIACION</b>	465,768	712,353	266,123	344,192
<b>VARIANZA</b>	200798,728	475513,580	66741,054	91644,270
<b>MEDIANA</b>	2200,354	2283,427	2565,221	1771,477
<b>COEFICIENTE DE VARIACION %</b>	21,167	31,197	10,374	19,430

Tabla 3 resultados de las pruebas de indentación estándar

	200705967	200705954	200705956	200705957
<b>PROMEDIO</b>	2275,685	5036,630	4413,297	2264,407
<b>DESVIACION</b>	258,332	478,094	190,399	248,013
<b>VARIANZA</b>	68452,274	259668,775	29013,165	55959,124
<b>MEDIANA</b>	2354,207	5274,311	4409,865	2258,046
<b>COEFICIENTE DE VARIACION %</b>	10,973	9,065	4,318	10,984

Tabla 4 Tabla 5 resultados de las pruebas de indentación estándar

	200718966	200718970	200717195	200717203
<b>PROMEDIO</b>	3091,236	4692,30	2381,162	1242,714
<b>DESVIACION</b>	966,699	229,323	79,530	443,048
<b>VARIANZA</b>	906852,299	48231,152	5666,464	150091,459
<b>MEDIANA</b>	3315,338	4697,24	2405,788	1296,314
<b>COEFICIENTE DE VARIACION %</b>	29,158	4,88	3,306	34,178

Tabla 6 Tabla 7 resultados de las pruebas de indentación estándar

IM	
<b>100*(1-<math>\alpha</math>)</b>	95%
<b><math>\alpha/2</math></b>	0,025
<b>Z <math>\alpha/2</math></b>	1,96
<b><math>\delta</math></b>	712,353
<b>E</b>	190,399
<b>n</b>	54

Tabla 8 Parámetros de error

Realizando el análisis de los datos resultado que para este proyecto deben realizar 54 repeticiones mínimas.

#### 4.1.2. Análisis zona de descarga.

	200698088	200698091	200699828	200705954
<b>PROMEDIO</b>	4005,754	4747,962	4643,558	6461,177
<b>DESVIACION</b>	702,641	344,331	99,134	520,111
<b>VARIANZA</b>	462541,599	107801,705	4913,730	266796,259
<b>MEDIANA</b>	3963,903	4752,019	4643,558	6623,467
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION</b>	17,73	7,25	2,13	7,85

Tabla 9 Resultados de las pruebas de indentación estándar zona descarga

	200705956	200705957	200705967	200717195
<b>PROMEDIO</b>	6465,940	4584,331	4542,880	3393,555
<b>DESVIACION</b>	265,864	183,323	269,234	607,288
<b>VARIANZA</b>	60339,174	38942,364	69815,282	310684,395
<b>MEDIANA</b>	6527,522	4675,930	4496,394	3518,638
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION</b>	4,07	3,92	5,99	17,259

Tabla 10 Resultados de las pruebas de indentación estándar zona descarga

	200718968	200718974	200717203
<b>PROMEDIO</b>	4841,526	6020,445	2079,428
<b>DESVIACION</b>	477,252	632,657	628,536
<b>VARIANZA</b>	210216,216	433108,704	384547,031
<b>MEDIANA</b>	4879,303	6277,754	1782,353
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION</b>	9,781	10,078	35,264

Tabla 11 Resultados de las pruebas de indentación estándar zona descarga

IM	
<b>100*(1-<math>\alpha</math>)</b>	<b>95%</b>
<b><math>\alpha/2</math></b>	<b>0,025</b>
<b>Z <math>\alpha/2</math></b>	<b>1,96</b>
<b><math>\delta</math></b>	<b>702,641</b>
<b>E</b>	<b>183,323</b>
<b>n</b>	<b>56</b>

Tabla 12 Parámetros de error prueba estándar zona descarga

Se necesitan mínimo 56 repeticiones, cuenta los datos en las cuales existieran mínimo tres puntos de indentación debido a que se corre el riesgo de no ser una muestra representativa, por esta razón se descartaron varias muestras.

## 4.2. PRUEBAS PRELIMINARES VARIANDO PARAMETROS EN LA PRUEBA DE INDENTACIÓN

A continuación se presenta una relación de las muestras y los valores de los parámetros que se variaran durante las pruebas de indentación preliminares, lo cual son fundamentales para el desarrollo de la prueba:

MUESTRAS	PROFUNDIDA D [ft]	PROFUNDIDAD [m]	VELOCIDAD [mm/seg]	FUERZA [kg]	VELOCIDAD FINAL [mm/seg]
200682920	9379,130	2858,759	0,426	38,700	-
200694200	9671,250	2947,797	0,842	35,723	-
200698088	9963,380	3036,838	1,258	32,746	-
200698091	10147,380	3092,921	1,673	29,769	-
200699830	10386,380	3165,769	2,089	26,792	-
200705954	10544,670	3214,015	2,100	23,815	-
200705957	10716,080	3266,261	2,505	20,838	-
200705956	10696,330	3260,241	2,921	-	0,010
200705967	11136,250	3394,329	3,337	-	0,010
200718966	11434,330	3485,184	3,753	-	0,010
200718970	11724,920	3573,756	4,168	-	0,010
200717195	12006,000	3659,429	4,584	-	0,010
200717203	12302,000	3749,650	5,000	-	0,010

Tabla 13 Parámetros Datos a variar durante la prueba de Indentación

## 4.3. PRUEBAS DE INDENTACION VARIANDO LA VELOCIDAD DE PENETRACION PARA LAS PRUEBAS PRELIMINARES:

En la ilustración 14 encontramos la ventana del software para ingresar los datos a variar para cada muestra antes de las pruebas de indentación variando la velocidad durante la ejecución del ensayo. Las graficas 6, 7,8, y 9 son algunas de las graficas resultantes de fuerza versus desplazamiento, las demás graficas las encontramos en el anexo N°. 2

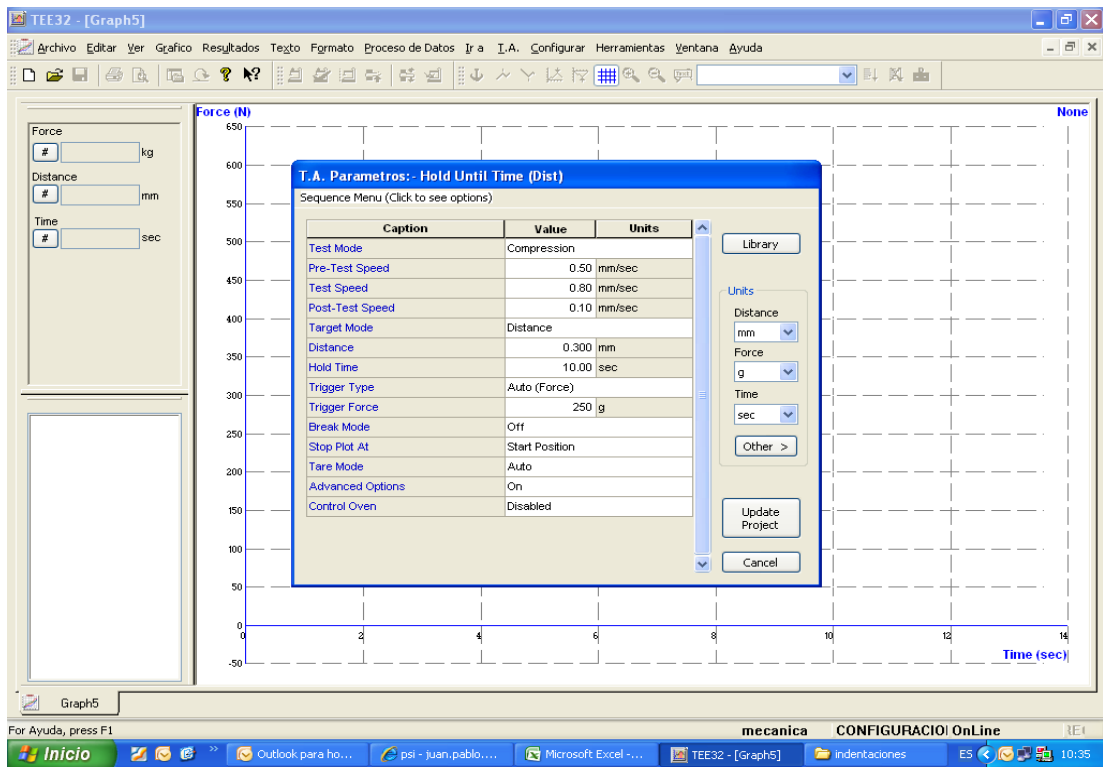
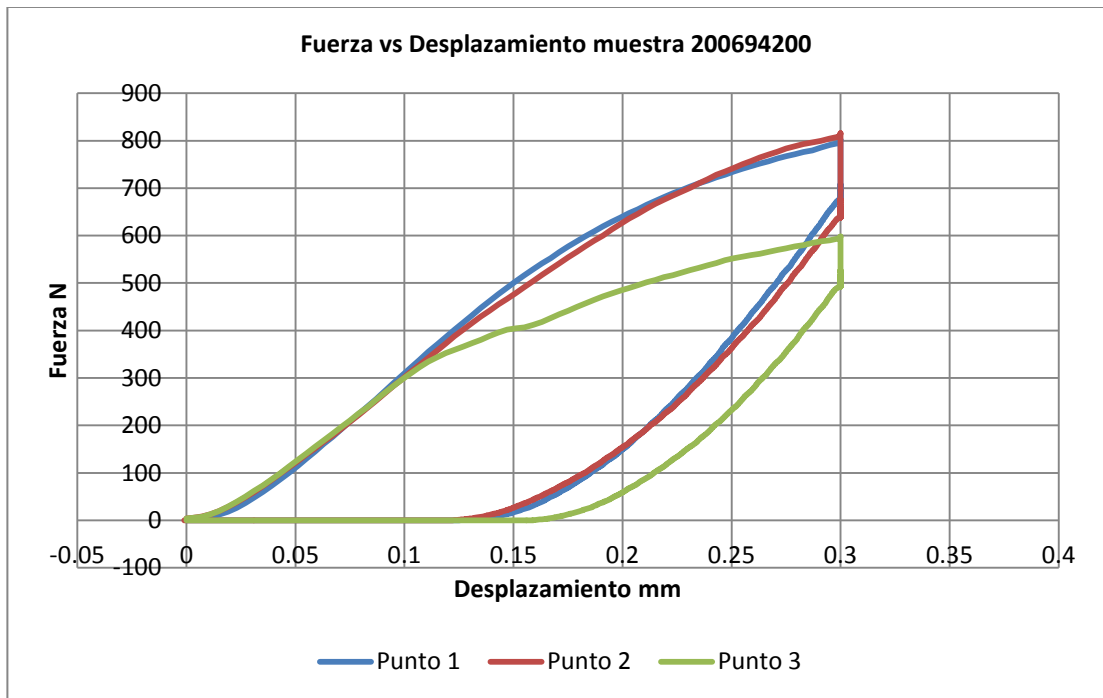
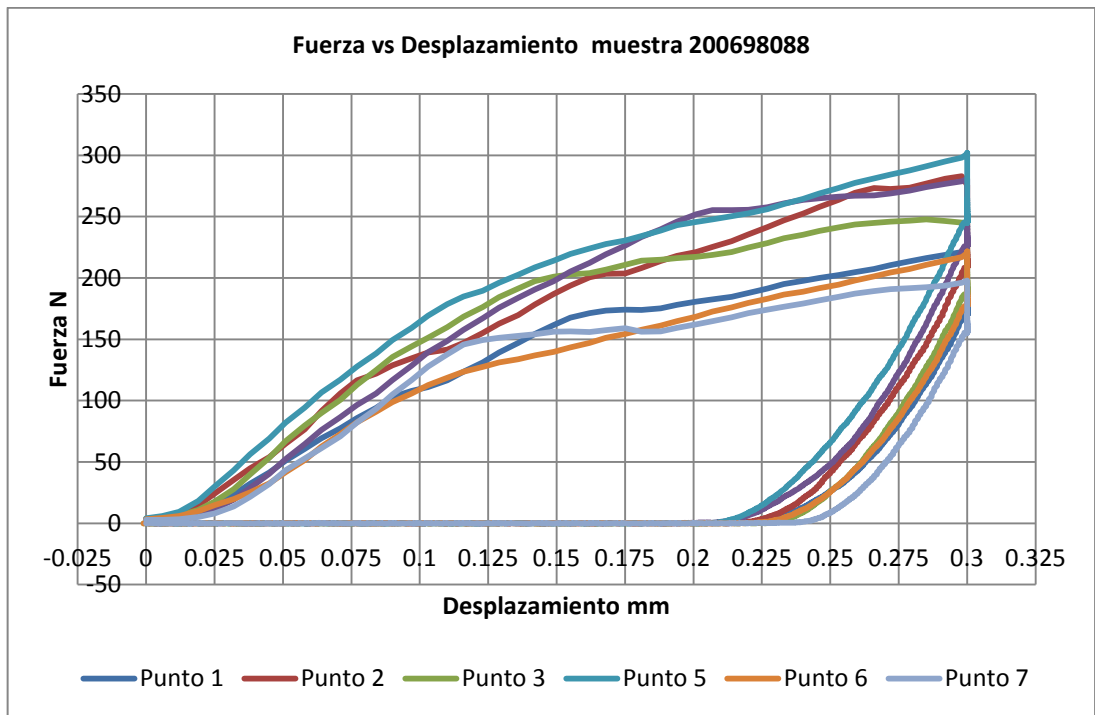


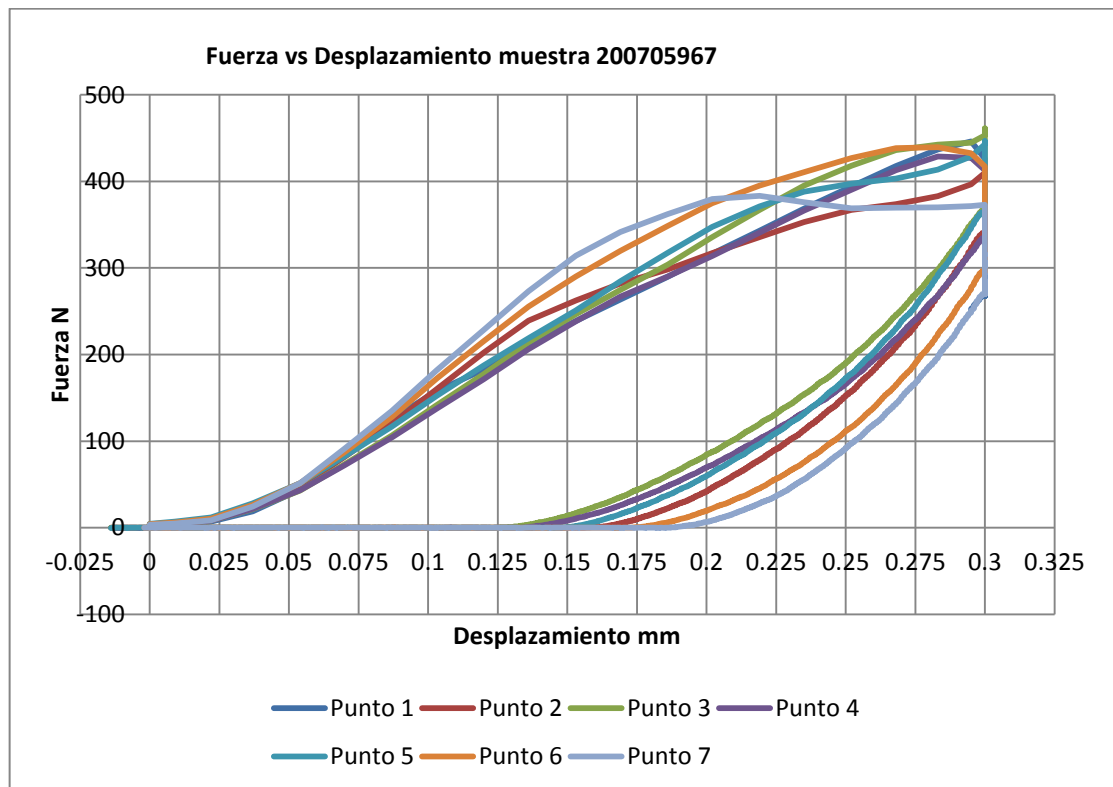
Ilustración 14 Ventana del Software del Indentador



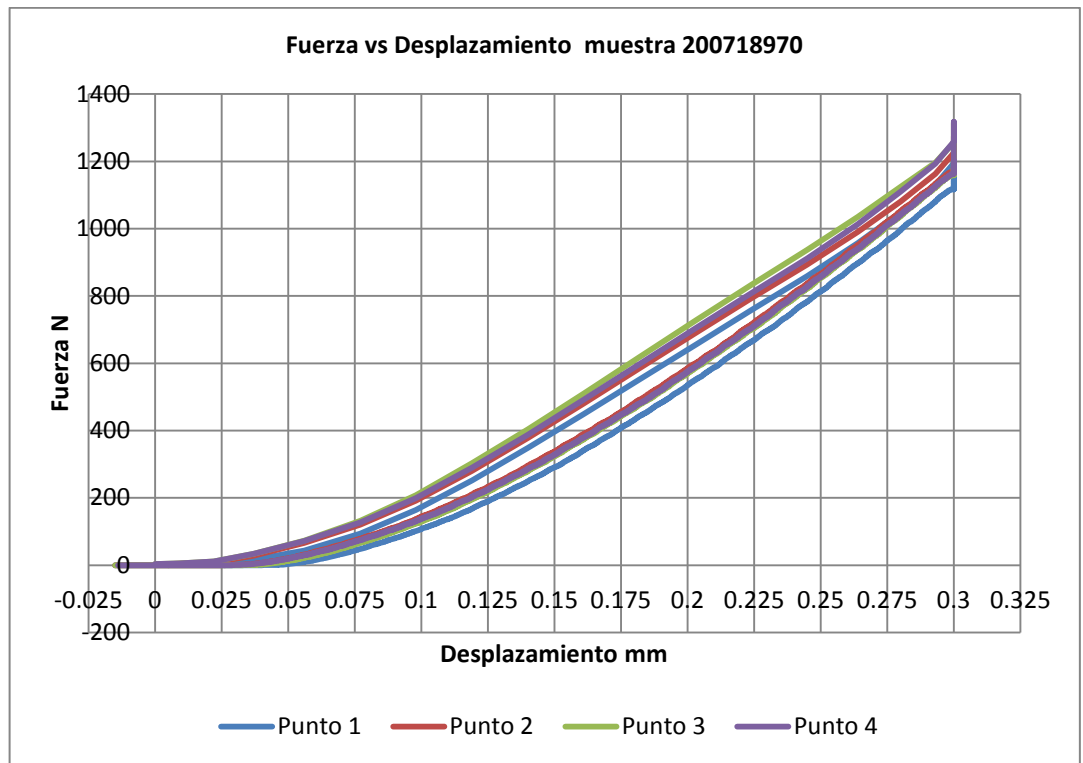
Grafica 6 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando velocidad muestra 200694200



Grafica 7 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando velocidad muestra 200698088



Grafica 8 Curvas de vs desplazamiento variando velocidad muestra 200705967



Grafica 9 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando velocidad muestra 200718970

**4.3.1 .Análisis en la zona de carga de las curvas de indentación variando la velocidad durante la prueba:**

MUESTRAS	200682920	200694200	200698088	200698091
VELOCIDAD [mm/seg]	0,43	0,84	1,26	1,67
PROMEDIO	2677,99	3671,07	1360,23	2122,78
DESVIACION	211,22	192,01	430,42	531,96
VARIANZA	34300,26	33958,30	187701,51	252271,36
MEDIANA	2648,99	3574,22	1530,24	2251,05
COEFICIENTE DE VARIACION %	7,97	5,37	28,13	23,63

Tabla 14 Datos de los resultados en la zona de carga

MUESTRAS	200705954	200705957	200705967
VELOCIDAD [mm/seg]	2,10	2,51	3,34
PROMEDIO	5303,36	2636,73	2140,48
DESVIACION	315,33	616,63	359,59
VARIANZA	86656,14	319309,89	126406,17
MEDIANA	5387,69	2587,25	2015,70
COHEFICIENTE DE VARIACION %	5,85	23,83	17,84

Tabla 15 Datos de los resultados en la zona de carga

MUESTRAS	200718966	200718970
VELOCIDAD [mm/seg]	3,75	4,17
PROMEDIO	3328,94	4937,62
DESVIACION	493,57	132,762
VARIANZA	239677,77	14240,576
MEDIANA	3540,58	4834,064
COHEFICIENTE DE VARIACION %	13,94	2,746

Tabla 16 Datos de los resultados en la zona de carga

IM	
100*(1- $\alpha$ )	95%
$\alpha/2$	0,025
Z $\alpha/2$	1,96
$\delta$	616,63
E	132,762
n	83,66

Tabla 17 Parámetros de error

Se necesitan mínimo 84 repeticiones, es decir 84 puntos indentados, cuenta los datos en las cuales existieran mínimo tres puntos de indentación debido a que se corre el riesgo de no ser una muestra representativa, por esta razón se descartaron varias muestras.

**4.3.2. Analisis en la zona de descarga de las curvas de indentacion variando la velocidad durante la prueba:**

<b>MUESTRAS</b>	<b>200682920</b>	<b>200694200</b>	<b>200698088</b>	<b>200698091</b>
<b>VELOCIDAD [mm/seg]</b>	0,426	0,842	1,258	1,673
<b>PROMEDIO</b>	3689,141	5663,243	3774,310	4532,552
<b>DESVIACION</b>	762,789	190,832	178,737	202,328
<b>VARIANZA</b>	439512,012	30709,654	27625,978	34215,232
<b>MEDIANA</b>	3633,224	5583,044	3789,895	4542,626
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION %</b>	20,995	3,418	4,716	4,454

Tabla 18 Datos de los resultados en la zona de descarga

<b>MUESTRAS</b>	<b>200705954</b>	<b>200705957</b>	<b>200705967</b>
<b>VELOCIDAD [mm/seg]</b>	2,100	2,505	3,337
<b>PROMEDIO</b>	5308,369	4543,740	2185,120
<b>DESVIACION</b>	464,236	277,928	677,564
<b>VARIANZA</b>	228568,265	66622,313	430366,022
<b>MEDIANA</b>	5511,270	4591,197	3848,079
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION %</b>	8,423	6,054	17,608

Tabla 19 Datos de los resultados en la zona de descarga

<b>MUESTRAS</b>	<b>200718966</b>	<b>200718970</b>
<b>VELOCIDAD [mm/seg]</b>	3,753	4,168
<b>PROMEDIO</b>	4756,679	5389,69
<b>DESVIACION</b>	929,5	146,706
<b>VARIANZA</b>	719188,282	17667,721
<b>MEDIANA</b>	4924,049	5428,751
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION</b>	18,877	2,702

Tabla 20 Datos de los resultados en la zona de descarga

IM	
$100*(1-\alpha)$	95%
$\alpha/2$	0,025
$Z \alpha/2$	1,96
$\delta$	929,50
$E$	178,74
$n$	103,89

Tabla 21 Parámetros de error

Se necesitan mínimo 104 repeticiones, es decir 104 puntos indentados, cuenta los datos en las cuales existieran mínimo tres puntos de indentación debido a que se corre el riesgo de no ser una muestra representativa, por esta razón se descartaron varias muestras.

#### 4.4. FAMILIA DE CURVAS DE LAS PRUEBAS VARIANDO LA FUERZA MAXIMA DE PENETRACION.

En la ilustración 15 encontramos la ventana del software para ingresar los datos a variar para cada muestra antes de las pruebas de indentación variando fuerza máxima durante la ejecución del ensayo. Las graficas 10, 11,12, y 13 son algunas de las graficas resultantes de fuerza versus desplazamiento, las demás graficas las encontramos en el anexo N°. 3

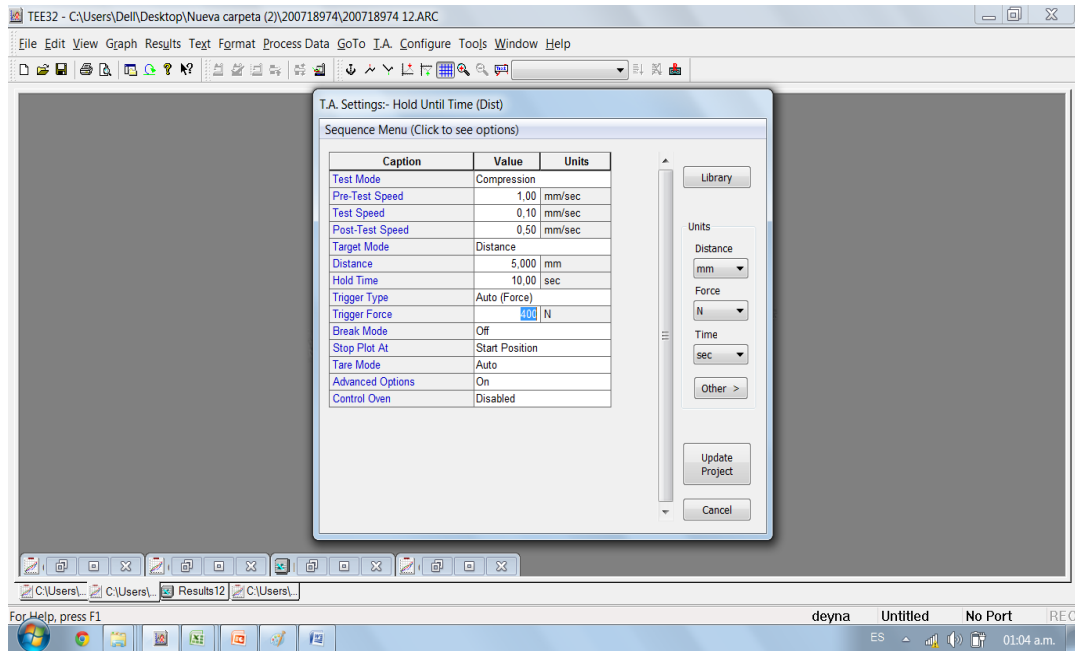
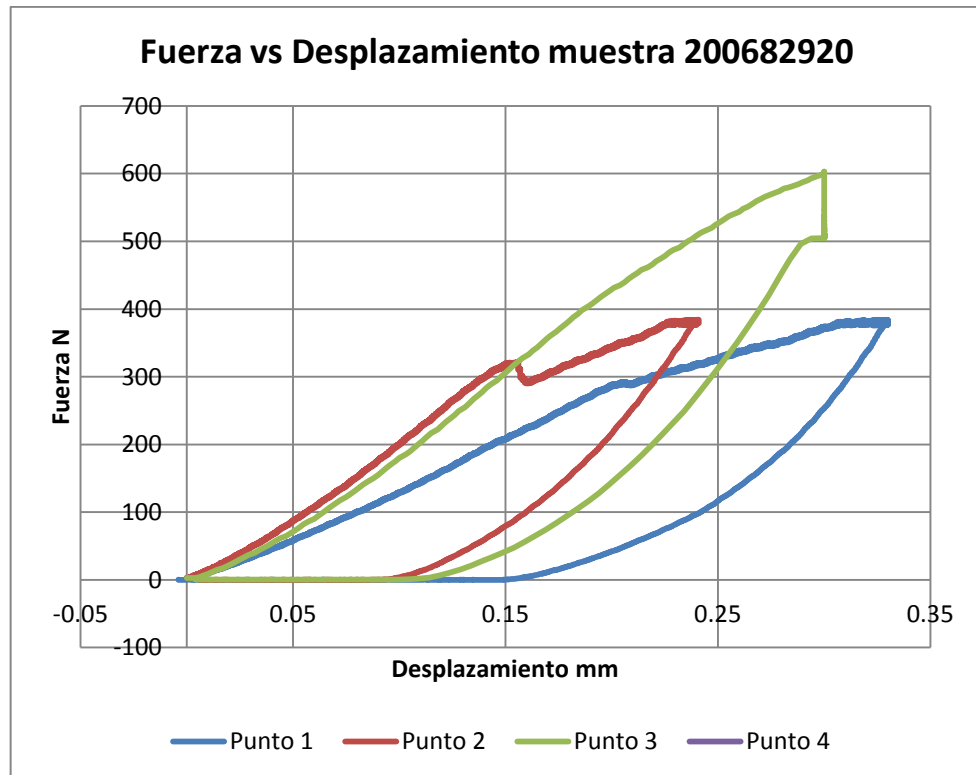
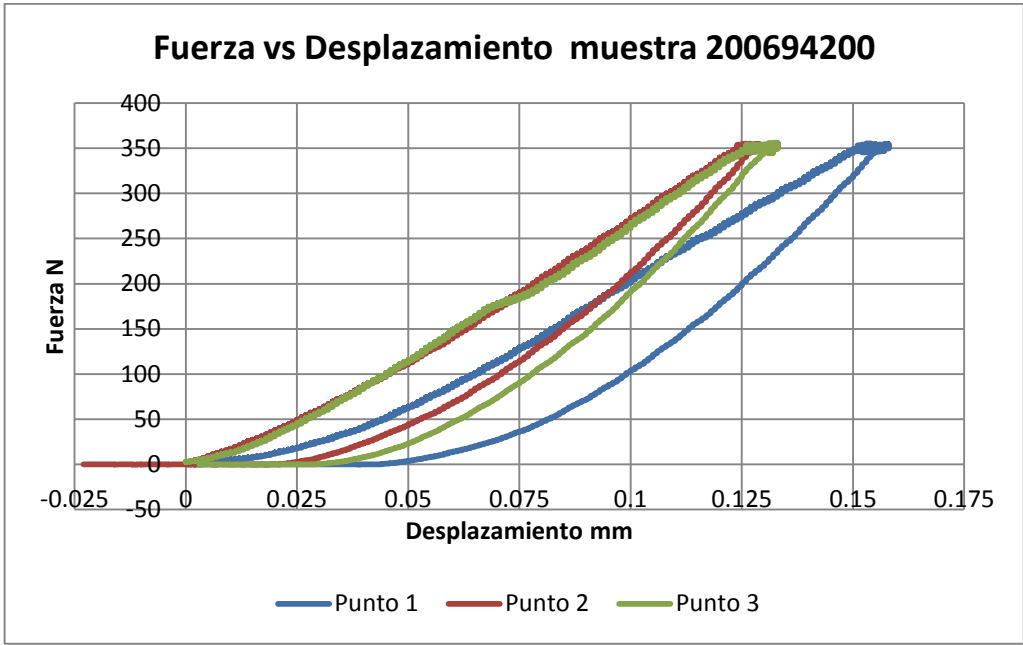


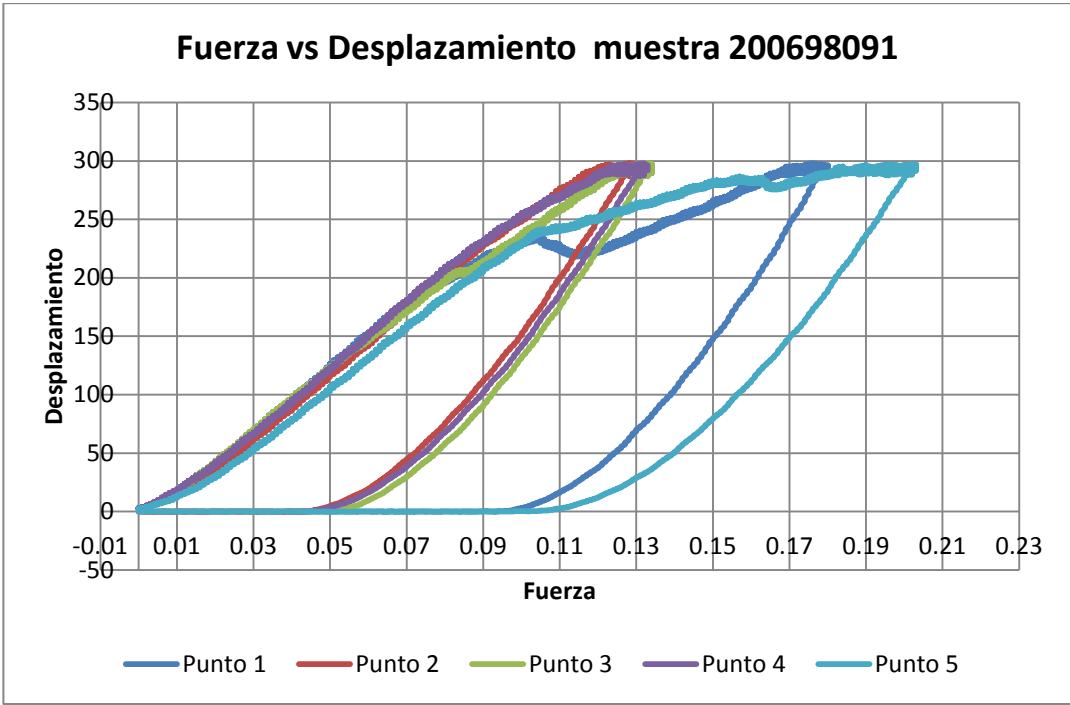
Ilustración 15 Ventana del Software del Indentador



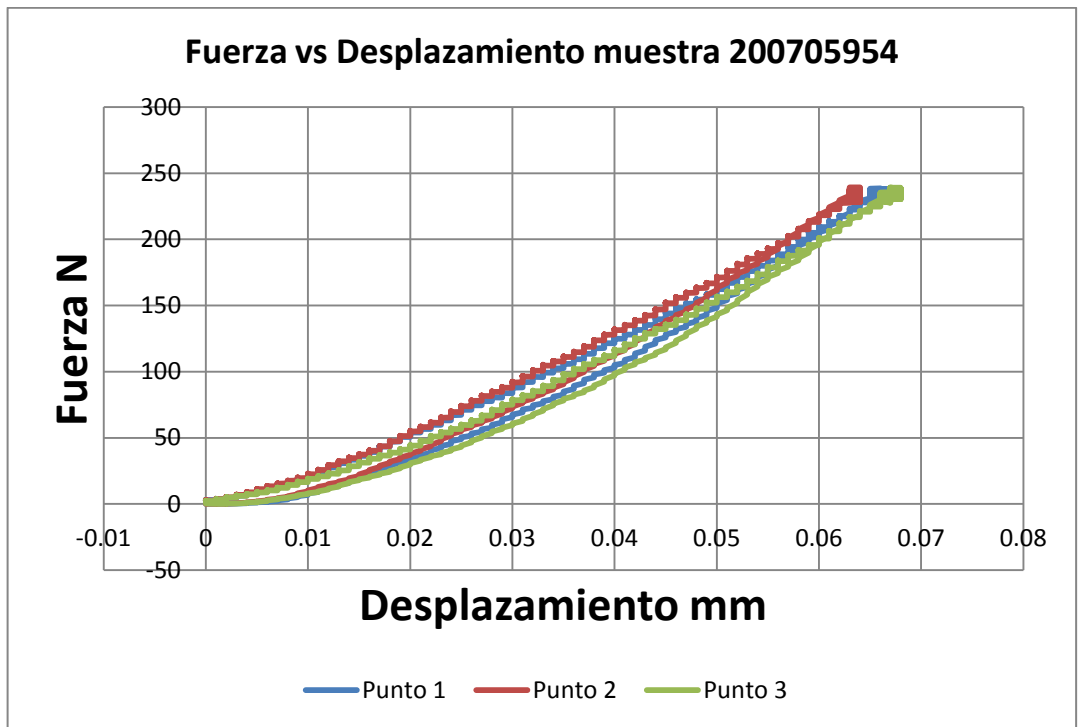
Grafica 10 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando Fuerza Máxima de Penetración muestra 200682920



Grafica 11 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando Fuerza Máxima de Penetración muestra 200694200



Grafica 12 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando Fuerza Máxima de Penetración muestra 200698091



Grafica 13 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando Fuerza Máxima de Penetración muestra 200705954

**4.4.1 Analisis en la zona de carga de las curvas de indentacion variando la fuerza maxima de penetracion:**

MUESTRAS	200682920	200694200	200698088	200698091	200705954	200705957
FUERZA [kg]	38,70	35,72	32,75	29,77	23,82	20,84
PROMEDIO	2043,83	4959,92	2518,23	2607,16	3781,12	2418,15
DESVIACION	470,38	208,54	774,82	114,34	107,69	60,93
VARIANZA	180758,77	34121,12	575549,88	15714,21	10414,59	2906,04
MEDIANA	2226,18	5031,54	2826,89	2534,66	3729,32	2429,16
COHEFICIENTE DE VARIACION %	21,13	4,14	27,41	4,51	2,89	2,51

Tabla 22 Datos de los resultados en la zona de carga

IM	
<b>100*(1-<math>\alpha</math>)</b>	95%
<b><math>\alpha/2</math></b>	0,025
<b>Z <math>\alpha/2</math></b>	1,96
<b><math>\delta</math></b>	774,82
<b>E</b>	60,93
<b>n</b>	621,13

Tabla 23 Parámetros de error

Se necesitan mínimo 622 repeticiones, es decir 622 puntos indentados, cuenta los datos en las cuales existieran mínimo tres puntos de indentación .

#### 4.4.2. Analisis en la zona de descarga de las curvas de indentacion variando la fuerza maxima de penetracion:

MUESTRAS	200682920	200694200	200698088	200698091	200705954	200705957
<b>FUERZA [kg]</b>	38,70	35,72	32,75	29,77	23,82	20,84
<b>PROMEDIO</b>	3147,06	4959,92	2924,67	4781,92	5002,45	2570,47
<b>DESVIACION</b>	413,80	208,54	86,26	283,06	155,09	212,40
<b>VARIANZA</b>	135217,66	34121,12	5959,06	80265,38	22571,62	33850,39
<b>MEDIANA</b>	3001,93	5031,54	3015,27	4719,55	4921,60	2566,66
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION %</b>	13,78	4,14	2,86	6,00	3,15	8,28

Tabla 24 Datos de los resultados en la zona de descarga

IM	
<b>100*(1-<math>\alpha</math>)</b>	95%
<b><math>\alpha/2</math></b>	0,025
<b>Z <math>\alpha/2</math></b>	1,96
<b><math>\delta</math></b>	413,80
<b>E</b>	86,26
<b>n</b>	88,39

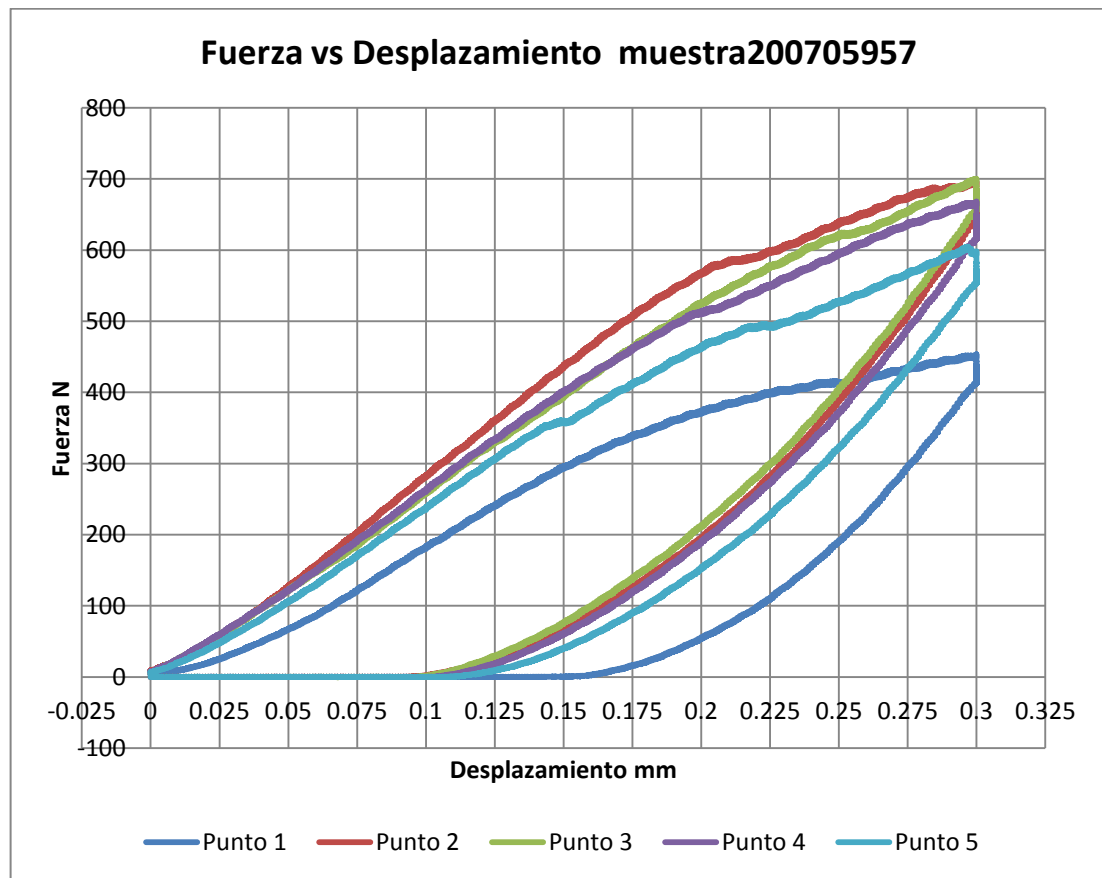
Tabla 25 Parámetros de error

Se necesitan mínimo 88 repeticiones, es decir 88 puntos indentados, cuenta los datos en las cuales existieran mínimo tres puntos de indentación .

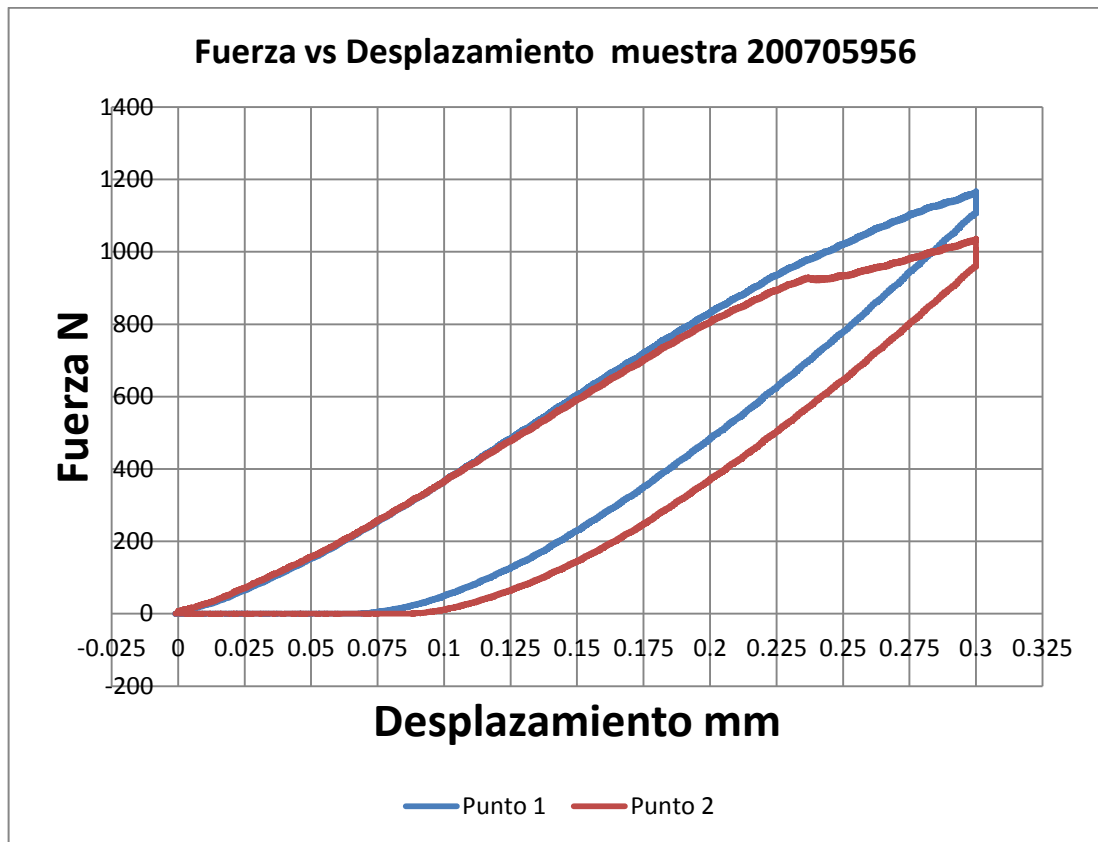
Como se observa en las gráficas 10,11,13 y 13 la penetración que alcanza el indentador con la fuerza máxima que aplicamos es muy difícil de controlar ya que en un rango de casi 150 New la profundidad varía de 0,35 mm a 0,07 mm, no se va a tener un control de la penetración máxima o mínima del indentador que está diseñado para una penetración máxima de 0,3 mm.

#### 4.5. FAMILIA DE CURVAS DE LAS PRUEBAS VARIANDO LA VELOCIDAD FINAL DE LA PRUEBA:

La prueba estándar del laboratorio de mecánica de rocas no tiene en cuenta la importancia que puede tener la velocidad de descarga de la prueba la cual en muchas graficas es más regular que la zona de descarga.



Grafica 14 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando la velocidad final muestra 200705957



Grafica 15 Curvas de Fuerza vs desplazamiento variando la velocidad final muestra 200705956

#### 4.5.1 Analisis en la zona de carga de las curvas de indentacion teniendo en cuenta la velocidad de descarga de la prueba.

MUESTRAS	200705957	200705956	200705967	200718966
VELOCIDAD FINAL [mm/seg]	0,01	0,01	0,01	0,01
PROMEDIO	4534,86	2664,50	1927,84	2553,03
DESVIACION	172,80	284,77	263,75	389,98
VARIANZA	14929,91	64926,13	61539,21	121887,97
MEDIANA	4534,86	2671,52	1953,74	2567,84
COHEFICIENTE DE VARIACION %	3,81	10,66	13,50	15,19

Tabla 26 Datos de los resultados en la zona de carga

MUESTRAS	200718970	200717195	200717203
<b>VELOCIDAD FINAL [mm/seg]</b>	0,01	0,01	0,01
<b>PROMEDIO</b>	4302,05	1109,59	1544,87
<b>DESVIACION</b>	317,45	365,26	496,02
<b>VARIANZA</b>	75608,51	66707,78	203172,07
<b>MEDIANA</b>	4307,45	1109,59	1681,43
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION %</b>	7,37	32,92	29,50

Tabla 27 Datos de los resultados en la zona de carga

IM	
<b>100*(1-<math>\alpha</math>)</b>	95%
<b><math>\alpha/2</math></b>	0,025
<b>Z <math>\alpha/2</math></b>	1,96
<b><math>\delta</math></b>	496,02
<b>E</b>	172,80
<b>n</b>	31,65

Tabla 28 Parámetros de error

Se necesitan mínimo 32 repeticiones, es decir 32 puntos indentados, cuenta los datos en las cuales existieran mínimo tres puntos de indentación debido a que se corre el riesgo de no ser una muestra representativa, por esta razón se descartaron varias muestras.

**4.5.2. Analisis en la zona de descarga de las curvas de indentacion teniendo en cuenta la velocidad de descarga de la prueba.**

MUESTRAS	200705956	200705957	200705967	200718966
<b>VELOCIDAD FINAL [mm/seg]</b>	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>PROMEDIO</b>	5903,27	4700,42	3751,53	4443,04
<b>DESVIACION</b>	202,63	291,67	415,38	797,63
<b>VARIANZA</b>	20530,30	20530,30	155888,37	527295,97
<b>MEDIANA</b>	5903,27	5903,27	3821,64	4578,43
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION %</b>	3,43	6,22	10,87	17,42

Tabla 29 Datos de los resultados en la zona de carga

MUESTRAS	200718970	200717195	200717203
<b>VELOCIDAD FINAL [mm/seg]</b>	0,01	0,01	0,01
<b>PROMEDIO</b>	5105,50	1791,82	2601,81
<b>DESVIACION</b>	660,50	887,56	564,37
<b>VARIANZA</b>	392510,39	393877,37	271258,74
<b>MEDIANA</b>	5361,06	1791,82	2421,88
<b>COHEFICIENTE DE VARIACION %</b>	12,32	49,53	23,30

Tabla 30 Datos de los resultados en la zona de carga

IM	
<b>100*(1-<math>\alpha</math>)</b>	95%
<b><math>\alpha/2</math></b>	0,025
<b>Z <math>\alpha/2</math></b>	1,96
<b><math>\delta</math></b>	887,56
<b>E</b>	202,00
<b>n</b>	74,16

Tabla 31 Parámetros de error

Se necesitan mínimo 74 repeticiones, es decir 74 puntos indentados, cuenta los datos en las cuales existieran minimo tres puntos de indentacion debido a que se corre el riesgo de no ser una muestra representativa,

#### 4.6. CONSOLIDANDO RESULTADOS EN LAS PRUEBAS PRELIMINARES

REPETICIONES		PARAMETRO
<b>Carga</b>	84	VELOCIDAD DE PENETRACION [mm/seg]
<b>Descarga</b>	104	
<b>Carga</b>	621	FUERZA MAXIMA DE PENETRACION [N]
<b>Descarga</b>	88	
<b>Carga</b>	32	VELOCIDAD DE DESCARGA [mm/seg]
<b>Descarga</b>	74	

Tabla 32 Número de repeticiones obtenidas

Durante el analisis de resultados realizo un barrido a cada una de las graficas de fuerza versus desplazamiento y no se tuvieron en cuenta algunos de los puntos indentados, ya que tenian un comportamiento diferente al de la mayoría de los punto y esto se puede deber a que se realizo la prueba en la periferia de la muestra.

Con los valores obtenidos se puede ver que analizando el Modulo de Indentación en la zona de descarga los datos están menos dispersos y por tal motivo se necesitan para algunos parámetros menos repeticiones.

Para el desarrollo de las pruebas finales la metodología que se señalo fue la de variar la velocidad de penetración y la velocidad de descarga y algunos parámetros así:

- Velocidad de penetración: 2,10 mm/seg
- Velocidad de descarga: 0,10 mm/seg
- Fuerza aplicada: Libre

- Duración de la fuerza aplicada: esta fuerza es el tiempo en el cual la fuerza se mantiene sobre el desplazamiento máximo de 0.3 mm.
- Desplazamiento máximo: 0.3 mm.

Los valores que se utilizaron fueron los valores cuyos resultados dieron menor coeficiente de variación.

No tomamos la fuerza máxima de penetración fija debido a los resultados tan variados que se encontraron en los valores de penetración.

La librería que se utilizó para poder manejar estos parámetros la librería 3 del software del indentador.

## 5. FORMACION LA LUNA

Todas las muestras de este proyecto provienen de la formación la luna ubicada en el valle medio magdalena y la cual es formada por tres miembros galemo, pujamana y salada debido a su conformación de petrofacies y profundidades.

	No.	PROFUNDIDAD (Pies)	PETROFACIES							
			A	B	C	D	E	F	G	
<b>MB. GALEMBO</b>	1	9379,25		1						
	2	9385,50		1						
	3	9418,50		1						
	4	9426,70	2							
	5	9435,50		1						
	6	9445,00					3			
	7	9478,00				4				
	8	9496,50				4				
	9	9508,70				4				
	10	9526,50					3			
	11	9542,00					3			
	12	9555,50				4				
	13	9562,71				4				
	14	9573,00					3			
	15	9587,00					3			
	16	9616,88					3			
	17	9644,88					3			
	18	9658,42					3			
	19	9671,17				4				
	20	9688,42					3			
	21	9801,00				4				
	22	9847,50		1						
	23	9963,25	2							
	24	10037,71		1						
	25	10091,42		1						
26	10147,50				4					
27	10505,08	2								
28	10544,75		1							
29	10617,21	2								
30	10696,08				5					
31	10716,46		1							
32	10755,50				5					
33	10789,96				4					
34	10875,54	2								
35	10893,13		1							
36	10923,96				5					
37	10968,79				5					
38	11052,71				5					
39	11088,54	2								
40	11108,50				5					
41	11108,92				5					
42	11136,25	2								
43	11136,63	2								
44	11154,00					3				
45	11154,92					3				

	No.	PROFUNDIDAD (Pies)	PETROFACIES							
			A	B	C	D	E	F	G	
<b>MB. PUJAMANA</b>	46	11264,50	2							
	47	11264,79	2							
	48	11345,42	2							
	49	11345,83	2							
	50	11388,58	2							
	51	11433,38	2							
	52	11434,13	2							
	53	11556,17	2							
	54	11585,13	2							
	55	11654,17	2							
	56	11716,96	2							
	57	11724,29	2							
	58	11780,63							6	
	59	11818,88	2							

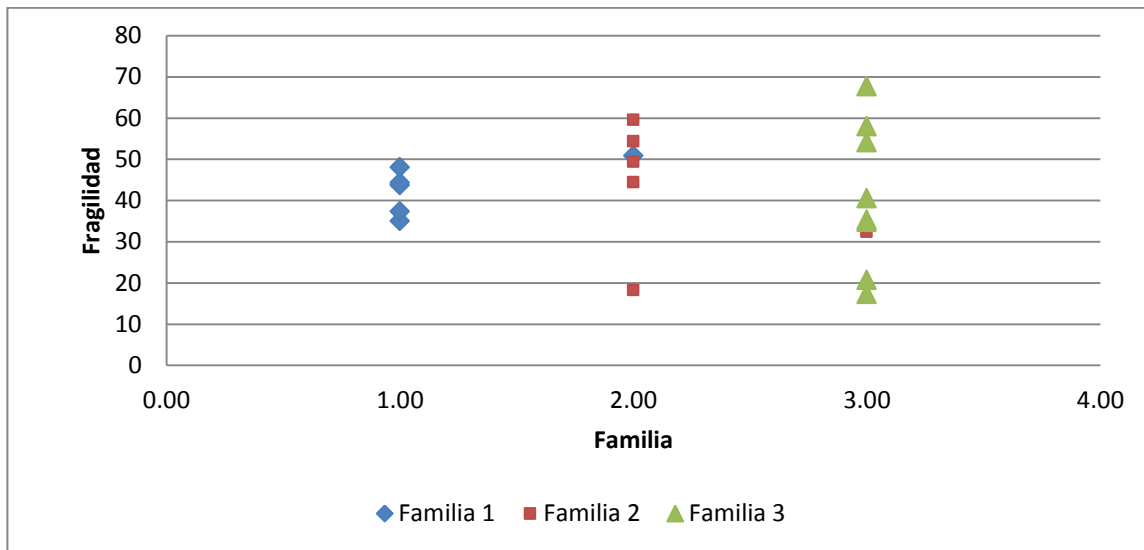
	No.	PROFUNDIDAD (Pies)	PETROFACIES							
			A	B	C	D	E	F	G	
<b>MB. SALADA</b>	60	11856,79							6	
	61	11906,79								7
	62	11917,50			5					
	63	11982,79			5					
	64	12046,46								7
	65	12052,54								7
	66	12107,83								7
	67	12136,96							6	
	68	12185,96							6	
	69	12266,58			5					
	70	12314,17								7

**LEYENDA**

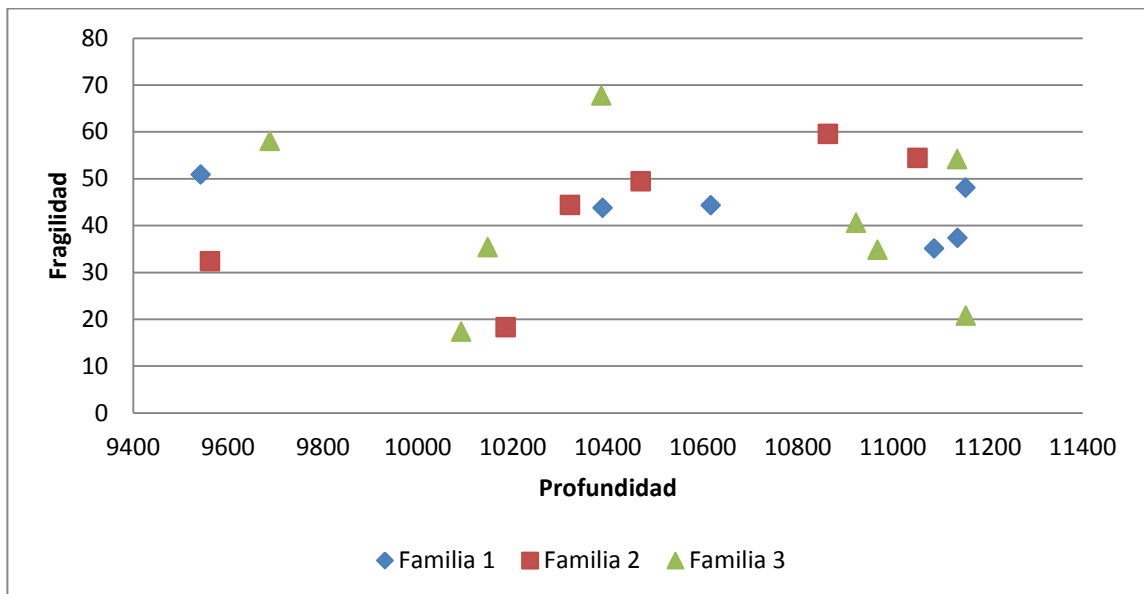
- A** Arcillolitas masivas a débilmente laminadas.
- B** Arcillolitas levemente fosilíferas, moderadamente a bien laminadas.
- C** Arcillolitas carbonosas moderadamente fosilíferas, masivas a débilmente laminadas.
- D** Arcillolitas muy fosilíferas, moderadamente a bien laminadas.
- E** Arcillolitas limosas, moderadamente a bien laminadas.
- F** Calizas microesparíticas arcillosas, masivas a débilmente laminadas.
- G** Arcillolitas carbonosas muy bien laminadas.

Tabla 33 Información Petrofacies Formación La luna. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas



Grafica 16 Familias de Fragilidad. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas

La petrofacies hace referencia a un intervalo estratigráfico caracterizado por una similar área de procedencia, mecanismos de transporte, clima y diagénesis, en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, encontraron que a lo largo del miembro galembó de la formación la Luna se encontraron 3 familias de fragilidades.



Grafica 17 Fragilidad vs Profundidad. Fuente: Lab. Mecánica de Rocas.

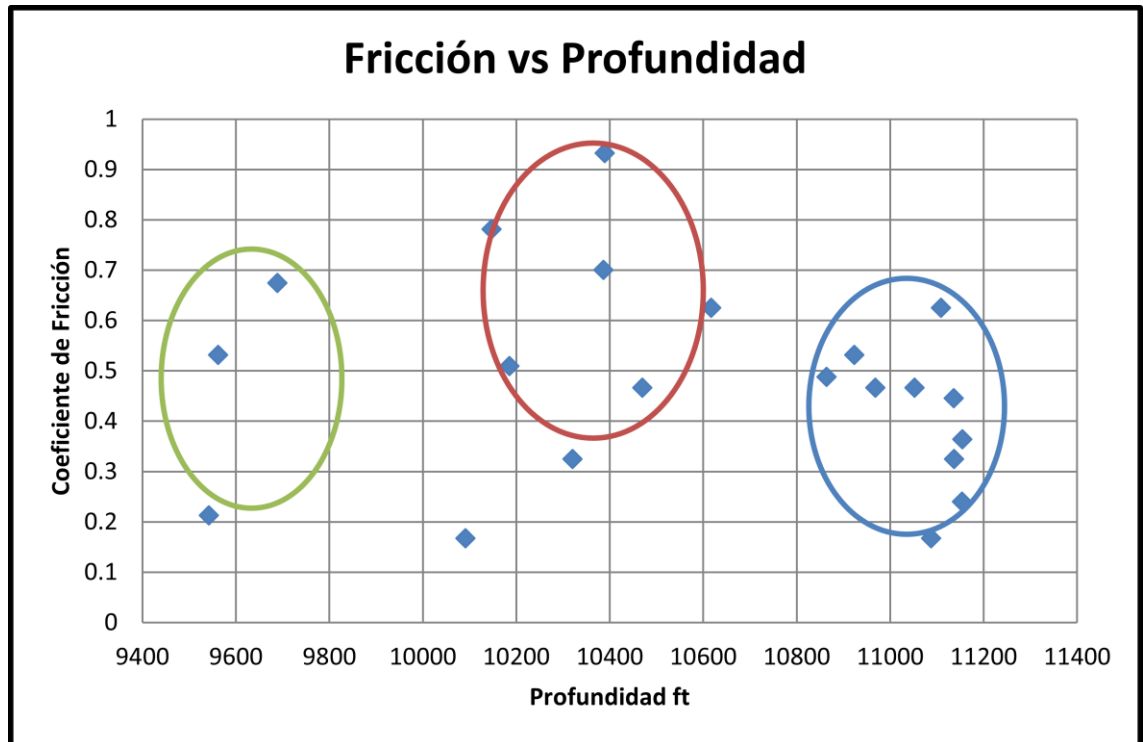
La formación La luna en su miembro galembó tiene una profundidad en la zona la cual se usaron las muestras para este proyecto de 550 metro.

**6. ANGULOS DE FRICCIÓN INTERNO HALLADOS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL ICP MEDIANTE PRUEBAS DE COMPRESION UNIAXIAL INCONFINADA CON ENVOLVENTE DE FALLA SOBRE LA FORMACION LA LUNA**

N°	Tipo de ensayo	Muestra	Profundidad	Ángulo °	Coefficiente fricción
1	Envolvente	200699447	9542,580	12	0,2126
2	Envolvente	200699452	9562,380	28	0,5317
3	Envolvente	200699465	9688,710	34	0,6745
4	Envolvente	200699472	10091,630	9,5	0,1673
5	Envolvente	200699474	10147,080	38	0,7813
6	Envolvente	200704153	10185,400	27	0,5095
7	Envolvente	200704154	10320,580	18	0,3249
8	Envolvente	200704155	10386,460	35	0,7002
9	Envolvente	200704156	10389,710	43	0,9325
10	Envolvente	200704406	10469,580	25	0,4663
11	Envolvente	200705880	10617,080	32	0,6249
12	Envolvente	200705892	10863,790	26	0,4877
13	Envolvente	200705894	10923,380	28	0,5317
14	Envolvente	200705896	10968,630	25	0,4663
15	Envolvente	200705898	11052,500	25	0,4663
16	Envolvente	200705899	11088,000	9,5	0,1673
17	Envolvente	200705902	11108,580	32	0,6249
18	Envolvente	200705903	11136,380	24	0,4452
19	Envolvente	200705904	11136,718	18	0,3249
20	Envolvente	200705905	11154,080	13,5	0,2401
21	Envolvente	200705906	11154,670	20	0,3640

Tabla 34 Datos de AFI

Los datos de ángulo de fricción interno y coeficiente de fricción con los cuales se busca una correlación con el modulo de indentación, se realizaron pruebas de indentación a muestras ubicadas a las mismas profundidades.



Grafica 18 Coeficiente de fricción vs profundidad

En la grafica 16 vemos la distribución de los datos del coeficiente de fricción con la profundidad, se han separado en tres grupos para facilitar su análisis.

La formación la luna cuenta con 3 familias deferentes relacionadas con la fragilidad como se ve en la grafica 17 y en la 18 se relaciona las fragilidades con la

A continuación encontramos los resultados de los módulos de indentación de las pruebas de indentación y los datos del ángulo de fricción encontrado en las envolventes hallado de las pruebas triaxiales que se realizaron sobre las muestras en el laboratorio de mecánica de rocas de ICP.

## 7. PRUEBAS DE INDENTACION

Dado que se despreciaron las pruebas variando la fuerza máxima de penetración, se usaron el número mínimo de indentación para la zona de carga variando la velocidad de penetración de  $n=84$  y para la zona de descarga  $n=74$  repeticiones.

$\delta = 616,63 \text{ N/mm}$ , Máxima desviación estándar
$E = 132/\text{mm}$
$X - 132 \leq \mu \leq X + 132$

**Tabla 35 Intervalos de Confianza en función de los errores máximos esperados para los parámetros de indentación en la zona de carga.**  
Fuente: El Autor

$\delta = 929,49 \text{ N/mm}$ , Máxima desviación estándar
$E = 202,63 \text{ N/mm}$
$X - 202 \leq \mu \leq X + 202$

**Tabla 36 Intervalos de Confianza en función de los errores máximos esperados para los parámetros de indentación en la zona de descarga.**  
Fuente: El Autor

Se realizaron las pruebas de indentación con los parámetros hallados en el numeral 4.6, así:

- Velocidad de penetración: 2,10 mm/seg
- Velocidad de descarga: 0,10 mm/seg
- Fuerza aplicada: Libre
- Duración de la fuerza aplicada: esta fuerza es el tiempo en el cual la fuerza se mantiene sobre el desplazamiento máximo de 0.3 mm.

- Desplazamiento máximo: 0.3 mm.

Se realizaron ensayo de indentación a todos las muestras disponibles para las profundidades de las cuales se conoce el ángulo de fricción interno.

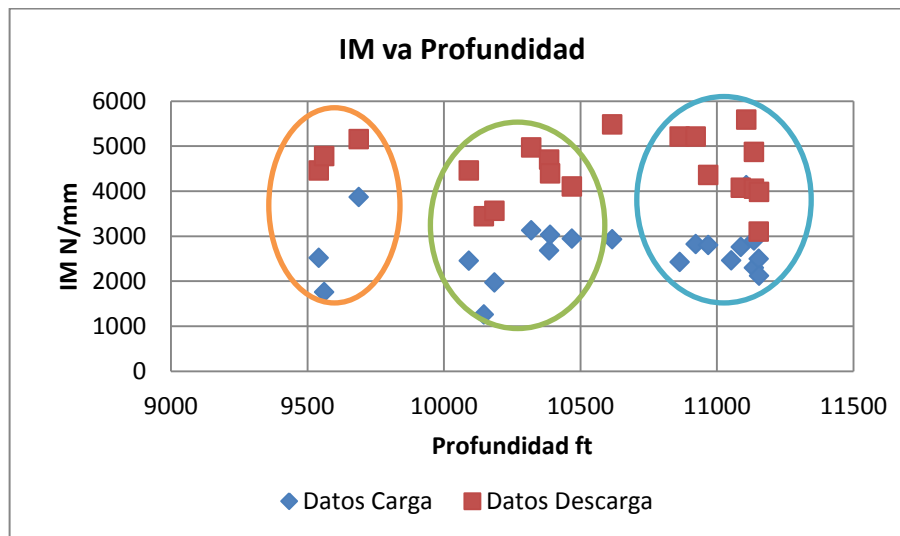
Debido a la cantidad de datos solo mostraremos el resumen de los datos los cuales para cada una de las muestras de la formación la luna son medidas de tendencia central.

<b>ZONA DE CARGA</b>				
<b>N°</b>	<b>Muestra</b>	<b>Profundidad ft</b>	<b>Puntos Indentados</b>	<b>Modulo Indentación</b>
1	200699447	9542,58	7	2514,889
2	200699452	9562,38	3	1756,234
3	200699465	9688,71	7	3870,742
4	200699472	10091,63	5	2454,262
5	200699474	10147,08	7	1257,575
6	200704153	10185,4	12	1968,338
7	200704154	10320,58	9	3127,686
8	200704155	10386,46	7	2682,794
9	200704156	10389,71	9	3028,721
10	200704406	10469,58	9	2944,002
11	200705880	10617,08	8	2929,945
12	200705892	10863,79	7	2422,245
13	200705894	10923,38	6	2823,214
14	200705896	10968,63	11	2800,406
15	200705898	11052,5	9	2459,986
16	200705899	11088	10	2761,093
17	200705902	11108,58	7	4132,219
18	200705903	11136,38	10	2299,055
19	200705904	11136,718	8	2903,042
20	200705905	11154,08	9	2495,882
21	200705906	11154,67	4	2119,536

Tabla 37 Resultados del modulo de Indentación Formación la Luna. Fuente: Autor

Descarga				
N°	Muestra	Profundidad	Puntos Indentados	Modulo Indentación
1	200699447	9542,58	10	4454,997
3	200699452	9562,38	4	4778,620
4	200699465	9688,71	11	5151,295
5	200699472	10091,63	6	4460,719
6	200699474	10147,08	5	3440,210
7	200704153	10185,4	10	3558,946
8	200704154	10320,58	12	4972,597
9	200704155	10386,46	8	4696,994
10	200704156	10389,71	11	4391,462
11	200704406	10469,58	9	4105,692
12	200705880	10617,08	7	5480,040
13	200705892	10863,79	6	5210,246
14	200705894	10923,38	7	5210,246
15	200705896	10968,63	9	4362,070
16	200705899	11088	9	4074,176
17	200705902	11108,58	8	5588,138
18	200705903	11136,38	12	4866,932
19	200705904	11136,718	7	4056,025
20	200705905	11154,08	9	3098,905
21	200705906	11154,67	7	3982,859

Tabla 38. Resultados del modulo de Indentación Formación la Luna. Fuente: Autor



Grafica 19. Dispersión de Modulo de Indentación vs Profundidad prueba estándar. Fuente: Autor

Igual que en las pruebas preliminares se realizo un análisis en la zona de carga y en la zona de descarga a las pruebas que se realizaron variado parametreo de la prueba de indentación:

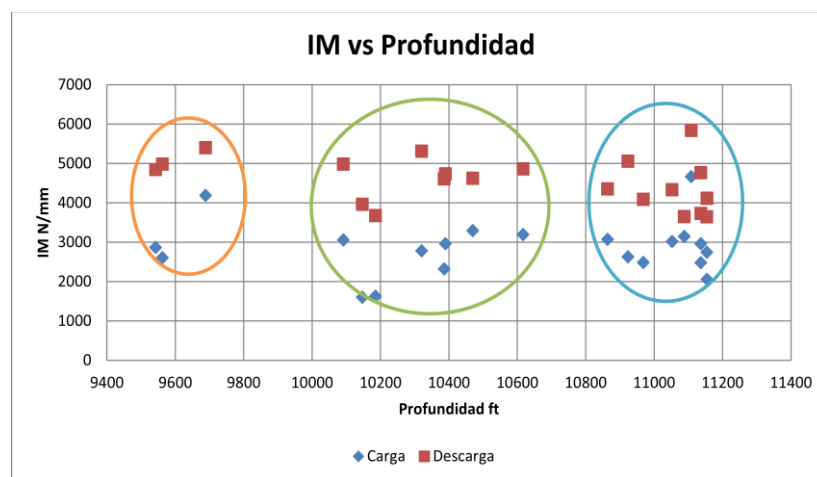
ZONA DE CARGA						
N°	Muestra	Profundidad	Puntos Indentados	Modulo Indentación	Desviación Estándar	CV%
1	200699447	9542,58	10	2866,296	450,666	16
2	200699452	9562,38	4	2607,0935	309,632	12
3	200699465	9688,71	11	4184,138	419,261	10
4	200699472	10091,63	6	3054,455	527,069	17
5	200699474	10147,08	5	1598,603	584,048	37
6	200704153	10185,4	10	1625,092	499,494	31
7	200704154	10320,58	12	2778,6825	965,003	35
8	200704155	10386,46	8	2316,703	520,366	22
9	200704156	10389,71	11	2958,437	698,058	24
10	200704406	10469,58	9	3291,613	268,675	8
11	200705880	10617,08	7	3189,955	294,711	9
12	200705892	10863,79	6	3070,402	808,504155	26
13	200705894	10923,38	7	2626,83	660,542	25
14	200705896	10968,63	9	2484,12	714,891	29
15	200705898	11052,5	6	3019,1385	768,033	25
16	200705899	11088	9	3143,345	253,57	8
17	200705902	11108,58	8	4659,9205	279,328	6
18	200705903	11136,38	12	2475,3545	538,587	22
19	200705904	11136,718	7	2958,836	78,897	3
20	200705905	11154,08	9	2740,848	437,324	16
21	200705906	11154,67	7	2052,681	372,729	18
<b>Total Puntos indentados</b>			173			

Tabla 39 Datos Obtenidos de la prueba de indentación modificada. Fuente: Autor

A Continuación los datos medios obtenidos de la zona de descarga:

ZONA DE DESCARGA						
N°	Muestra	Profundidad ft	Puntos Indentados	Modulo Indentación	Desviación Estándar	CV%
1	200699447	9542,58	10	4840,176	600,863	12,108
2	200699452	9562,38	4	4978,204	352,587	6,921
3	200699465	9688,71	11	5399,556	900,961	15,593
4	200699472	10091,63	6	4980,468	317,525	6,367
5	200699474	10147,08	5	3960,97	694,785	18,598
6	200704153	10185,4	10	3671,402	393,757	10,771
7	200704154	10320,58	12	5307,527	369,308	6,781
8	200704155	10386,46	8	4606,395	558,303	12,043
9	200704156	10389,71	11	4731,066	804,926	16,367
10	200704406	10469,58	9	4617,684	418,598	9,118
11	200705880	10617,08	7	4860,119	1079,968	20,405
12	200705892	10863,79	6	4348,055	318,923	7,562
13	200705894	10923,38	7	5056,407	931,217	16,914
14	200705896	10968,63	9	4086,555	545,405	13,389
15	200705898	11052,5	6	4331,172	1065,358	23,334
16	200705899	11088	9	3646,281	534,733	14,39
17	200705902	11108,58	8	5837,499	411,179	6,994
18	200705903	11136,38	12	4761,178	372,969	7,762
19	200705904	11136,718	7	3724,683	442,381	12,078
20	200705905	11154,08	9	3643,696	539,238	14,339
21	200705906	11154,67	7	4112,772	133,966	3,25
<b>Total Puntos indentados</b>			<b>173</b>			

Tabla 40 Datos obtenidos en zona de descarga. Fuente: Autor



Grafica 20 Dispersión de datos IM vs Profundidad. Tabla 39 y 40 Fuente: Autor

En las graficas 19 y 20 se puede ver que existe una relación en la distribución del modulo de indentación con la profundidad, se ven tres grupos de según la profundidad se puede ver en algunos caso como aumenta el modulo de indentación al aumentar la profundidad, aunque esto puede variar según la fragilidad del material rocoso o su composición.

## **8. CORRELACIONES EXPERIMENTALES ENTRE EL MODULO DE INDENTACION Y AL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO SOBRE MATERIAL ROCOSO DE LA FORMACION LA LUNA**

Correlaciones entre el ángulo de fricción interno y el modulo de indentación de datos existentes y cumplan con el numero de indentaciones mínimas.

$$Y = ax + b$$

Y = ángulo de fricción.

X = Modulo de Indentación.

$R^2$  = Coeficiente de la correlación.

La correlación se realizo por el método de mínimos cuadrados en donde coeficiente de correlación igual a 1 demuestra que los datos se relacionan con una curva recta. Una correlación no significativa o simplemente muy baja, puede ser tan informativa e interesante como una correlación alta. El descubrir una no relación puede tener tanto interés como verificar que sí existe relación. También puede suceder que se dé una clara relación, y esto puede apreciarse en un diagrama de dispersión.

### **8.1. CONSTRUYENDO CORRELACIONES EXPERIMENTALES CON EL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO Y LA PRUEBA ESTANDAR DE INDENTACION**

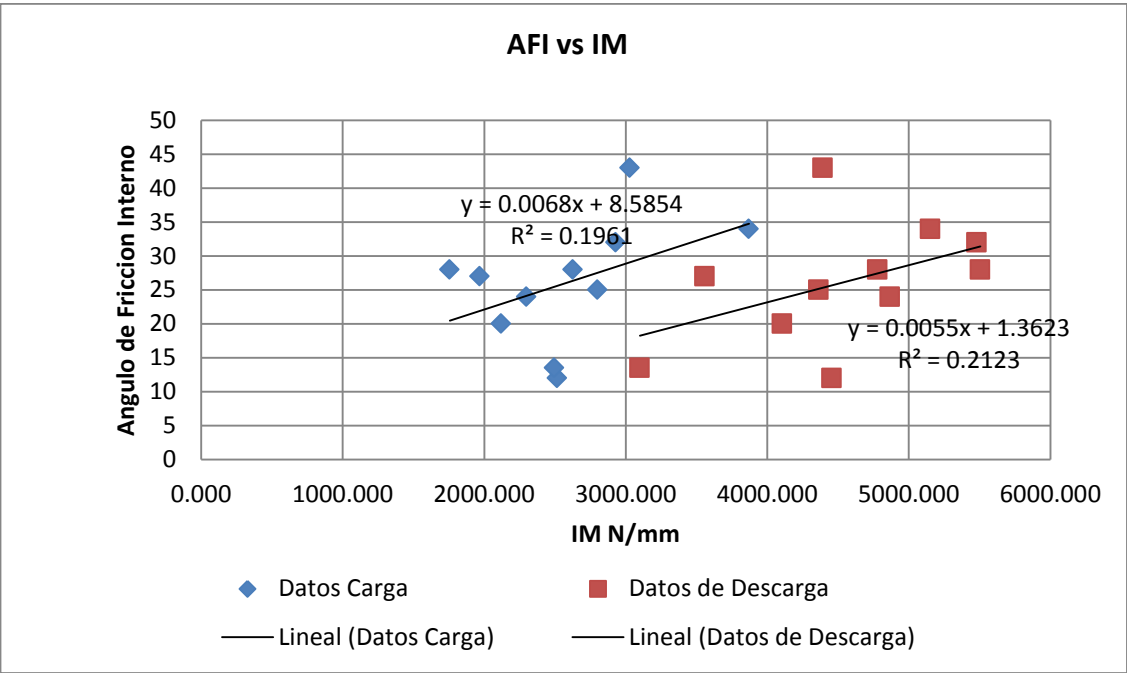
Los datos de Modulo de indentación (IM) se correlacionaron con sus respectivos datos de Ángulo de fricción interna (AFI) o con el coeficiente de fricción buscando siempre el mejor ajuste. Se realizaron 90 indentación pasando así el número mínimo de indentaciones para cumplir con los parámetros de error:

carga							
N°	Muestra	Profundidad ft	Puntos Indentados	Modulo Indentación N/mm	Ángulo °	Coefficiente fricción	IM/Profundidad
1	200699447	9542,58	7	2514,889	12	0,2126	359,2699
2	200699452	9562,38	3	1756,234	28	0,5317	585,4113
3	200699465	9688,71	7	3870,742	34	0,6745	552,9631
4	200704153	10185,4	12	1968,338	27	0,5095	164,0282
5	200704156	10389,71	9	3028,721	43	0,9325	336,5246
6	200705880	10617,08	8	2929,945	32	0,6249	366,2431
7	200705905	11154,08	9	2495,882	13,5	0,2401	277,3202
8	200699472	10091,63	5	2454,262	9,5	0,1673	490,8524
9	200705896	10968,63	11	2800,406	25	0,4663	254,5823
10	200705903	11136,38	10	2299,055	24	0,4452	229,9055
11	200705906	11154,67	9	2119,536	20	0,3640	235,5040
Puntos Indentados			90				
Descarga							
N°	Muestra	Profundidad ft	Puntos Indentados	Modulo Indentación	Ángulo °	Coefficiente fricción	IM/Profundidad
1	200699447	9542,58	7	4454,997	12	0,2126	636,4281
2	200699452	9562,38	3	4778,620	28	0,5317	1592,8733
3	200699465	9688,71	7	5151,295	34	0,6745	735,8993
4	200704153	10185,4	12	3558,946	27	0,5095	296,5788
5	200704156	10389,71	9	4391,462	43	0,9325	487,9402
6	200705880	10617,08	8	5480,040	32	0,6249	685,0050
7	200705905	11154,08	9	3098,905	13,5	0,2401	344,3228
8	200699472	10091,63	5	4460,719	9,5	0,1673	892,1438
9	200705896	10968,63	11	4362,070	25	0,4663	396,5518
10	200705903	11136,38	10	4866,932	24	0,4452	486,6932
11	200705906	11154,67	9	4105,692	20	0,3640	456,1880
Puntos Indentados			90				

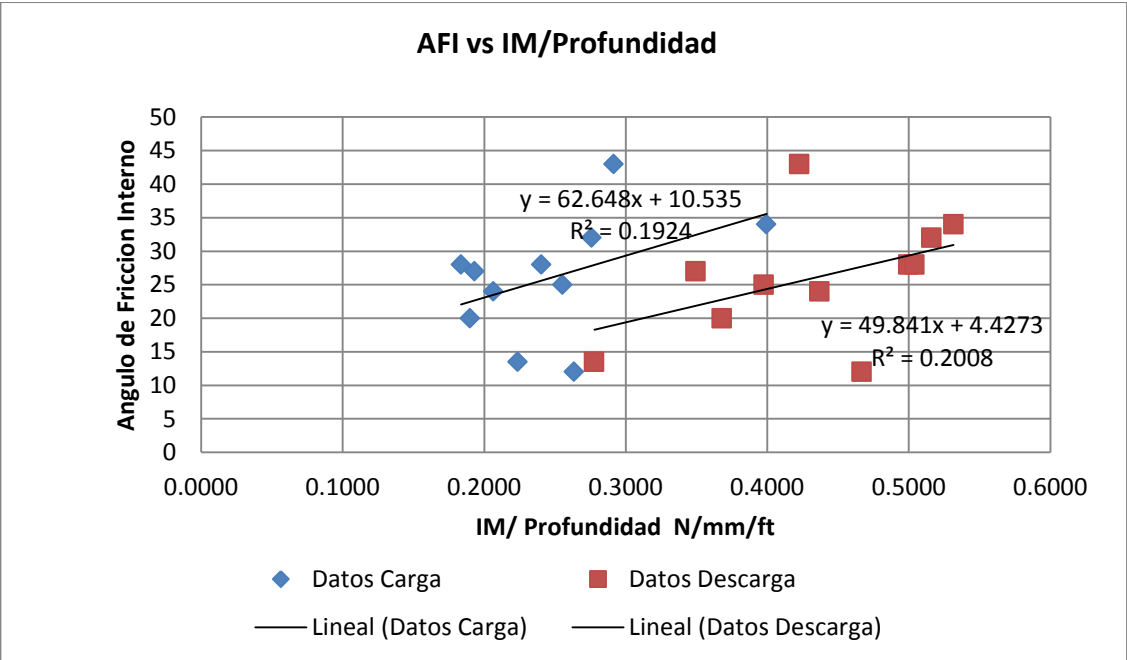
Tabla 41 Datos para correlación Prueba estándar de laboratorio. Fuente: Autor

Inicialmente se busco una relación entre el AFI y el IM en cada una de la zona de carga y de descarga como se muestra en la siguiente grafica 21.

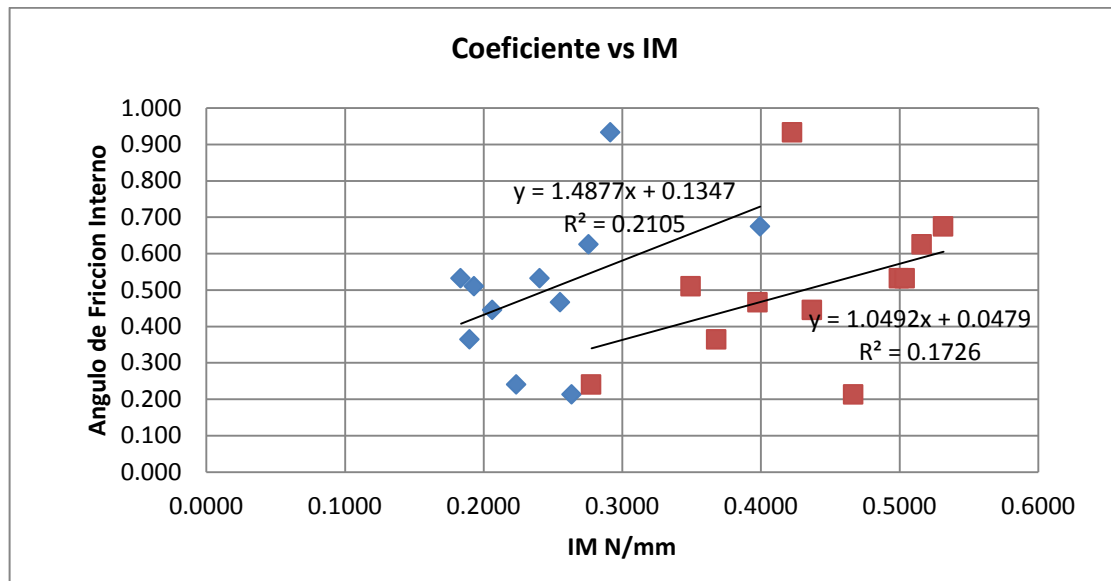
En la grafica 22 se grafico coeficiente de fricción contra la relación del modulo de indentación y la profundidad debido a que tanto el modulo de indentación como la fricción varían con relación a la profundidad.



Grafica 21 Datos Ángulo de fricción vs Modulo indentación



Grafica 22 Datos Ángulo de fricción vs Modulo indentación

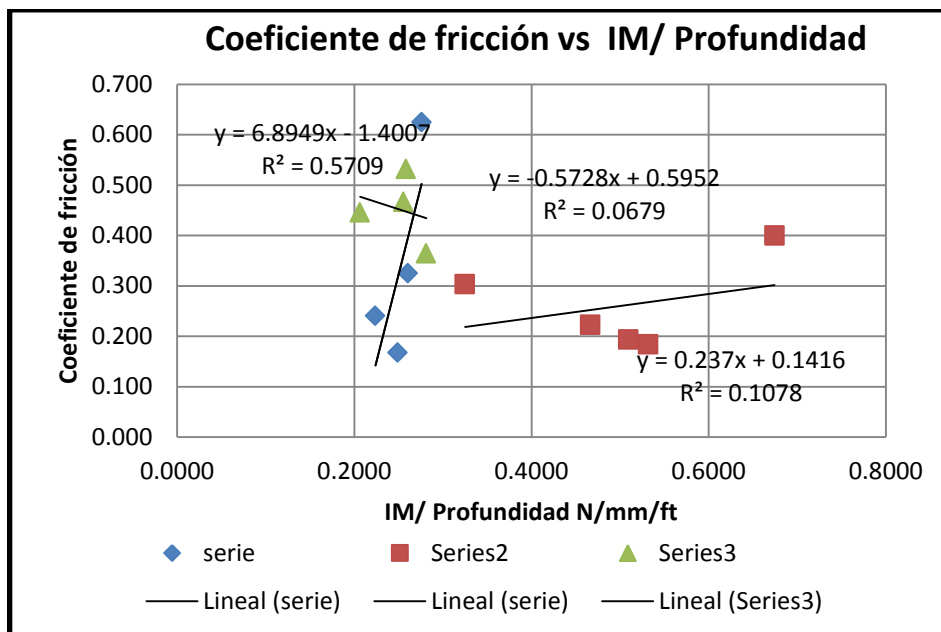


Grafica 23 Datos AFI VS Modulo indentación

En las graficas 21, 22,23 no se encontramos una relación significativa, aunque se ve que el comportamiento es aceptable ya que los valores de modulo de indentación y ángulo de fricción interna aumenta con la profundidad. Entonces se separaron las muestras por durezas según como se vio en el numeral 5, se aplicaran las familias de dureza que se encontraron en el laboratorio de Mecánicas de Roca del ICP, en la tabla 41 encontramos las familias de fragilidad dividida por colores, cada color corresponde a 1 de las tres familias para pruebas estándar y para prueba modificada.

carga							
N°	Muestra	Profundidad ft	Puntos Indentados	Modulo Indentación N/mm	Ángulo °	Coefficiente fricción	IM/Profundidad
1	200699447	9542,58	7	2514,889	12	0,2126	359,2699
2	200699452	9562,38	3	1756,234	28	0,5317	585,4113
3	200699465	9688,71	7	3870,742	34	0,6745	552,9631
4	200704153	10185,4	12	1968,338	27	0,5095	164,0282
5	200704156	10389,71	9	3028,721	43	0,9325	336,5246
6	200705880	10617,08	8	2929,945	32	0,6249	366,2431
7	200705905	11154,08	9	2495,882	13,5	0,2401	277,3202
8	200699472	10091,63	5	2454,262	9,5	0,1673	490,8524
9	200705896	10968,63	11	2800,406	25	0,4663	254,5823
10	200705903	11136,38	10	2299,055	24	0,4452	229,9055
11	200705906	11154,67	9	2119,536	20	0,3640	235,5040
Puntos Indentados			90				

Tabla 42 Datos de Carga prueba modificada

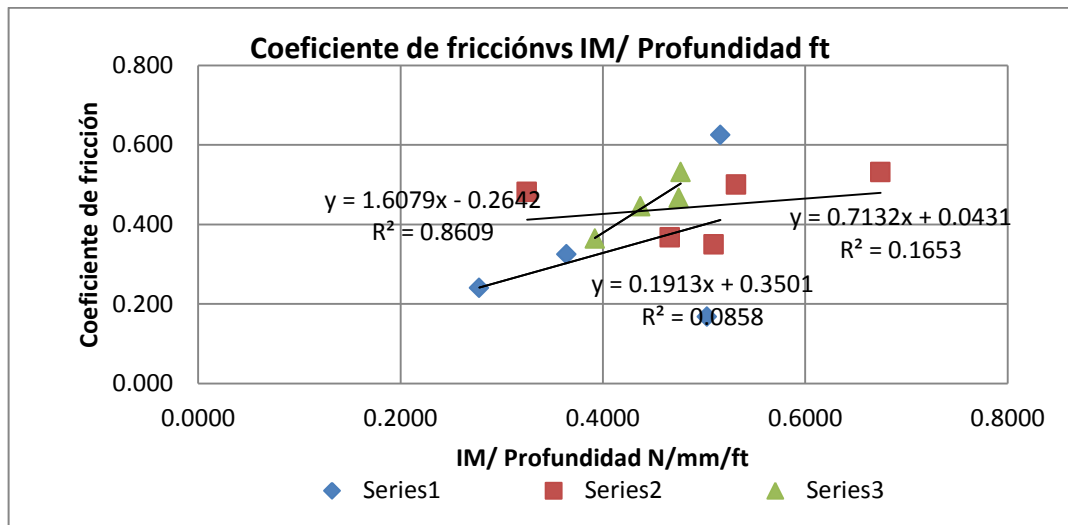


Grafica 24 Datos de Carga Tabla 42

Datos analizados en la zona de descarga datos obtenidos de la prueba de indentación variando parámetros de velocidad de entrada y velocidad de salida

Descarga							
N°	Muestra	Profundidad ft	Puntos Indentados	Modulo Indentación	Ángulo °	Coeficiente fricción	IM/Profundidad
1	200699447	9542,58	7	4454,997	12	0,2126	636,4281
2	200699452	9562,38	3	4778,620	28	0,5317	1592,8733
3	200699465	9688,71	7	5151,295	34	0,6745	735,8993
4	200704153	10185,4	12	3558,946	27	0,5095	296,5788
5	200704156	10389,71	9	4391,462	43	0,9325	487,9402
6	200705880	10617,08	8	5480,040	32	0,6249	685,0050
7	200705905	11154,08	9	3098,905	13,5	0,2401	344,3228
8	200699472	10091,63	5	4460,719	9,5	0,1673	892,1438
9	200705896	10968,63	11	4362,070	25	0,4663	396,5518
10	200705903	11136,38	10	4866,932	24	0,4452	486,6932
11	200705906	11154,67	9	4105,692	20	0,3640	456,1880
Puntos Indentados			90				

Tabla 43 Datos de descarga prueba modificada

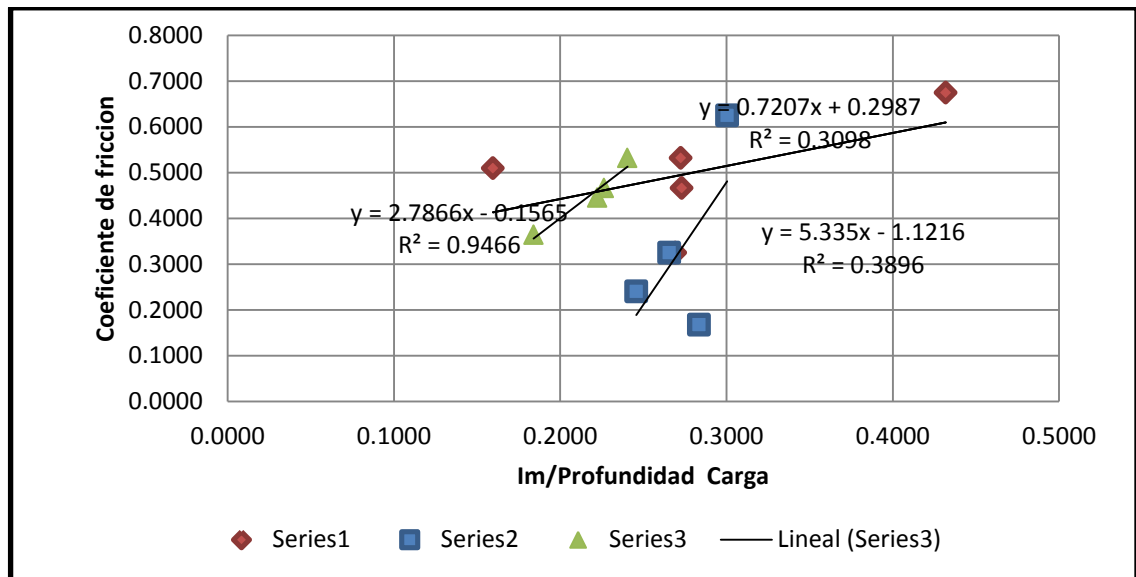


Grafica 25 Datos de Descarga Tabla 43

Los resultados aceptados fueron los representados por la grafica 25 pero no significativos se procedió a realizar el mismo análisis con los datos hallados mediante prueba modificada y se compararan con los resultados del numeral. 8.3.

CARGA					
Muestra	Profundidad ft	IM N/mm Descarga	Ángulo °	Coeficiente fricción	IM/Profundidad
200699452	9562,38	2607,0935	28	0,5317	0,2726
200699465	9688,71	4184,138	34	0,6745	0,4319
200704153	10185,4	1625,092	27	0,5095	0,1596
200704154	10320,58	2778,6825	18	0,3249	0,2692
200705898	11052,5	3019,1385	25	0,4663	0,2732
200705880	10617,08	3189,955	32	0,6249	0,3005
200705899	11088	3143,345	9,5	0,1673	0,2835
200705904	11136,718	2958,836	18	0,3249	0,2657
200705905	11154,08	2740,848	13,5	0,2401	0,2457
200705894	10923,38	2626,83	28	0,5317	0,2405
200705896	10968,63	2484,12	25	0,4663	0,2265
200705903	11136,38	2475,3545	24	0,4452	0,2223
200705906	11154,67	2052,681	20	0,3640	0,1840

Tabla 44 Datos prueba modificada.



Grafica 26 Datos tabla 44.

Los Datos obtenidos en la zona de descarga separando por familia de fragilidades son:

$R^2 = 0,3098$ . Familia Roja

$$y = 0,7207x + 0,2987$$

$R^2 = 0,3896$ . Familia Azul

$$y = 5,335x - 1,1216$$

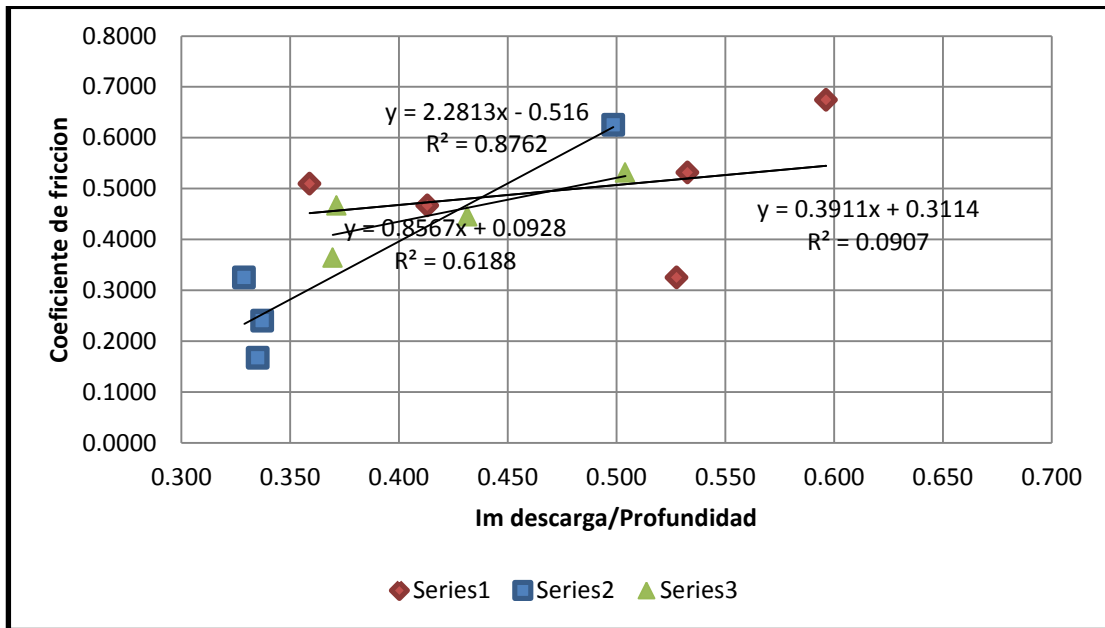
$R^2 = 0,9466$  Familia Verde

$$y = 2,7866x - 0,1565$$

Debido a que en la zona de descarga es donde teóricamente se puede ver mejores resultados producidos por el contacto del indentador y la muestra procedemos a analizar la zona de descarga.

DESCARGA					
Muestra	Profundidad ft	IM N/mm Descarga	Ángulo °	Coefficiente fricción	IM/Profundidad
200699452	9562,38	5094,5035	28	0,5317	0,5328
200699465	9688,71	5777,855	34	0,6745	0,5963
200704153	10185,4	3655,707	27	0,5095	0,3589
200704154	10320,58	5445,9015	18	0,3249	0,5277
200705898	11052,5	4565,623	25	0,4663	0,4131
200705880	10617,08	5292,628	32	0,6249	0,4985
200705899	11088	3716,023	9,5	0,1673	0,3351
200705904	11136,718	3662,589	18	0,3249	0,3289
200705905	11154,08	3760,625	13,5	0,2401	0,3372
200705894	10923,38	5505,735	28	0,5317	0,5040
200705896	10968,63	4073,502	25	0,4663	0,3714
200705903	11136,38	4804,9895	24	0,4452	0,4315
200705906	11154,67	4121,985	20	0,3640	0,3695

Tabla 45 Datos de descarga



Grafica 27 Datos tabla 46

$R^2 = 0,0907$  Familia Roja  
 $y = 0,3911x + 0,3114$

$R^2 = 0,876$  Familia azul  
 $y = 2,2813x - 0,516$

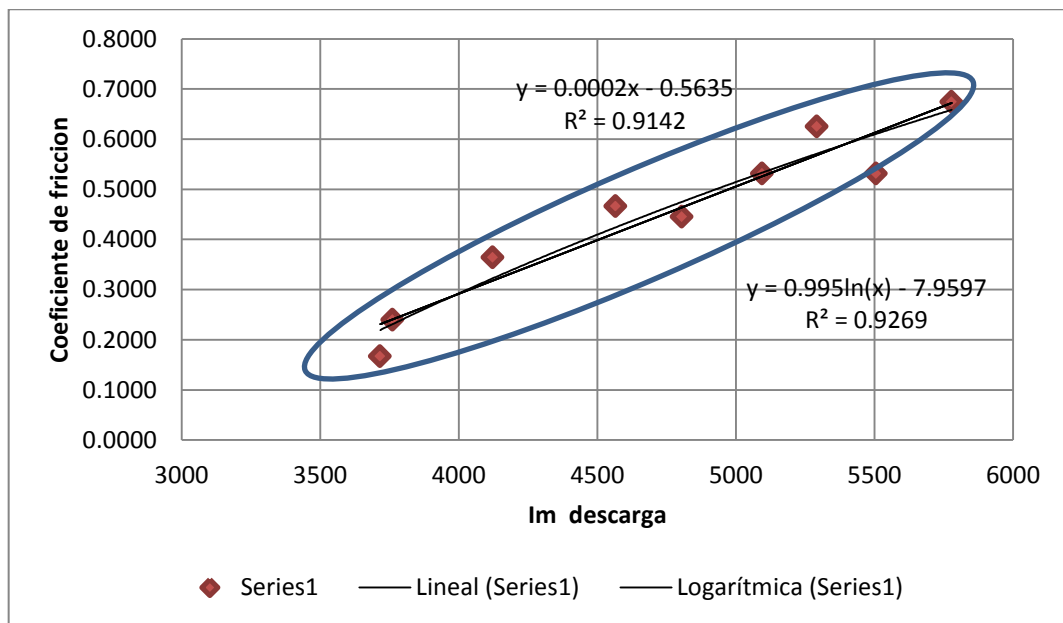
$R^2 = 0,618$  Familia verde  
 $y = 0,8567x + 0,0928$

Los datos obtenidos en la grafica 26 y 27 se analizaron en el numeral 8.3.

Debido a lo complicado para aplicar la correlación se decidió realizar un análisis de puntos de las regiones de datos ya mostrados descartando puntos extremos y el resultado fue.

DESCARGA					
Muestra	Profundidad ft	IM N/mm Descarga	Ángulo °	Coefficiente fricción	IM/Profundidad
200699452	9562,38	5094,5035	28	0,5317	0,5328
200699465	9688,71	5777,855	34	0,6745	0,5963
200705898	11052,5	4565,623	25	0,4663	0,4131
200705880	10617,08	5292,628	32	0,6249	0,4985
200705899	11088	3716,023	9,5	0,1673	0,3351
200705905	11154,08	3760,625	13,5	0,2401	0,3372
200705894	10923,38	5505,735	28	0,5317	0,5040
200705903	11136,38	4804,9895	24	0,4452	0,4315
200705906	11154,67	4121,985	20	0,3640	0,3695

Tabla 46 Datos Prueba Modificadas



Grafica 28 Datos Tabla 46

$$R^2 = 0,9269 ; y = 0,995. \ln(x) - 7,9597$$

$$R^2 = 0,9142 ; y = 0,002. x - 0,5635$$

Los datos se evalúan en el numeral 8.3.

Escriba aquí la ecuación.

### 8.3. EVALUANDO DE LA CORRELACION ENTRE EL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA O EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN O EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y EL MODULO DE INDENTACION

Los parámetros que se usaron para desarrollar las pruebas de indentación están descritos en el capítulo 4.

A continuación encontramos los datos que se usaran para evaluar las correlaciones, los datos que se evaluarán son datos producto de las pruebas de datos variados. Datos producto del análisis en zona de carga:

ZONA DE CARGA						
Muestras para Indentación Formación la Luna	Muestra	Profundidad	Puntos Indentados	Mediana	Desviación Estándar	CV%
1	200699447	9542,58	10	2866,296	450,666	16
2	200699452	9562,38	4	2607,0935	309,632	12
3	200699465	9688,71	11	4184,138	419,261	10
4	200699472	10091,63	6	3054,455	527,069	17
5	200699474	10147,08	5	1598,603	584,048	37
6	200704153	10185,4	10	1625,092	499,494	31
7	200704154	10320,58	12	2778,6825	965,003	35
8	200704155	10386,46	8	2316,703	520,366	22
9	200704156	10389,71	11	2958,437	698,058	24
10	200704406	10469,58	9	3291,613	268,675	8
11	200705880	10617,08	7	3189,955	294,711	9
12	200705892	10863,79	6	3070,402	808,504155	26
13	200705894	10923,38	7	2626,83	660,542	25
14	200705896	10968,63	9	2484,12	714,891	29
15	200705898	11052,5	6	3019,1385	768,033	25
16	200705899	11088	9	3143,345	253,570	8
17	200705902	11108,58	8	4659,9205	279,328	6
18	200705903	11136,38	12	2475,3545	538,587	22
19	200705904	11136,718	7	2958,836	78,897	3
20	200705905	11154,08	9	2740,848	437,324	16
21	200705906	11154,67	7	2052,681	372,729	18
Total Puntos indentados			173			

Tabla 47. Datos para evaluar correlaciones

Datos producto del análisis en zona de descarga:

ZONA DE DESCARGA						
Muestras para Indentación Formación la Luna	Muestra	Profundidad	Puntos Indentados	Mediana	Desviación Estándar	CV%
				1	200699447	9542,58
2	200699452	9562,38	4	5094,5035	352,587	7
3	200699465	9688,71	11	5777,855	900,961	16
4	200699472	10091,63	6	4986,7235	317,525	6
5	200699474	10147,08	5	3735,714	694,785	19
6	200704153	10185,4	10	3655,707	393,757	11
7	200704154	10320,58	12	5445,9015	369,308	7
8	200704155	10386,46	8	4636,0235	558,303	12
9	200704156	10389,71	11	4917,894	804,926	16
10	200704406	10469,58	9	4590,845	418,598	9
11	200705880	10617,08	7	5292,628	1079,968	20
12	200705892	10863,79	6	4217,3435	318,923	8
13	200705894	10923,38	7	5505,735	931,217	17
14	200705896	10968,63	9	4073,502	545,405	13
15	200705898	11052,5	6	4565,623	1065,358	23
16	200705899	11088	9	3716,023	534,733	14
17	200705902	11108,58	8	5878,7345	411,179	7
18	200705903	11136,38	12	4804,9895	372,969	8
19	200705904	11136,718	7	3662,589	442,381	12
20	200705905	11154,08	9	3760,625	539,238	14
21	200705906	11154,67	7	4121,985	133,966	3
<b>Total Puntos indentados</b>			<b>173</b>			

Tabla 48 Fuente: Autor.

Datos de ángulo de fricción obtenidos en la envolvente de falla calculada al a partir del ensayo triaxial:

Numero de Muestras	Tipo de ensayo	Sample ID	Profundidad	Orientación	Envolvente 1	
					Cohesión (psi)	Ángulo °
1	Envolvente	200699447	9542,58	Horizontal	1200	12
2	Envolvente	200699452	9562,38	Horizontal	2300	28
3	Envolvente	200699465	9688,71	Horizontal	2300	34
4	Envolvente	200699472	10091,63	Horizontal	1450	9,5
5	Envolvente	200699474	10147,08	Horizontal	900	38
6	Envolvente	200704153	10185,4	Horizontal	400	27
7	Envolvente	200704154	10320,58	Horizontal	900	18
8	Envolvente	200704155	10386,46	Horizontal	700	35
9	Envolvente	200704156	10389,71	Horizontal	1400	43
10	Envolvente	200704406	10469,58	Vertical	2200	25
11	Envolvente	200705880	10617,08	Horizontal	700	32
12	Envolvente	200705892	10863,79	Vertical	350	26
13	Envolvente	200705894	10923,38	Horizontal	500	28
14	Envolvente	200705896	10968,63	Horizontal	750	25
15	Envolvente	200705898	11052,5	Horizontal	1000	25
16	Envolvente	200705899	11088	Vertical	1100	9,5
17	Envolvente	200705902	11108,58	Horizontal	700	32
18	Envolvente	200705903	11136,38	Horizontal	1500	24
19	Envolvente	200705904	11136,718	Vertical	600	18
20	Envolvente	200705905	11154,08	Vertical	650	13,5
21	Envolvente	200705906	11154,67	Horizontal	1450	20

Tabla 49 Fuente: Autor

Consolidado de datos a utilizar separando las muestras por durezas, las cuales las obtuvimos del Laboratorio de Mecánica de Rocas del ICP, ya que en este trabajo no se realizaron pruebas de dureza:

Muestra	Profundidad ft	Modulo Indentación Carga N/mm	IM/ Profundidad N/mm/ft carga	Modulo Indentación descarga N/mm	IM/ Profundidad N/mm/ft descarga	Ángulo °	Coefficiente de Fricción
200699447	9542,580	2866,296	0,300	4962,695	0,520	12,000	0,213
200704153	10185,400	1625,092	0,160	3655,707	0,359	27,000	0,510
200704154	10320,580	2778,683	0,269	5445,902	0,528	18,000	0,325
200704155	10386,460	2316,703	0,223	4636,024	0,446	35,000	0,700
200704406	10469,580	3291,613	0,314	4590,845	0,438	25,000	0,466
200705892	10863,790	3070,402	0,283	4217,344	0,388	26,000	0,488
200705898	11052,500	3019,139	0,273	4565,623	0,413	25,000	0,466
200705904	11136,718	2958,836	0,266	3662,589	0,329	18,000	0,325
200705905	11154,080	2740,848	0,246	3760,625	0,337	13,500	0,240
200704156	10389,710	2958,437	0,285	4917,894	0,473	43,000	0,933
200705899	11088,000	3143,345	0,283	3716,023	0,335	9,500	0,167
200705880	10617,080	3189,955	0,300	5292,628	0,499	32,000	0,625
200705902	11108,580	4659,921	0,419	5878,735	0,529	32,000	0,625
200705903	11136,380	2475,355	0,222	4804,990	0,431	24,000	0,445
200705894	10923,380	2626,830	0,240	5505,735	0,504	28,000	0,532
200705896	10968,630	2484,120	0,226	4073,502	0,371	25,000	0,466
200705906	11154,670	2052,681	0,184	4121,985	0,370	20,000	0,364
200699452	9562,380	2607,094	0,273	5094,504	0,533	28,000	0,532
200699465	9688,710	4184,138	0,432	5777,855	0,596	34,000	0,675
200699472	10091,630	3054,455	0,303	4986,724	0,494	9,500	0,167
200699474	10147,080	1598,603	0,158	3735,714	0,368	38,000	0,781

Tabla 50 Fuente: Autor

$y = 0,7207x - 0,2987 \quad R^2 = 0,3098$				
Muestra	IM/ Profundidad N/mm/ft carga	Coefficiente de friccionTeórico	Coefficiente de fricción Experimental	Error
200699447	0,300	0,515	0,213	59
200704153	0,160	0,414	0,510	23
200704154	0,269	0,493	0,325	34
200704155	0,223	0,459	0,700	52
200704406	0,314	0,525	0,466	11
200705892	0,283	0,502	0,488	3
200705898	0,273	0,496	0,466	6
$y = 0,3911x - 0,3114 \quad R^2 = 0,0907$				
Muestra	IM/ Profundidad N/mm/ft descarga	Coefficiente de friccionTeórico	Coefficiente de fricción Experimental	Error
200699447	0,520	-0,108	0,213	297
200704153	0,359	-0,171	0,510	398
200704154	0,528	-0,105	0,325	409
200704155	0,446	-0,137	0,700	612
200704406	0,438	-0,140	0,466	433
200705892	0,388	-0,160	0,488	406
200705898	0,413	-0,150	0,466	411

Tabla 51 Evaluación de Correlaciones

$y = 5,335x - 1,1216 \quad R^2 = 0,3896$				
Muestra	IM/ Profundidad N/mm/ft carga	Coefficiente de friccionTeórico	Coefficiente de fricción Experimental	Error
200705904	0,266	0,296	0,213	28
200705905	0,246	0,189	0,510	169
200704156	0,285	0,398	0,325	18
200705899	0,283	0,391	0,700	79
200705880	0,300	0,481	0,466	3
$y = 0,8567x - 0,0928 \quad R^2 = 0,0907$				
Muestra	IM/ Profundidad N/mm/ft descarga	Coefficiente de friccionTeórico	Coefficiente de fricción Experimental	Error
200705904	0,329	0,189	0,213	12
200705905	0,337	0,196	0,510	160
200704156	0,473	0,313	0,325	4
200705899	0,335	0,194	0,700	260
200705880	0,499	0,334	0,466	40

Tabla 52 Evaluación de Correlaciones

$y = 2,7866x - 0,1565 \quad R^2 = 0,9466$				
Muestra	IM/ Profundidad N/mm/ft carga	Coefficiente de friccionTeórico	Coefficiente de fricción Experimental	Error
200705902	0,4195	1,012	0,625	38
200705903	0,2223	0,463	0,445	4
200705894	0,2405	0,514	0,532	4
200705896	0,2265	0,475	0,466	2
200705906	0,1840	0,356	0,364	2
200699452	0,2726	0,603	0,532	12
200699465	0,4319	1,047	0,675	36
200699472	0,3027	0,687	0,167	76
200699474	0,1575	0,283	0,781	177
$y = 0,8567x - 0,0928 \quad R^2 = 0,618$				
Muestra	IM/ Profundidad N/mm/ft descarga	Coefficiente de friccionTeórico	Coefficiente de fricción Experimental	Error
200705902	0,419	0,267	0,625	57
200705903	0,222	0,098	0,445	356
200705894	0,240	0,113	0,532	370
200705896	0,226	0,101	0,466	361
200705906	0,184	0,065	0,364	461
200699452	0,273	0,141	0,532	278
200699465	0,432	0,277	0,675	143
200699472	0,303	0,166	0,167	1
200699474	0,158	0,042	0,781	1753

Tabla 53 Evaluación de Correlaciones

Los valores de error son muy variados, esto se debe a las diferentes componentes del material.

$R^2 = 0,9142 ; y = 0,002.x - 0,5635$					
Muestra	Coficiente fricción Real	IM N/mm	Ángulo °	Coficiente fricción*	Error
200699447	0,213	4962,695	12,000	0,429	102
200704153	0,510	3655,707	27,000	0,168	67
200704154	0,325	5445,902	18,000	0,526	62
200704155	0,700	4636,024	35,000	0,364	48
200704406	0,466	4590,845	25,000	0,355	24
200705892	0,488	4217,344	26,000	0,280	43
200705898	0,466	4565,623	25,000	0,350	25
200705904	0,325	3662,589	18,000	0,169	48
200705905	0,240	3760,625	13,500	0,189	21
200704156	0,933	4917,894	43,000	0,420	55
200705899	0,167	3716,023	9,500	0,180	7
200705880	0,625	5292,628	32,000	0,495	21
200699472	0,167	4986,724	9,500	0,434	159
200699474	0,781	3735,714	38,000	0,184	76
200699452	0,532	5094,504	28,000	0,455	14
200705894	0,532	5505,735	28,000	0,538	1
200705896	0,466	4073,502	25,000	0,251	46
200705902	0,625	5878,735	32,000	0,612	2
200705903	0,445	4804,990	24,000	0,397	11
200699465	0,675	5777,855	34,000	0,592	12
200705906	0,364	4121,985	20,000	0,261	28

\* Valor del coeficiente hallado por la ecuación de la correlación

$$R^2 = 0,9269; y = 0,995 \cdot \ln(x) - 7,9597$$

Muestra	IM N/mm	Ángulo °	Coefficiente fricción	Coefficiente fricción*	Error
200699447	4962,695	12,000	0,213	0,507	139
200704153	3655,707	27,000	0,510	0,203	60
200704154	5445,902	18,000	0,325	0,600	85
200704155	4636,024	35,000	0,700	0,440	37
200704406	4590,845	25,000	0,466	0,430	8
200705892	4217,344	26,000	0,488	0,346	29
200705898	4565,623	25,000	0,466	0,424	9
200705904	3662,589	18,000	0,325	0,205	37
200705905	3760,625	13,500	0,240	0,231	4
200704156	4917,894	43,000	0,933	0,498	47
200705899	3716,023	9,500	0,167	0,220	31
200705880	5292,628	32,000	0,625	0,571	9
200699472	4986,724	9,500	0,167	0,512	206
200699474	3735,714	38,000	0,781	0,225	71
200699452	5094,504	28,000	0,532	0,534	0
200705894	5505,735	28,000	0,532	0,611	15
200705896	4073,502	25,000	0,466	0,311	33
200705902	5878,735	32,000	0,625	0,676	8
200705903	4804,990	24,000	0,445	0,475	7
200699465	5777,855	34,000	0,675	0,659	2
200705906	4121,985	20,000	0,364	0,323	11

\* Valor del coeficiente hallado por la ecuación de la correlación

Tabla 54 Evaluando resultados

Los errores nos muestran que pueden existir varias poblaciones las cuales son muy difíciles de separar ya que no se pueden ver diferencias significativas.

Los errores más significativos los encontramos cuando el ángulo de fricción real es bajo, esto demuestra que debe hacerse una análisis más detallado teniendo en cuenta regiones en donde al ángulo de fricción puede ser alto o bajo.

#### **8.4. METODOLOGIA RECOMENDADA PARA LA APLICACIÓN DE LAS CORRELACIONES EXPERIMENTALES ENTRE PARAMETROS DE INDENTACION Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA O EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.**

- 1. Selección de las muestras:** Se seleccionan muestras provenientes de pozo que sean producto de las inestabilidades, los cuales mantienen su integridad y propiedades. Si la formación contiene gran variedad de componentes se recomienda hacer análisis de fragilidad en las profundidades de las cuales se extraen las muestras.
- 2. Preparación de las Probetas:** En este punto las muestras provenientes de pozo se seleccionan los ripios que cumplan con un rango de 4mm a 6mm, la preparación de las probetas esta en el capítulo 4.
- 3. Ejecución de Ensayo:** La ejecución de los ensayos se puede ver en el capítulo 4 numeral 4.6. Para el desarrollo de las pruebas finales la metodología que se señalo fue la de variar la velocidad de penetración y la velocidad de descarga y algunos parámetros en los cuales están velocidad de penetración: 2.1 mm/seg y velocidad de salida de  $V_s = 0,01$  mm/seg,.
- 4. Interpretación de los resultados:** A las graficas obtenidas de los ensayos de indentación se realiza un análisis hallando el modulo de indentación de forma convencional es decir la pendiente de la curva de fuerza versus desplazamiento en la zona de carga y en la zona de descarga.

**5. Aplicación de las Correlaciones Experimentales:** De acuerdo al estado de las correlaciones experimentales, para cada formación se debe seguir la metodología aquí expuesta debido a que no se puede generalizar debido a las diversas familias que se pueden encontrar relacionadas con la profundidad o con su conformación de componentes.

## CONCLUSIONES

Cuando se plantea realizar correlaciones experimentales basadas en pruebas de laboratorio, se requiere el planteamiento e implementación de un adecuado diseño experimental que permita considerar todos los factores que influyen en las pruebas.

Uno de los objetivos del proyecto era el de conocer la respuesta mecánica debida a la variación de la velocidad de aplicación de la carga del indentador, lo cual se observó de manera clara en los resultados.

Las pruebas preliminares que se realizaron fueron con el fin de determinar la dispersión de los valores y el número óptimo para cumplir con los parámetros de error.

Estas pruebas se realizaron con un indentador plano, en la literatura se encuentra que para obtener mejores resultados de propiedades mecánicas influye la forma del indentador y se recomienda que sea cónico totalmente liso y cónico muy rugoso y existe una metodología planteada para el ángulo de fricción interno con este tipo de indentador.

Al realizar el análisis a la zona de descarga en cualquiera de las variaciones de la prueba se obtuvieron resultados más significativos dado que en la zona de descarga el indentador sale de la muestra y se puede registrar una fricción entre las caras del indentador y las paredes muestra.

Al controlar la fuerza lo que varia es la distancia de penetración, la cual puede disminuir o aumentar según la dureza del material, y no se tendría control total de este parámetro debido al material heterogéneo de las rocas.

Todas las correlaciones son aplicables ya que el comportamiento es lógico porque a medida que aumenta la profundidad, también debe aumentar el ángulo de fricción y el modulo de indentación, también se debe tener en cuenta la

composición de la roca ya que en las muestras de este proyecto se tuvieron que separar por fragilidades para encontrar un valor acertado.

Al tratar de generalizar las correlaciones encontradas se puede ver que puede que exista una relación diferente entre el modulo de indentación y ángulo de fricción altos y otra para el modulo de indentación y ángulo de fricción bajos.

## RECOMENDACIONES

- Analizar el artículo perteneciente a la SPE 748 - **J.B. CHEATHAM, JR. ROCK-BIT TOOTH FRICTION ANALIYSIS**, en donde plantea una metodología con otro tipo de geometría del indentador.
- Se recomienda hacer un fortalecimiento de la cantidad de puntos indentados que conforman las correlaciones.
- Se recomienda tener en cuenta datos de fragilidad para separar las poblaciones cuando se aplique la metodología.
- Se recomienda realizar un análisis teniendo como base el valor del ángulo de fricción interno o el coeficiente de fricción según sea alto o bajo para poder tener mejores resultados.
- Se recomienda realizar el mismo procedimiento sobre muestras de material rocoso ígneo con el fin de verificar, debido a que es más homogénea que las rocas de zonas productoras de hidrocarburos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. Alva Hurtado, J. (1996). Terzaghi y la mecánica de suelos, PHD,
- [2]. Badillo, J. Rodríguez, R. (2005). Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos, Tomo I, Limusa México, Cap. XI.
- [3]. Criterios de manufactura, disponible en: <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/mecsol/Tema5.pdf>, Consultada el 11 de agosto a las 1:03 a.m.
- [4]. Caballero, V. Parra, M. Mora, A. (2010). Levantamiento de la cordillera oriental de Colombia durante el eoceno tardío – oligoceno temprano: proveniencia sedimentaria en el sinclinal de nuevo mundo, cuenca valle medio del Magdalena. Boletín de Geología. 32 (1), 4577. Esta indicado: volumen 32, número 1, de la pagina 45 a la 77.
- [5]. Duque, G. y Escobar, C. Mecánica de suelos.
- [6]. Fjær, E. Holt, R.M. Horsrud, P. Raaen, A.M. & Risnes, R. (2008). Petroleum related rock mechanics (2ª edición). Hungary: Elsevier.
- [7] Garcia, R. (2008). Desarrollo de correlaciones experimentales a partir de parámetros de indentación para la obtención de la resistencia compresiva uniaxial (UCS) en muestras de shale. Universidad Industrial de Santander.
- [8]. INGEOMINAS, Introducción a la Geología con Ejemplos de Colombia, 2001. Meza, J. Chaves, C. Vélez, J. (2006). Técnicas de indentación: Medición de propiedades mecánicas en cerámicas. Dyna, Universidad Nacional de Colombia. 73 (149), 8293. Esta indicado: volumen 73, número 149, de la pagina 82 a la 93

**[9]** Instituto de Investigaciones Geológico – Mineras. (1983). Mapas de terrenos geológicos de Colombia. Ingeominas.

**[10].** Instituto Nacional de Vías, I.N.V. E – 152 – 07, Compresión Inconfinada en Muestras de Suelos.

**[11].** Instituto Nacional de Vías, I.N.V. E – 153 – 07, Parámetros de Resistencia del Suelo Mediante Compresión Triaxial.

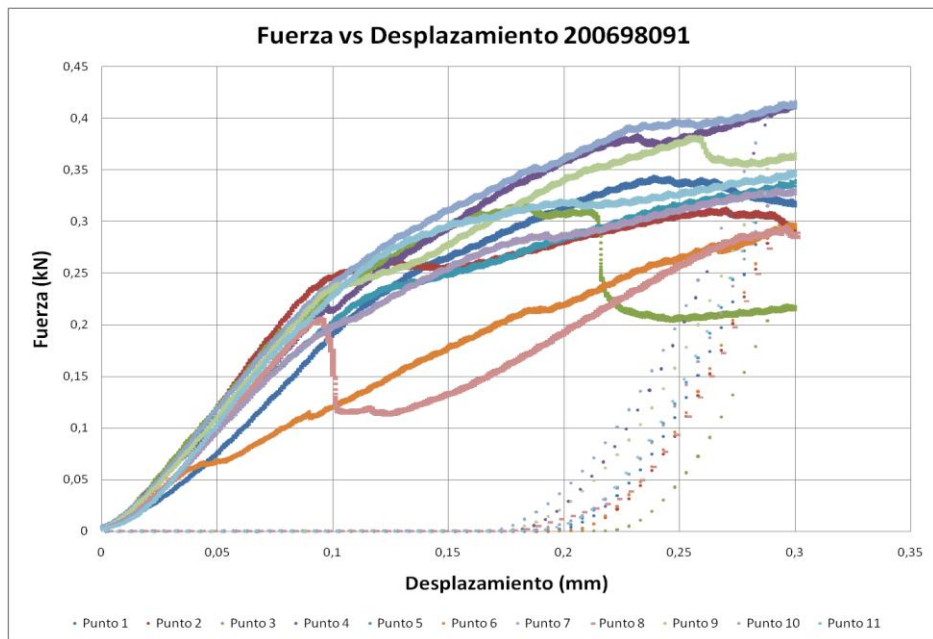
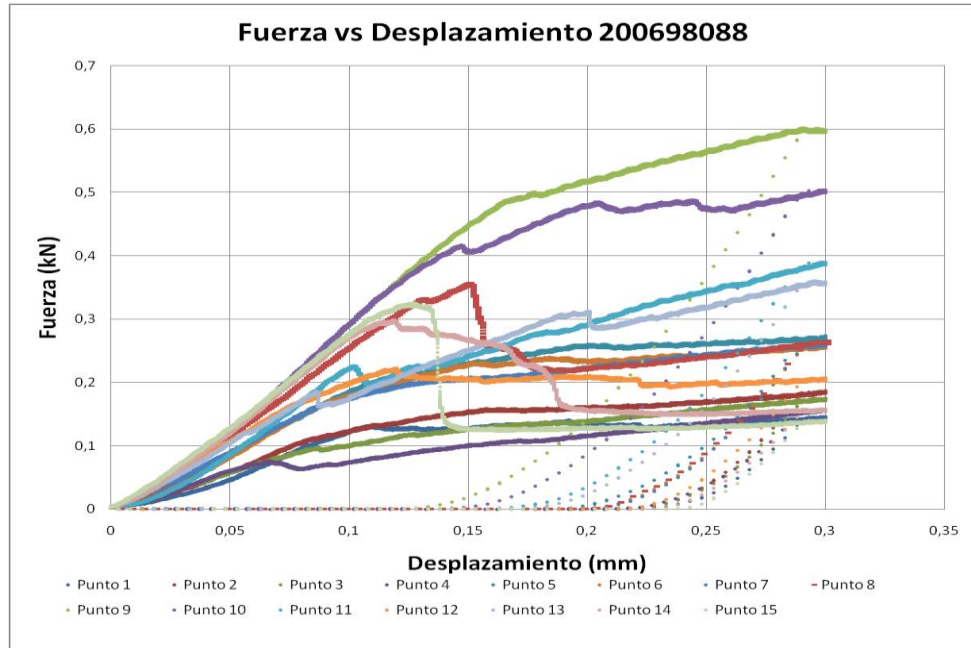
**[12]** Instituto Nacional de Vías, I.N.V. E – 154 – 07, Determinación de la Resistencia al Corte Método de Corte Directo (cd) (consolidado drenado).

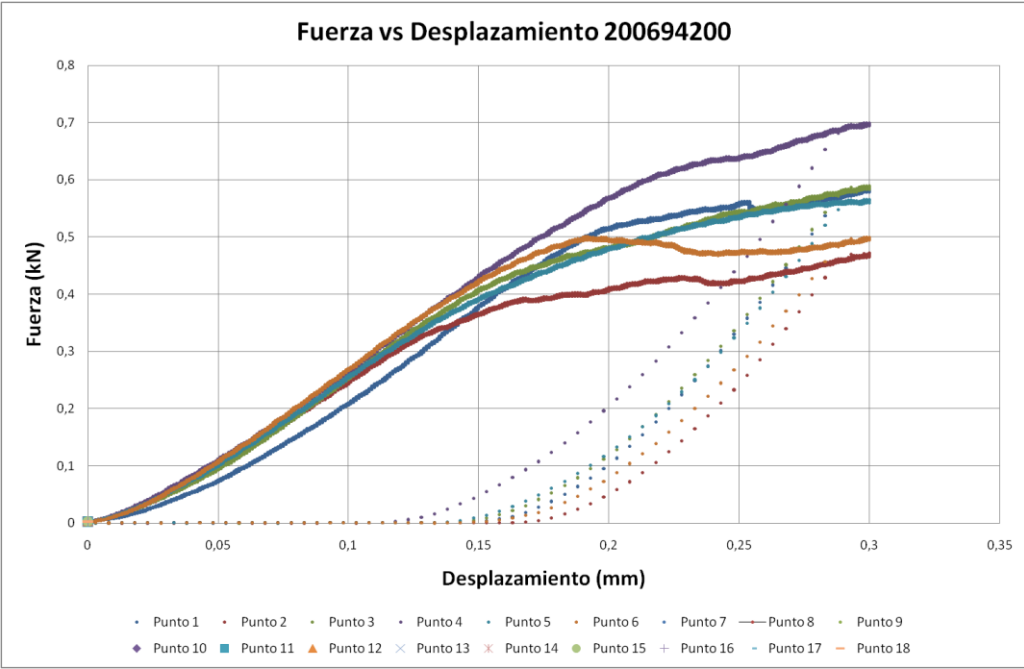
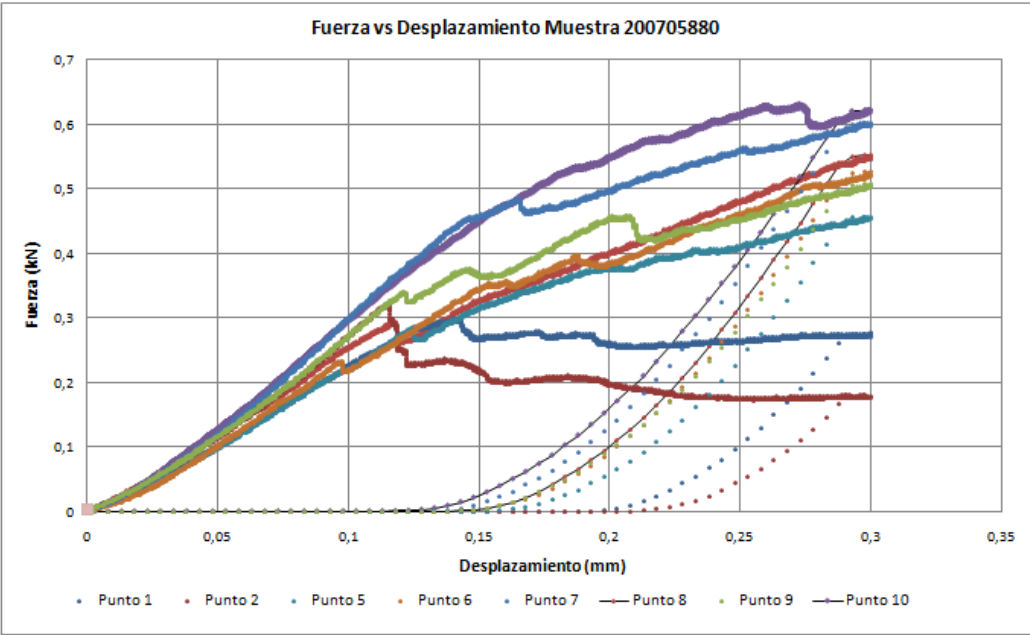
**[13]** Ringstad, C. (1996). Prediction of rock parameters from micro-indentation measurements: The effect of sample size. SPE/ISRM 47313. 487492, está indicado: de la pagina 487 a la 492.

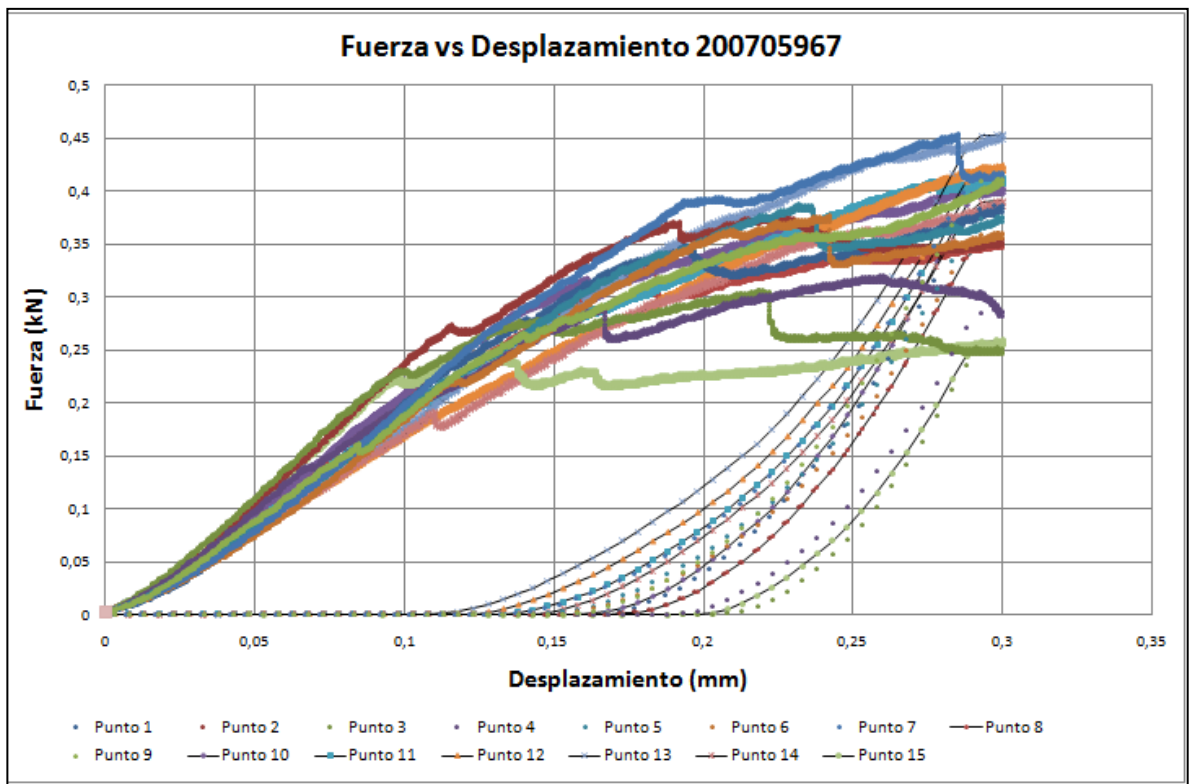
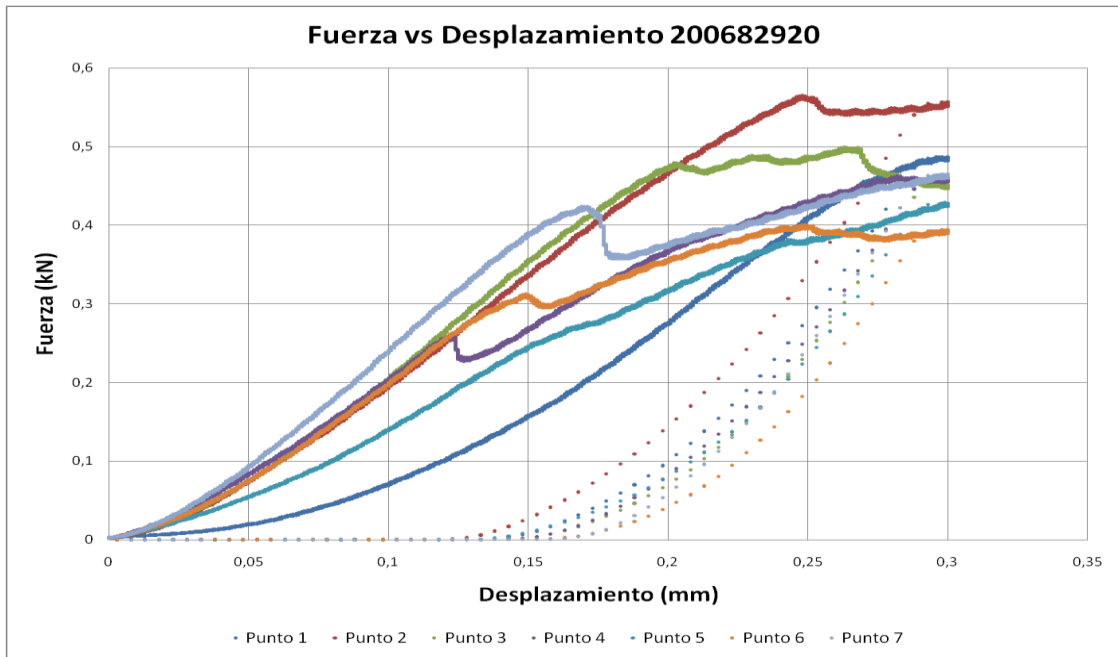
**[14]** Torres, M. (2006). Análisis del efecto de interacción entre el lodo de perforación y los shales, en las medidas del modulo de indentación IM y fuerza critica de transición CTF obtenidas de la prueba de indentación. Universidad Industrial de Santander.

## ANEXOS

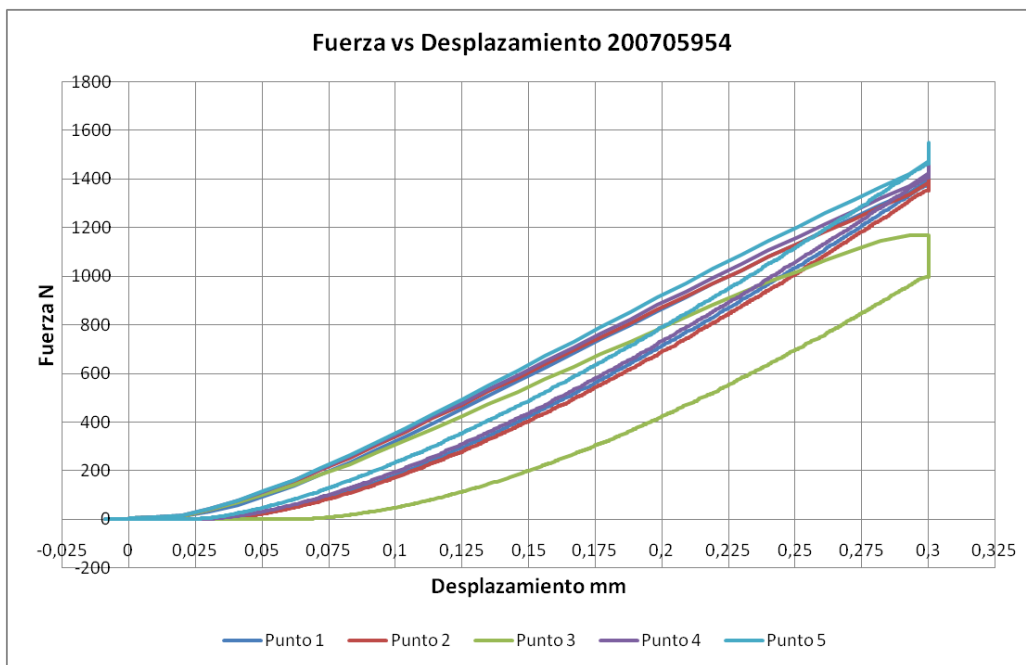
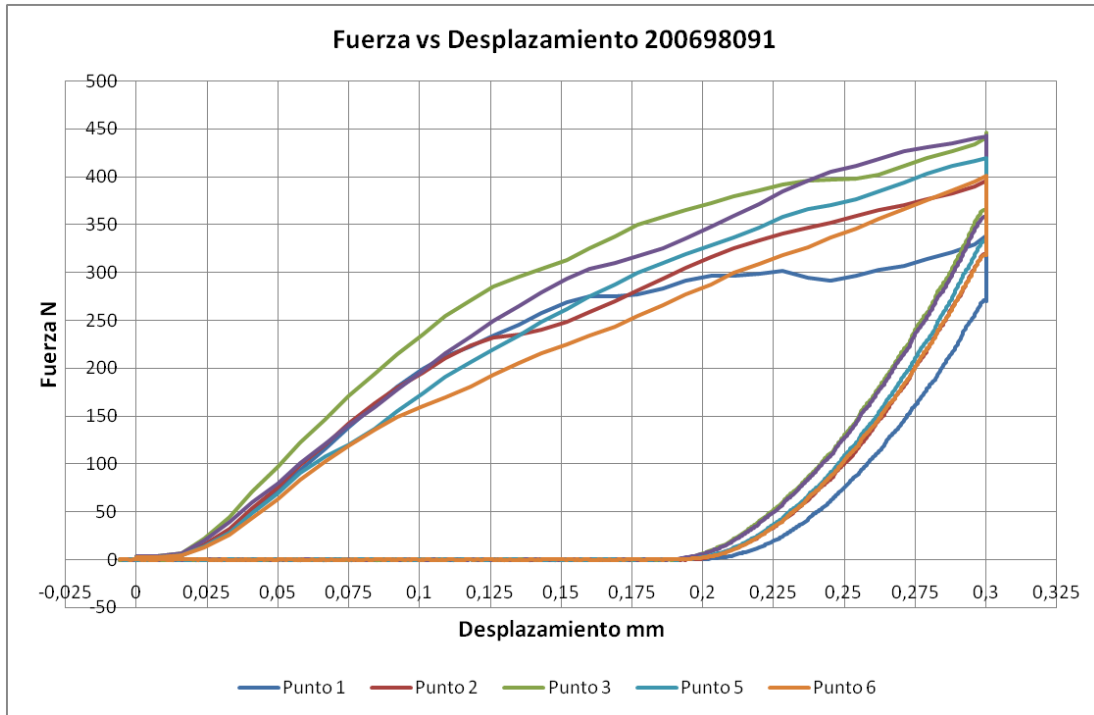
Anexo 1. Curvas representativas de carga versus desplazamiento para los resultados de las pruebas estándar de indentación realizadas sobre la formación la luna

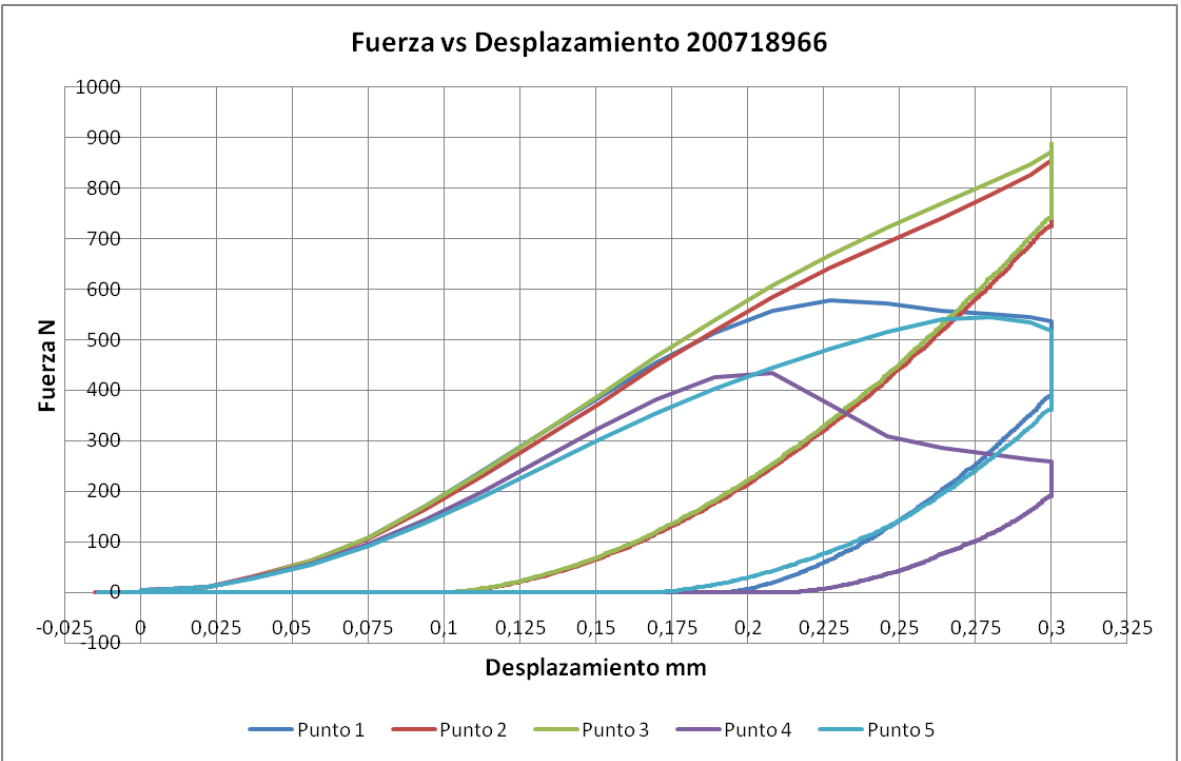
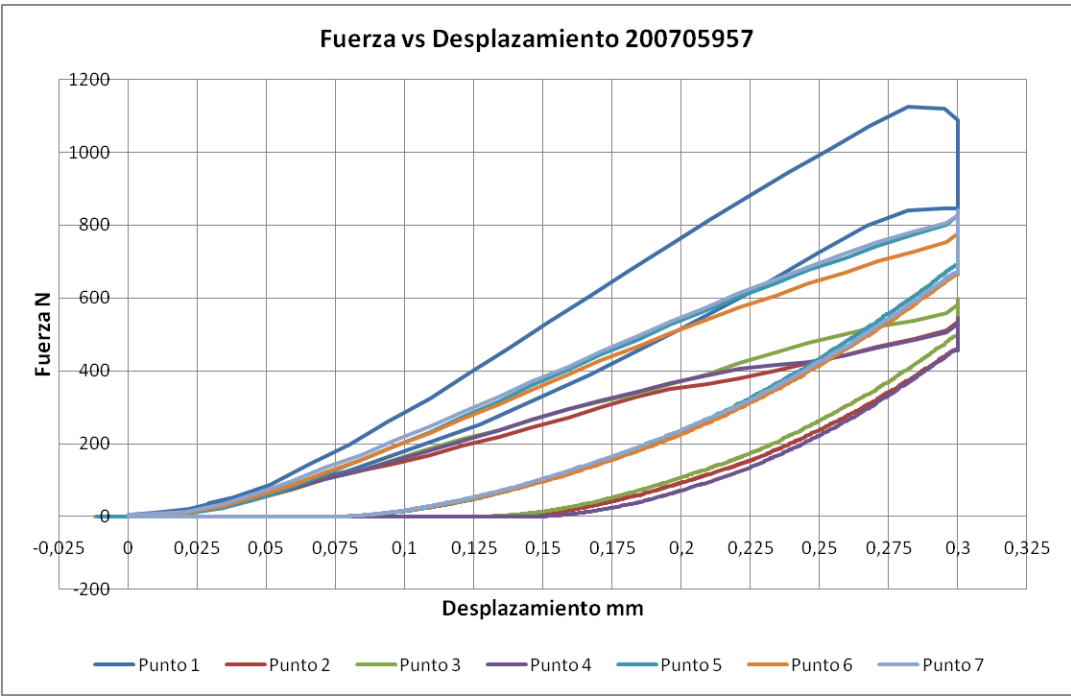




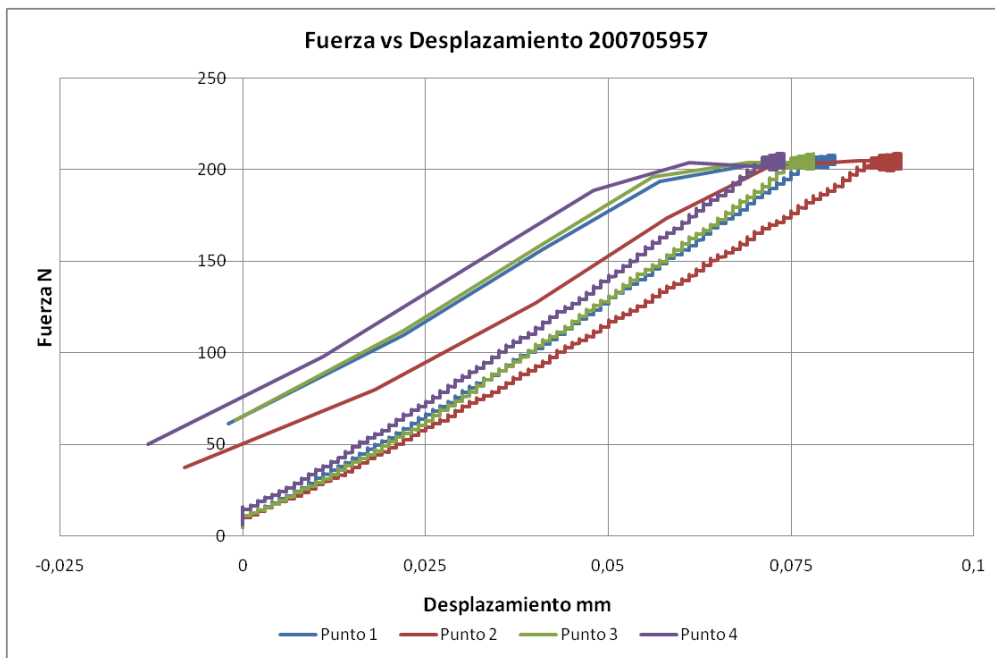
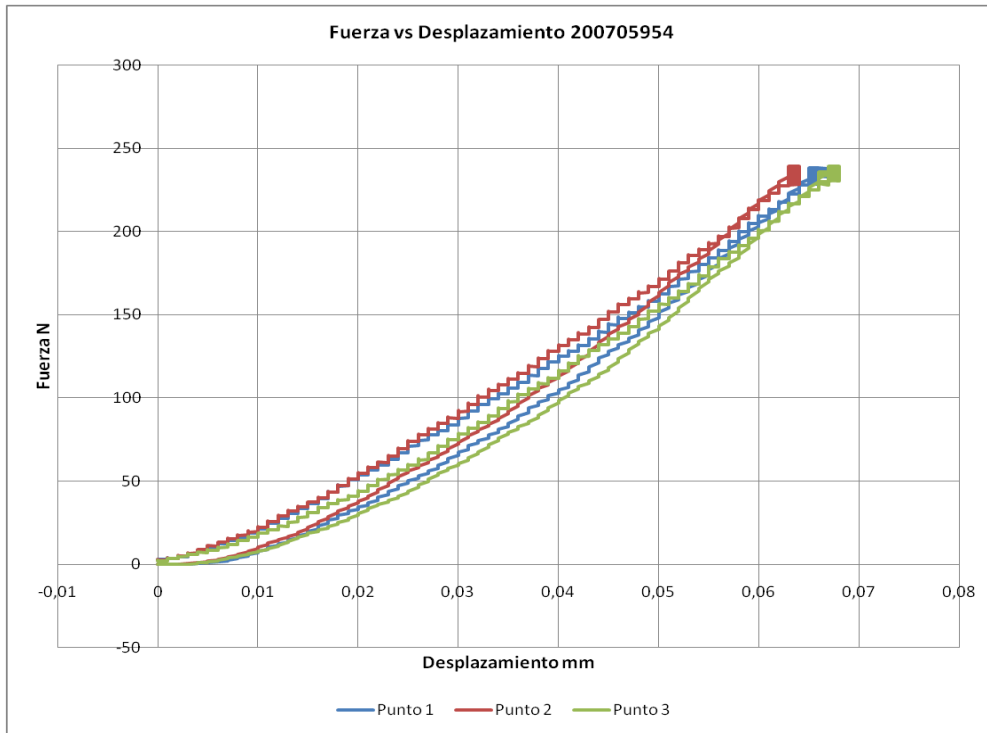


**Anexos 2.** Curvas representativas de carga versus desplazamiento para los resultados de las pruebas de indentación variando la velocidad de penetración realizadas sobre la formación la luna.

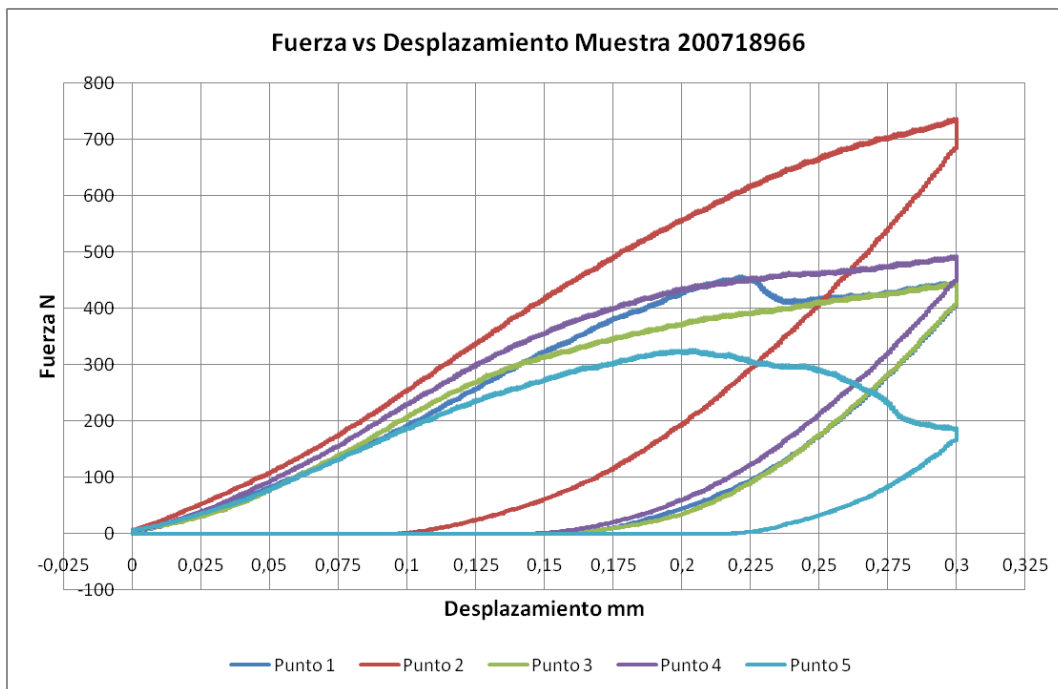
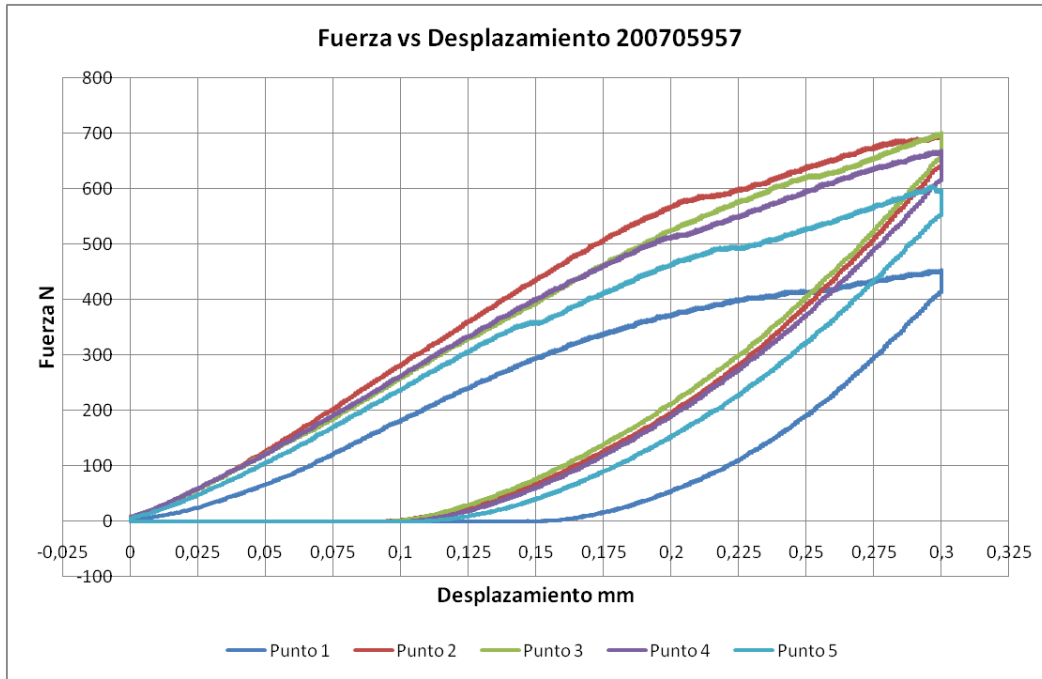


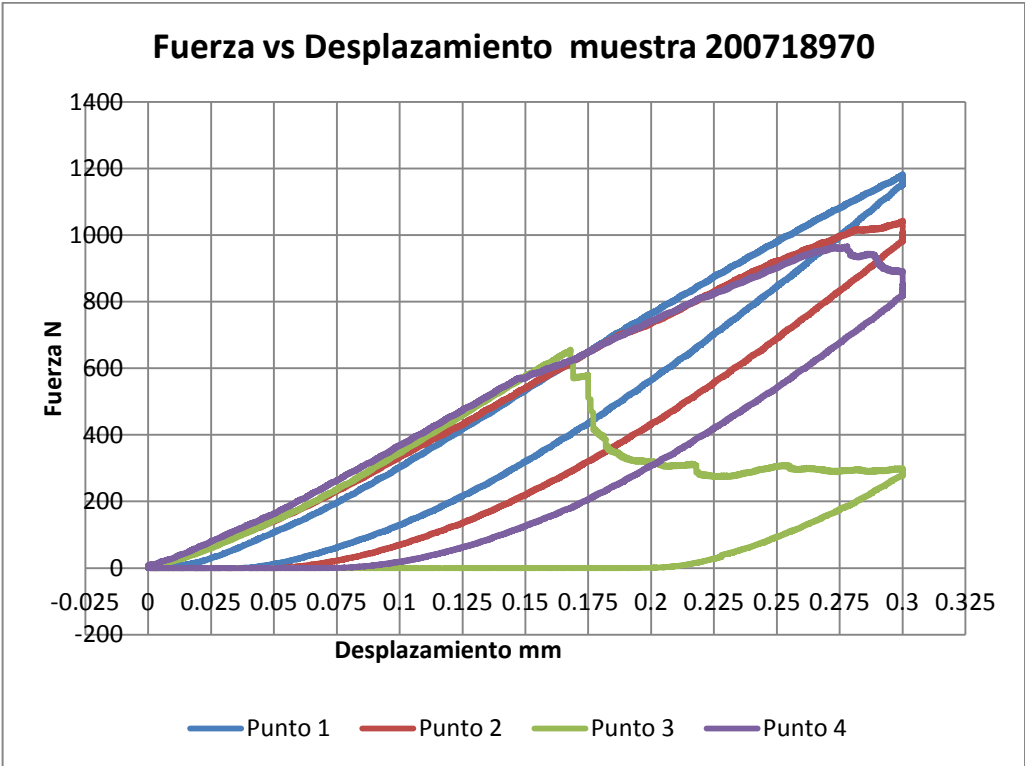
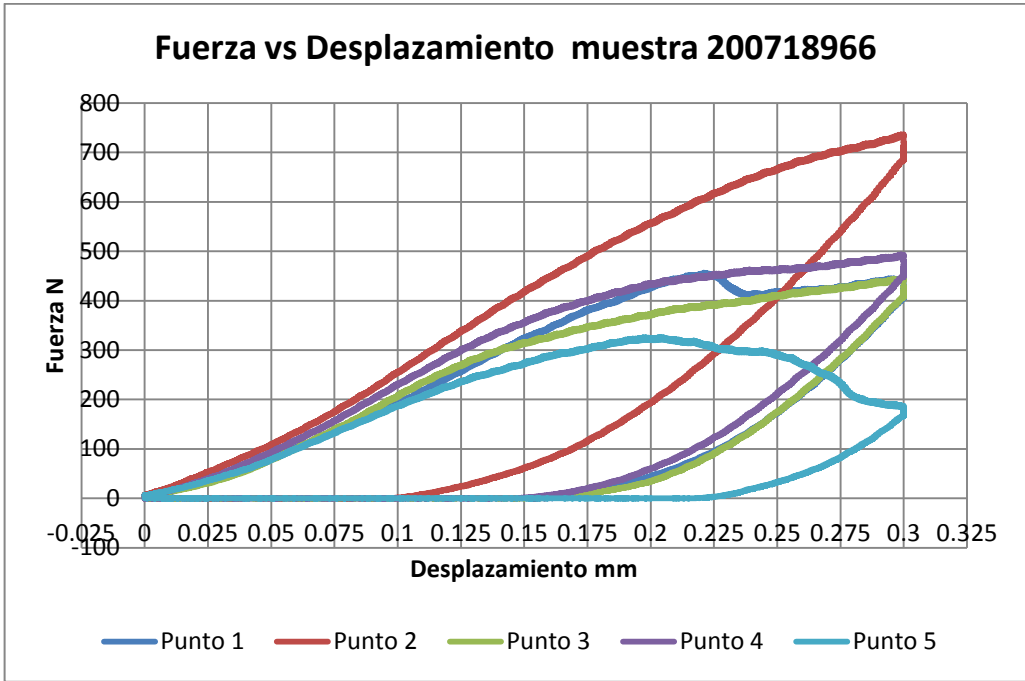


Anexo 3. Curvas representativas de carga versus desplazamiento para los resultados de las pruebas de indentación variando Fuerza de Penetración Máxima

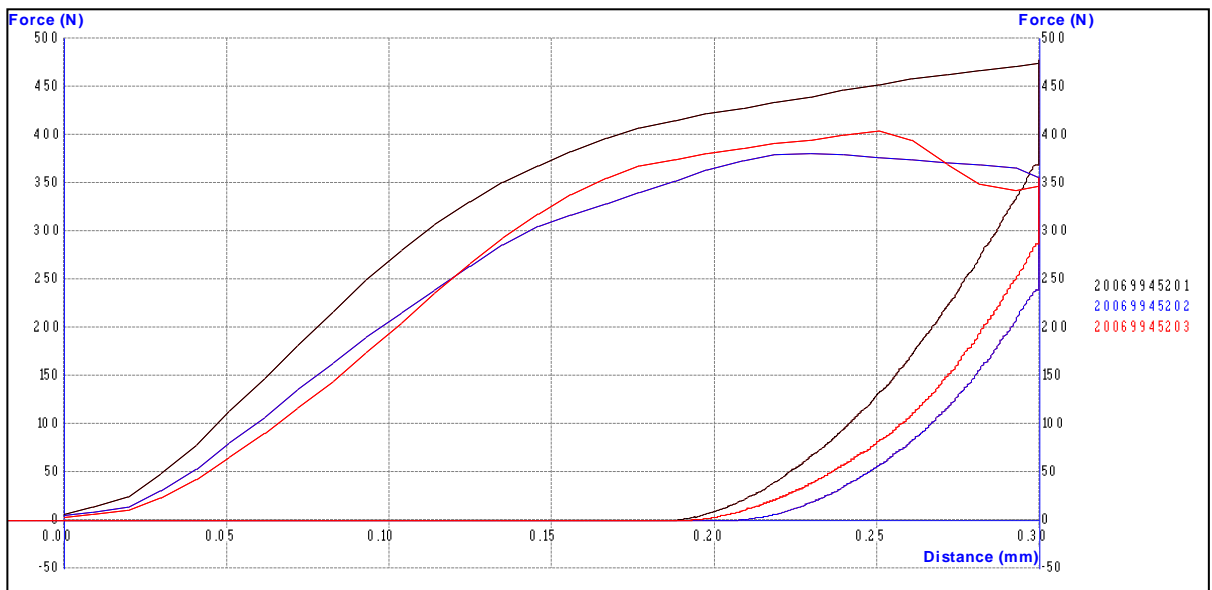
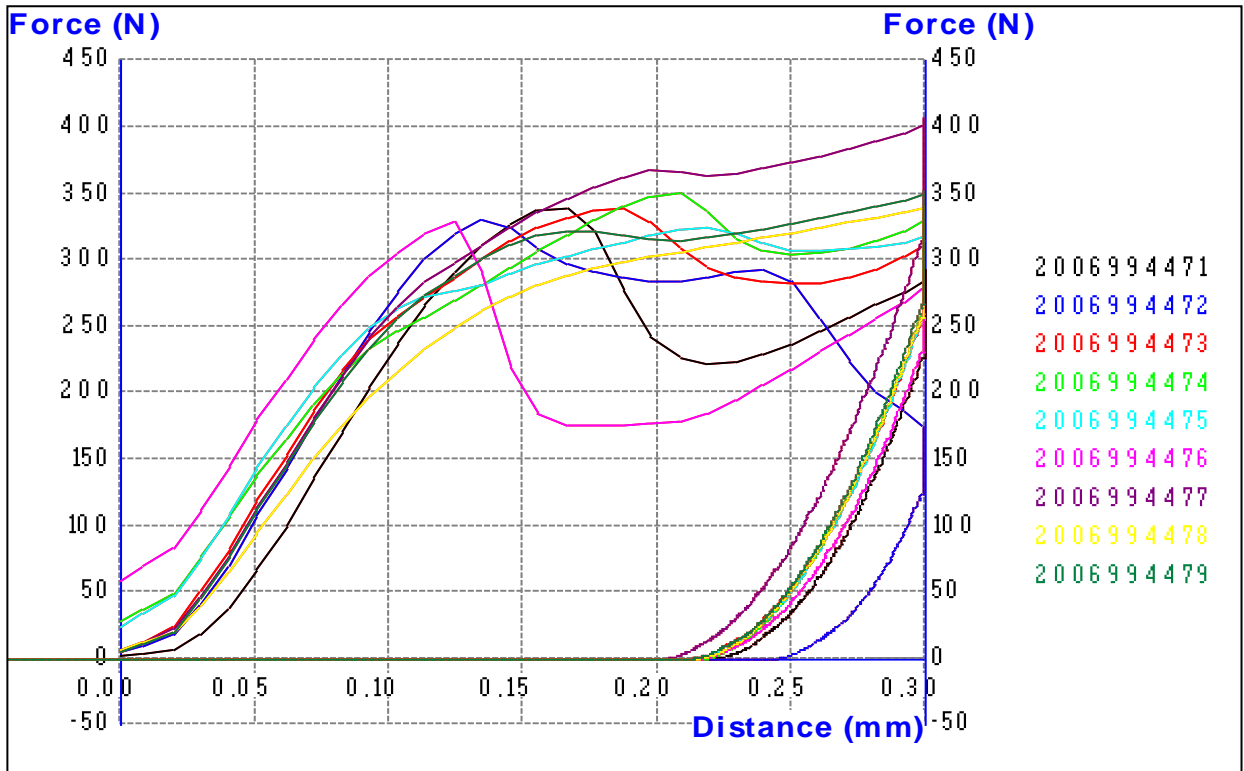


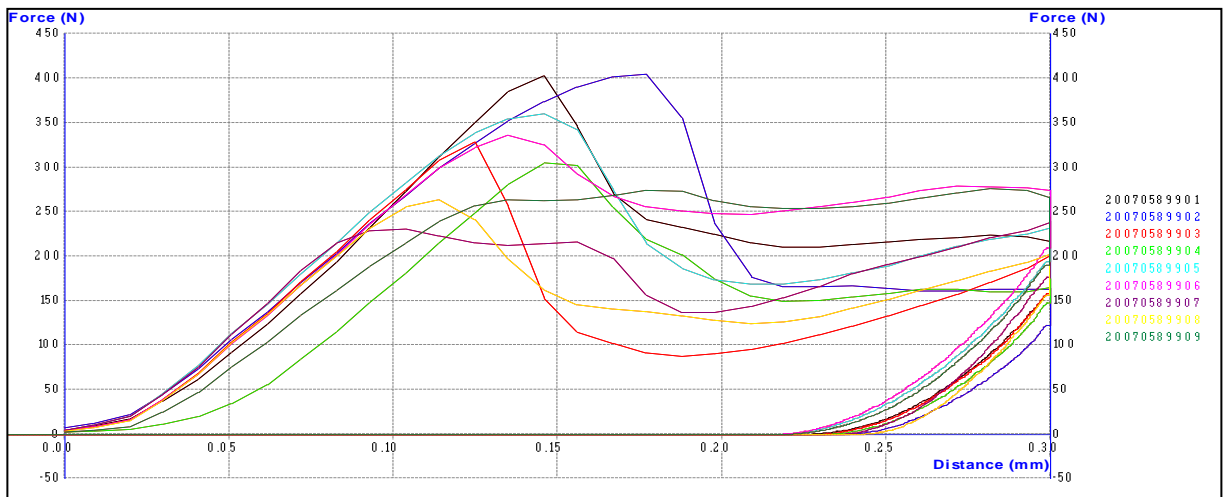
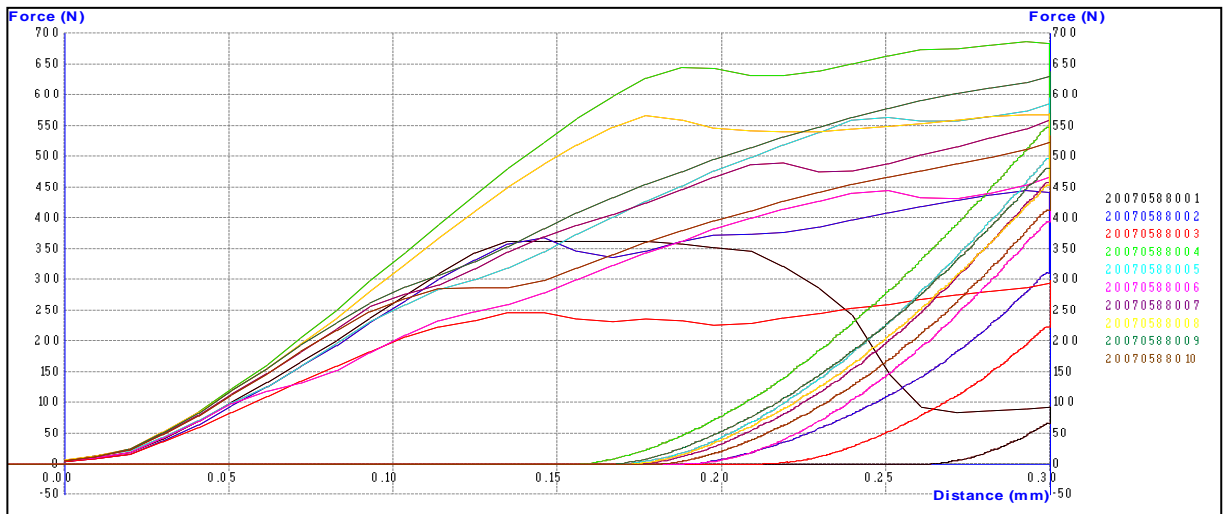
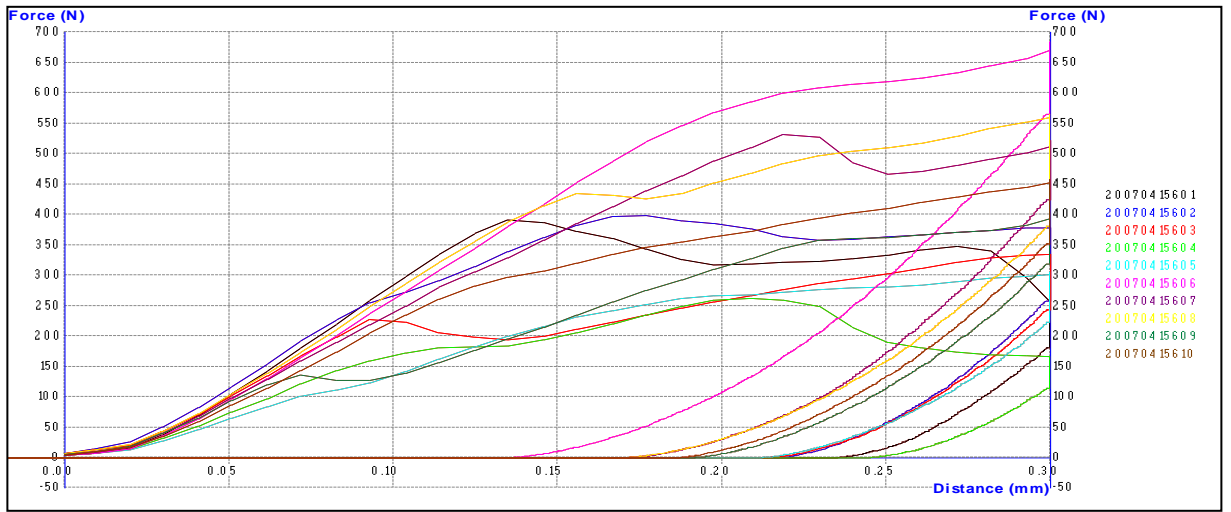
Anexo. 4. Curvas representativas de carga versus desplazamiento para los resultados de las pruebas de indentación variando la velocidad final o de descarga realizadas sobre la formación la luna

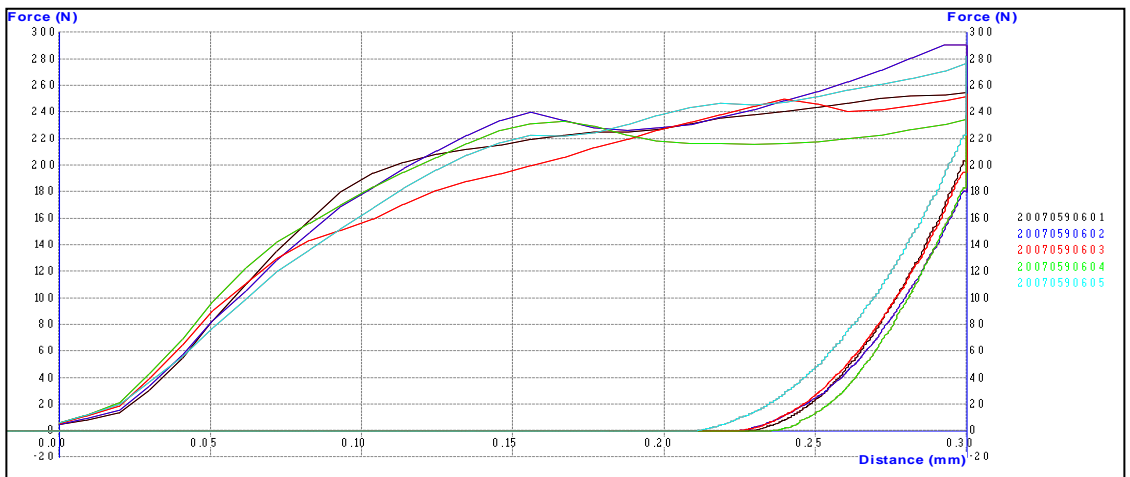
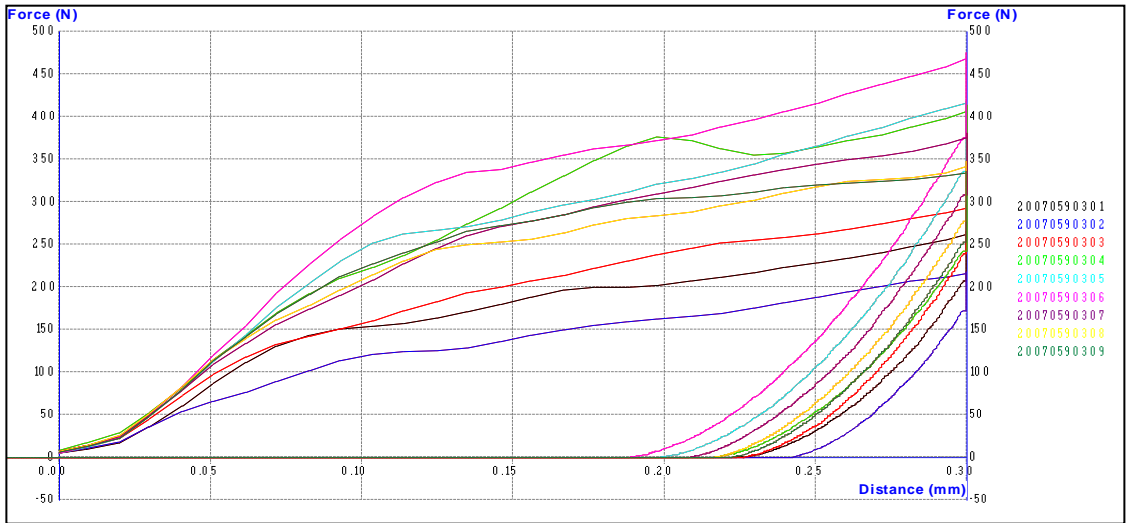
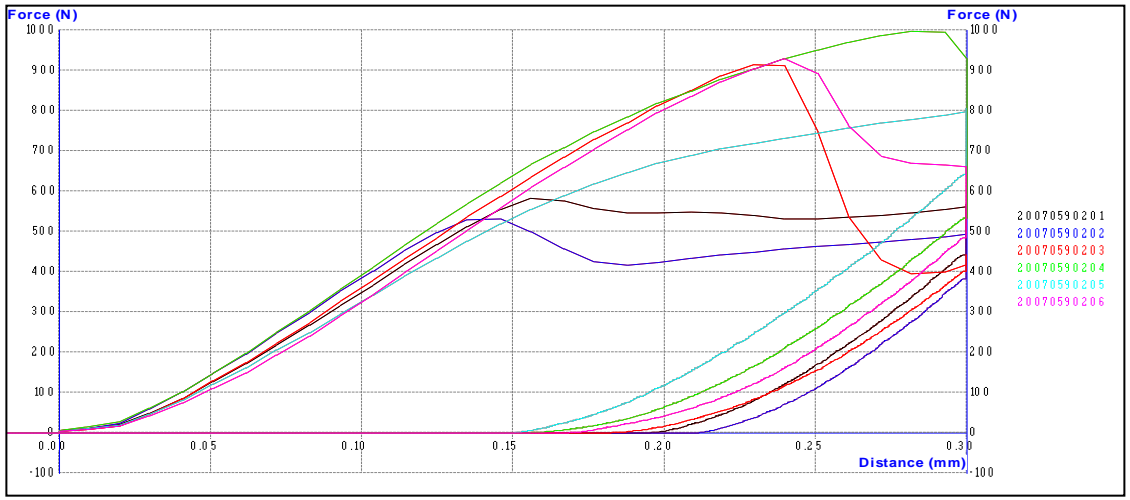




ANEXO.4. Algunas de las Curvas representativas de carga versus desplazamiento para los resultados de las pruebas de indentación pruebas finales y con las cuales se construyeron y evaluaron las correlaciones halladas.







Anexo. 5. Fotografías de las muestras usadas para el desarrollo de este proyecto.

