

**OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA COMPRESIVA UNIAxIAL (UCS) DE
LAS ROCAS A PARTIR DE MEDICIONES SOBRE RIPIOS DE
PERFORACIÓN**

JEFFERSON MATEUS TARAZONA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2005**

**OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA COMPRESIVA UNIAXIAL (UCS) DE
LAS ROCAS A PARTIR DE MEDICIONES SOBRE RIPIOS DE
PERFORACIÓN**

JEFFERSON MATEUS TARAZONA

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Civil

DIRECTORES

M. Sc. Guillermo Latorre
ICP

Ph. D. Gustavo Chio Cho
Docente UIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2004**

DEDICATORIA

A Dios por permitirme concluir con satisfacción esta etapa de mi vida.

A mi Madre por su apoyo incondicional. ***Mamá gracias a tu confianza mis hermanos y yo estamos logrando nuestras metas.***

A mi Padre por sus sabios consejos.

Juanita tu eres la razón de todo lo que estoy haciendo. ***Hija me permitiste conocer el amor puro***

A Yohana por sufrir y disfrutar con tanta alegría todos mis logros.

A mis hermanos: Jael, Mónica, Yesica, Especialmente a Darwin por brindarme la oportunidad de trabajar juntos.

JEFFERSON MATEUS TARAZONA

AGRADECIMIENTOS

El auto extiende sus agradecimientos a:

El grupo de investigación “Estabilidad de pozo” por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

Al Ing. Néstor Fernando Saavedra por su enorme colaboración y oportunos consejos.

A la Dra. Zully Calderón, Ing. Gustavo Chio, Ing. Rafael Gómez, Ing. Guillermo Latorre, Geol. Darwin Mateus, Ing. Jenny Carvajal, Ing. Rafael Santamaría
Por su gran colaboración.

Al equipo del Laboratorio de Resistencia de Materiales: Javier, Martín, Alexander por su colaboración en el desarrollo de las pruebas.

Al equipo de trabajo del Laboratorio de Mecánica de Rocas: Sergio, Karime por su colaboración en el desarrollo de las pruebas.

Muy especialmente al Instituto Colombiano del Petróleo, ICP, por facilitarme recursos e instalaciones para el desarrollo de esta investigación.

CONTENIDO

	PÁG.
1. PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ROCAS	18
1.1 METODOS DIRECTOS DE MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS.....	19
1.1.1 Prueba de Compresión Inconfinada.....	21
1.1.2 Prueba de falla triaxial.....	24
1.1.3 Envolvente de falla múltiple	27
1.2 METODOS INDIRECTOS DE MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS.....	28
1.2.1 Método Estándar de prueba para determinación del punto índice de resistencia de carga de las rocas.....	30
1.2.2 Método estándar de prueba para la resistencia tensil al rajado en especímenes de roca intacta	36
1.2.3 Determinación de la dureza de las rocas por el método de rebote de martillo	39
1.2.4 Otras Mediciones de dureza	40
2. EVALUACIÓN TECNICA DEL USO DE EQUIPOS DE DUREZA SUPERFICIAL PARA DETERMINAR UCS EN ROCAS	43
2.1 JUSTIFICACIÓN.....	43
2.2 PRUEBAS DE DUREZA SUPERFICIAL.....	47
2.2.1 Microdureza	49
□ Elaboración de probetas	52
□ El Microdurómetro.....	54
□ Los resultados.....	54

2.2.2 Pruebas de dureza Rockwell.	57
□ Ensayo de Dureza Rocwell en Shales.	57
□ Ensayo de Dureza Rockwell en areniscas	59
□ Ensayo de dureza Rocwell en rocas de diferente litología	60
3. MICROINDENTACIÓN.	64
3.1 ANTECEDENTES.....	64
□ Evaluación de formaciones a partir de registro de ripios.....	64
□ Medición de la resistencia de la roca sobre ripios de perforación como datos para optimizar el sistema de selección de la broca	66
□ Predicción de parámetros de la roca a partir de mediciones de Microindentación. El efecto del tamaño de la muestra	68
□ Análisis de estabilidad de pozo en tiempo real	70
3.3 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA.....	72
3.3.1 Esquema del equipo.	72
3.3.2 Representatividad de los ripios de perforación.	74
3.3.3 Probetas.....	74
3.3.4 Resultado de la prueba de Microindentación	75
3.4 PRUEBAS PRELIMINARES DE MICROINDENTACIÓN.....	77
3.4.1 Tipo de resina.	78
3.4.2 Montaje y comportamiento de las probetas.	79
3.4.3 Fabricación del indentador.....	82
3.4.4 Comportamiento Mecánico del indentador.....	84
3.4.5 El equipo de prueba.....	87
3.4.6 Parámetros de funcionamiento del equipo.....	89
3.4.7 Análisis de resultados	90

4. PRUEBAS DE COMPRESIÓN INCONFINADA Y DE MICROINDENTACIÓN SOBRE MUESTRAS DE LA FORMACIÓN TAMBOR.	96
4.1 GENERALIDADES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	98
4.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA (UCS).....	101
4.2.1 Diseño de la prueba.....	101
4.2.2 Descripción de las Muestras	101
□ 4.2.3 Preparación de las Muestras.....	102
4.2.4 Descripción del Equipo MTS 815 (Celda Triaxial).....	103
4.2.5 Procedimiento de la prueba de Compresión Inconfinada.	106
4.2.6 Resultados la prueba de Compresión Inconfinada	107
4.3 ENSAYO DE MICROINDENTACIÓN.	109
4.3.1 Diseño de la prueba.....	109
4.3.2 Resultados de las pruebas de Microindentación.....	110
CONCLUSIONES	120
RECOMENDACIONES	122
NOMENCLATURA UTILIZADA	123
REFERENCIAS	124
ANEXOS	126

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Fig. 1 Ejemplo de resultados experimentales de una prueba Triaxial	25
Fig. 2 Esquema del sistema de carga. Tomado de ASTM D 5731	32
Fig. 3 . Configuraciones requeridos de carga y forma de especimenes para. (a) Prueba diametral, (b) Prueba axial, (c) Prueba sobre bloque, (d) Prueba sobre pedazo irregu.....	33
Fig. 4 Carta de factor de corrección. Tomado de ASTM D 5731	34
Fig. 5 Correlación entre el Punto Índice de Carga Is y Resistencia Compresiva Uniaxial UCS. Tomado de ASTM D-5731	35
Fig. 6 Equipo de prueba propuesto para la resistencia tensil de rajado	38
Tomado de ASTM D 3967	38
Fig. 7 Efectos promedio modelo Geomecánico Estadístico 1 Tomado de seminario en Estabilidad de Pozo. Gildardo Osorio. ICP 2004.....	45
Fig. 8 Efectos promedio modelo Geomecánico Estadístico 2. Tomado de seminario en Estabilidad de Pozo. Gildardo Osorio. ICP 2004.....	46
Fig. 9 Geometría del indentador. Microdureza Vickers	50
Fig.10 Muestra típica de ripios de perforación.....	51
Fig.11 Montadora de probetas en Bakelita	52
Fig. 12 Desbastadora	53
Fig.13 Probeta con fragmentos de roca	53
Fig. 14 Microdurómetro SHIMADZU HMV 2000.....	54
Fig. 15 Fotografía hecha con 1890 aumentos donde se muestra una zona de falla que circunda toda la marca. También se aprecia la impresión de las aristas que indentador hace sobre la superficie del Shale.....	55
Fig. 16.1 Durómetro.....	58
Fig. 16 Muestra de Shale destruida por el indentador de 1/16" En la prueba de Dureza Rockwell 15T con 15 Kg. de carga.....	59
Fig. 17 Varias litologías probadas en dureza.....	61
Fig. 18. Resultados dureza Rockwell para diferentes litologías	62
Fig. 19. Resultados dureza Rockwell para diferentes litologías	62
Fig. 20. Valores de resistencia limite para diferentes litologías.....	63
Fig. 20 Resistencia Compresiva Uniaxial vs. Modulo de Indentación. Tomado de Spe 36851.....	65
Figura 22 Esquema de selección de broca, tradicional y modificado.....	67
Fig. 23 Resistencia Compresiva Uniaxial vs. Modulo de indentaciónTomado de Spe 56441	68
Fig. 24 Resistencia uniaxial compresiva Vs Fuerza Critica de Transición medidas durante la Microindentacion en fragmentos. Tomado de Spe 47313	69
Fig. 25 Resistencia uniaxial compresiva vs. Modulo de indentación medidos durante la microindentación para fragmentos. Tomado de Spe 47313.....	69

Fig. 26 Resistencia Compresiva Uniaxial vs. Numero de indentación.....	71
Tomado de Spe 36713.....	71
Fig. 27 Esquema general de un indentador	73
Figura 28. Esquema grafica de Microindentación	73
Fig. 29 Probeta con fragmentos.....	75
Fig. 30 Curva Obtenida en la prueba de microindentación.....	76
Fig. 31 Montadora de probetas en Bakelita	78
Fig. 32 Moldes y probetas	79
Fig. 33 Cámara de extracción de vapores.....	80
Fig. 34 Maquina desbastadora	80
Fig. 34a Probetas fracturadas.....	82
Fig. 35 Pieza de acero inoxidable	83
Fig. 36 Torno (Mantenimiento ICP).....	83
Fig. 37 Indentador. Dimensiones en la punta. 1mm de diámetro y 3mm de longitud	84
Fig. 38 Indentador pandeado.....	84
Fig. 39 Gasto del indentador de 1mm de diámetro y 1mm de altura en punta. a) Sin tratamiento térmico, b) Con tratamiento térmico	85
Fig. 40 Maquina de prueba de Materiales MTS-810. utilizado para hacer las pruebas de Microindentación	87
Fig. 41 Indentación prueba 1 Muestra de la formación Rosa Blanca	88
Fig. 42 Indentación prueba 2 Muestra de la formación Rosa Blanca	88
Fig. 43 Indentación prueba 3 Muestra de la formación Rosa Blanca	88
Figura 44 grafica de Microindentación para muestra de roca de la formación Rosablanca	91
Fig. 45 Familia de curvas de Microindentación para la muestra MA1	91
Fig. 46 Familia de curvas de Microindentación para la muestra BA1.....	92
Fig. 47 Familia de curvas de Microindentación para la muestra S7-22A.....	92
Fig. 48 Familia de curvas de Microindentación para la muestra S7-36A.....	92
Fig. 49 Resistencia Compresiva Uniaxial Vs Fuerza Critica de Transición	94
Fig. 50 Resistencia Compresiva Uniaxial Vs Modulo de Microindentación	94
Fig 51 Especimenes de la formación Tambor	98
Figura 53. Grupo de plugs extraídos.....	102
Figura 58. Especimenes después de la prueba de Compresión Inconfinada	107
Figura 59. Especimenes después de la prueba de Compresión Inconfinada	108
Figura 60. Porosidad Vs UCS para los especimenes de la formación Tambor ensayados	108
Figura 61. Fragmentos de roca de la formación tambor montados en la resina de encapsulamiento.....	110
Figura 62. Huella hecha por el indentador en la roca. Diámetro 1mm.....	111
Fig. 63 Comparación entre IM y UCS formación Tambor.....	117
Fig. 64 Comparación entre IM y UCS formación Tambor, Barco y Mirador	118
Fig. 65 Comparación entre CTF y UCS formación Tambor.....	118
Fig. 66 Comparación entre CTF y UCS formación Tambor, Barco y Mirador	119

LISTA DE TABLAS

PAG

Tabla 1 . Valores de C en general.....	36
Tabla 2 Efectos promedio modelo Geomecánico Estadístico 1. Tomado de seminario en Estabilidad de Pozo. Gildardo Osorio. ICP 2004.....	45
Tabla 3 Efectos promedio modelo Geomecánico Estadístico 2. Tomado de seminario en Estabilidad de Pozo. Gildardo Osorio. ICP 2004.....	45
Tabla 4 Resultados Microdureza Vickers.....	55
Tabla 5 Resultados Microdureza Vickers.....	56
Tabla 6 Resultados Microdureza Vickers.....	56
Tabla 7 Resultados Dureza Rockwell 15T en Arenisca Tambor.....	59
Tabla 8 Resultados Dureza Rockwell varias litologías.....	61
Tabla 9 Resultados Análisis Metalográfico.....	86
Tabla 10 Resultados parciales de Microindentación.....	93
Tabla 11 Resultados preliminares de Microindentación. Detalles de procedencia.....	93
Tabla 12 Dimensiones y porosidad de las muestras ensayadas.....	102
Tabla 13. Características Marco de Carga Modelo 815.....	104
Tabla 14 Resultados de la prueba de Compresión Inconfinada.....	107
Tabla 15. Numero de pruebas de compresión n recalculado.....	109
Tabla 16. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 30.....	111
Tabla 17 Estadísticos Muestra Tambor 30.....	112
Tabla 18. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 28.....	112
Tabla 19 Estadísticos Muestra Tambor 28.....	112
Tabla 20. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 26.....	113
Tabla 21 Estadísticos Muestra Tambor 26.....	113
Tabla 22. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 23.....	113
Tabla 23 Estadísticos Muestra Tambor 23.....	114
Tabla 24. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 22.....	114
Tabla 25 Estadísticos Muestra Tambor 22.....	114
Tabla 26. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 17.....	114
Tabla 27 Estadísticos Muestra Tambor 17.....	115
Tabla 28. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 16.....	115
Tabla 29 Estadísticos Muestra Tambor 16.....	115
Tabla 30 Estadísticos Muestra Tambor 16.....	116

**TITULO: OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA COMPRESIVA UNIAXIAL
(UCS) DE LAS ROCAS A PARTIR DE MEDICIONES SOBRE
RIPIOS DE PERFORACIÓN***

AUTOR: JEFFERSON MATEUS TARAZONA**

Palabras claves: Resistencia de la roca, Microindentación, Indentación, Ripios de perforación, Correlación, Resistencia Compresiva Uniaxial, Medición indirecta del UCS, Parámetros mecánicos de las rocas, Compresión Inconfinada,

RESUMEN

Parámetros mecánicos de las rocas como la resistencia son requeridos en análisis de estabilidad de pozo, convencionalmente estos valores se obtienen con pruebas de laboratorio hechas en corazones. La obtención de corazones tiene grandes problemas asociados como consumo de tiempo, alto costo, por lo general están limitados a reservorios y las mediciones de resistencia casi nunca se hacen en tiempo real. En la búsqueda de una alternativa que permita la medición de la resistencia de la roca de manera indirecta se plantea el uso de la Microindentación.

El objetivo principal de este trabajo es validar la Microindentación como una técnica que permita obtener valores de Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) a partir de mediciones en cortes de perforación y por medio del planteamiento de correlaciones. Los cortes son un material disponible durante toda la perforación, y estos pueden suministrar información nunca antes considerada pues como se mencionó anteriormente tradicionalmente el UCS se ha obtenido a partir de pruebas en corazones o en su defecto de aproximaciones teóricas o empíricas. La validación de la técnica implica comparar parámetros de Microindentación y valores de resistencia de las rocas para construir gráficas de correlación

Con el objetivo de determinar la viabilidad del uso de la técnica se hicieron pruebas de Compresión Inconfinada para encontrar valores de resistencia en probetas estándar, junto con ensayos de Microindentación sobre muestras tomadas de la formación Tambor para observar la correspondencia de las dos pruebas y de esta manera dar los primeros pasos hacia el planteamiento de una correlación entre las pruebas mencionadas.

Los valores de los parámetros de Microindentación son el promedio del total de las pruebas realizadas sobre las diferentes muestras. Al comparar los resultados obtenidos para el Módulo de Microindentación IM con el UCS se observa una buena correspondencia entre los resultados de los dos ensayos.

*TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

** FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS; ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

TITLE: ROCKS UNIAXIAL COMPRESIVE STRENGHT (UCS) FROM MEASUREMENTS ON DRILL CUTTINGS *

AUTHOR: JEFFERSON MATEUS TARAZONA**

Keywords: Rock Strength, Microindentation, Indentation, Drill Cuttings, Correlation, Uniaxial Compressive Strength, UCS indirect Measure, Mechanical Rocks parameters, Unconfined Compression.

ABSTRACT

Rock Mechanical parameters such as strength are required in wellbore stability analysis, traditionally these values are established from core laboratory tests.

Getting core samples have associated problems as time demanding, high spends, generally limited to reservoirs, and strength measurements are rarely made in real time. Looking for an alternative that allows rock strength measurements in a direct way Microindentation is proposed.

The main objective of this work is to validate Microindentation as a technique that allows to get values of Uniaxial Compressive Strength (UCS) from measurements on drilling cuttings and by correlations. Drilling cuttings are materials easy to get during all the drilling process that provide information never considered before since, as mentioned above, traditionally the UCS values have been gotten from core tests or by theoretical or empirical approaches. The validation of this technique implies to compare Microindentation parameters and rock strength values in plotting correlation curves.

With the purpose of determining viability of this technique several Unconfined Compression Tests were made in order to find rock strength values by means of standard probes, at same time with Microindentation tests on samples from the formation Tambor to observe the correspondence between the two tests and by this way give the first steps to planning a correlation between the mentioned tests

The values of the Microindentation parameters are the average of the total of all the tests made on several simples. When comparing results gotten for the Microindentation modulus IM with the UCS it is observed a good correspondence between results from the two tests.

*WORK RESEARCH.

** FACULTY OF PHYSIC-MECHANICAL ENGINEERING; CIVIL ENGINEERING SCHOOL

INTRODUCCIÓN

Los problemas de estabilidad de pozo se relacionan con la respuesta mecánica que tienen las formaciones ante la nueva condición de esfuerzos provocada por la perforación de un hueco en estas, y esa respuesta depende de las características mecánicas de las rocas perforadas, es así como surge la necesidad conocer parámetros tan importantes como su resistencia.

Los ripsos de perforación son una fuente potencial de información a cerca del comportamiento mecánico de las rocas que nunca antes se ha tenido en cuenta, pues la resistencia de las rocas tradicionalmente se ha obtenido de aproximaciones teóricas o empíricas.

La implementación de la microindentación para caracterizar la resistencia de las formaciones perforadas representa un gran adelanto de carácter técnico y económico en las tareas de perforación.

Contribución Técnica

1. Posibilidad de caracterizar la resistencia de las formaciones en tiempo real.

2. No es necesario disponer de corazones para obtener valores de Resistencia

Compresiva Uniaxial, disminuyendo así el impacto en la perforación

3. Las mediciones, así como la interpretación de resultados puede hacerla un operario con un entrenamiento básico.

Contribución Económica

1. Los valores de resistencia de las rocas obtenidos con la prueba de Microindentación pueden ser utilizados para ayudar a hacer análisis de estabilidad de pozo en tiempo real, de esta manera es posible tomar decisiones durante la perforación, y si es el caso evitar algún fenómeno de inestabilidad basada en la información acerca del comportamiento mecánico obtenido de las mediciones de Microindentación.
2. La prueba de Microindentación puede hacerse con un equipo compacto y portátil comparado con los equipos utilizados convencionalmente como la cámara triaxial la Máquina de compresión universal.
3. Se eliminan los costos por corazonamiento para caracterización mecánica, así como el alto impacto en las tareas de perforación

Los parámetros mecánicos de las rocas de formaciones subterráneas son requeridos en áreas como compactación, fracturamiento hidráulico, estabilidad de pozo y arenamiento estos parámetro son principalmente obtenidos de medidas en corazones y a partir de registros los cuales solo permiten una caracterización del pozo después de que este ha sido perforado, no obstante en muchas operaciones seria preferible una caracterización durante la perforación. Por consiguiente esto ha tenido un interés creciente en la industria petrolera donde se busca desarrollar y mejorar nuevas técnicas de medición en tiempo real para caracterizar las rocas¹⁰ Es de conocimiento general que los problemas de estabilidad de pozo son fuente de costos adicionales. De acuerdo con datos publicados estos pueden llegar a ser un 15% del presupuesto total¹⁰. Por lo tanto El desarrollo de metodologías eficientes para obtener parámetros mecánicos y

Petrofísicos de las rocas que sirvan como datos de entrada en los análisis de estabilidad será de gran ayuda para resolver estos problemas.

La necesidad de implementar la Microindentación para obtener información del comportamiento mecánico de las rocas surge después de investigar en metodologías no convencionales de prueba de materiales. Es así como en una primera etapa se trabaja en la deducción de una correlación que involucrara mediciones de dureza superficial y resistencia compresiva uniaxial (UCS). Sin embargo varios fueron los problemas que obligaron a abandonar esta idea dentro de los que se cuentan la incompatibilidad entre el funcionamiento de los equipos utilizados y la naturaleza de las rocas entre otras que se tratarán mas adelante. Después de esto se concluye que la microindentación es una alternativa que se acerca mucho más al problema de registrar la respuesta real de las rocas ante la aplicación de cargas.

La necesidad de visualizar claramente la manera como se comporta mecánicamente un cuerpo obliga a llevar a cabo pruebas donde se monitorea constantemente variables de entrada como carga y de respuesta del material ensayado tales como deformaciones. Algunas de las pruebas son: de compresión uniaxial o inconfiada, tensión, compresión confinada para simular condiciones in-situ y otras, en donde con la ayuda de dispositivos especiales es posible registrar carga aplicada y deformaciones pero éstas últimas partiendo siempre de un conocimiento absoluto de la forma, geometría y dimensiones de la probeta a ensayar, que es justamente el problema mas importante en perforación, ya que esto requiere de muestras provenientes de corazones y que hasta el momento representa el mayor inconveniente en la caracterización mecánica de las formaciones. Una consecuencia clara de la implementación de la técnica será un ahorro substancial en dinero, pero sobre todo en tiempo, ya que las pruebas de Microindentación podrán hacerse durante la perforación suministrando

parámetros mecánicos de las rocas como datos de entrada en los análisis de estabilidad de pozo en tiempo real.

1. PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ROCAS .

La mecánica de materiales es una rama de la ingeniería que trata con los esfuerzos y las propiedades de los materiales. En el siglo pasado los ingenieros estructurales desarrollaron excelentes técnicas para determinar los esfuerzos en el acero y el concreto permitiendo la construcción de magnificas estructuras como la torre Eiffel (acero), Boulder Dam (concreto) o la torre Sears (concreto y acero). Los materiales desarrollados por el hombre como el acero y el concreto son homogéneos (igual composición) e isotrópicos (iguales propiedades en todas las direcciones), por lo tanto su análisis es relativamente fácil en comparación con los materiales naturales como los suelos o las rocas. En muchos de los métodos analíticos usados en mecánica de rocas se asume isotropía y homogeneidad.

Debido a la necesidad que tiene el hombre por conocer el comportamiento mecánico de las rocas para perforar, cimentar fundaciones, excavar túneles y minas hay un gran interés por investigar en mecánica de rocas

A pesar de que las rocas han sido utilizadas por miles de años como material de construcción, solo un par de décadas atrás es que los valores cuantitativos de sus propiedades han sido introducidos para modelos matemáticos. Muchas de las técnicas han sido tomadas de la mecánica de suelos que se basa en la ley de Coulomb, la cual relaciona la resistencia de cizalladura con un factor de fricción y el esfuerzo normal. Por supuesto que una teoría de mecánica de rocas que considera la roca como un cuerpo homogéneo, sin juntas, fallas o propiedades direccionales iguales para grandes masas de roca es solo una aproximación.

En las pruebas usadas en Ingeniería Civil, materiales uniformes como el concreto o el acero pueden ser probados con diferentes técnicas para conocer su comportamiento mecánico. Por el contrario la mayoría de las rocas son anisotrópicas, sin embargo esto podría influir poco si se tiene en cuenta que muchas pruebas de mecánica de rocas se hacen utilizando muestras del orden de 5 por 15 cm, o de 2.5 por 5 cm mientras que en profundidad puede existir discontinuidades de hasta 1m, sin embargo es necesario entender que las pruebas de laboratorio representan un buen respaldo para las propiedades ingenieriles de las rocas y las formulas que las involucran⁵.

1.1 METODOS DIRECTOS DE MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS.

El uso efectivo de las propiedades mecánicas de las rocas a nivel ingenieril requiere de mediciones in-situ y de laboratorio muy cuidadosas, que después serán evaluadas por una variedad de observaciones geológicas que describen las condiciones de la masa de roca. Por lo anterior han sido desarrolladas prácticas estándar de laboratorio para especificar los métodos por medio de los cuáles deben desarrollarse. Las organizaciones más importantes encargadas de hacer la estandarización de las pruebas son la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, Lisboa, Portugal) y la sociedad Americana para pruebas y materiales (ASTM, Philadelphia).

En la industria petrolera, aparte de las pruebas de laboratorio, los datos instantáneos durante la perforación tales como tasa de penetración, presión en punta, color del fluido o perdida del mismo se hace permanentemente para ayudar en la evaluación de los núcleos y los datos de laboratorio⁷. Lo último incluye la recuperación y descripción física de las condiciones del corazón así como la clasificación y las formas estructurales inherentes. La

evaluación microscópica de las rocas para usos ingenieriles es una práctica muy común. Un análisis petrográfico puede clasificar la roca litológicamente con esto el ingeniero puede aplicar conocimiento obtenido con experiencia previa⁷

La evaluación del comportamiento mecánico in-situ de las rocas requiere datos importantes tales como: cuál es el estado de esfuerzos incluyendo la presión de poro, como son los módulos elásticos y los parámetros de resistencia. Además, más allá de esto debemos predecir la fluencia u otros tipos de comportamiento inelástico que tenga lugar.

La principal fuente de datos para resolver los anteriores interrogantes es el material corazonado y los datos registrados en campo (registros de pozo / MWD, Sísmica, VSP y varias pruebas de pozo) Los registros suministran información continuamente contra profundidad, pero no miden directamente los parámetros que se requieren para hacer a la roca un análisis mecánico. Por ejemplo, la resistencia de la roca no puede ser medida a partir de registros. No obstante si se aplica un procedimiento adecuado de interpretación es posible tener una muy buena aproximación de la resistencia de la formación perforada.

Nos damos cuenta que en la actualidad no es fácil la caracterización de la resistencia de las formaciones, en parte porque no existen técnicas estandarizadas que apliquen a muestras de roca diferentes de las convencionales. Por otra parte los registros de pozo no son una constante en la perforación haciendo muy reducida la cantidad de información a cerca del comportamiento mecánico de las formaciones.

Por otra parte un análisis mecánico debe ser diseñado de acuerdo al propósito de la investigación. Si el propósito es medir la compactación de un

reservorio entonces los procedimientos de prueba no pueden ser los mismos para el caso de un análisis de estabilidad de pozo. La magnitud del estudio dependerá de los recursos económicos disponibles así como del tiempo disponible en el plan de desarrollo del campo. Más adelante Se describirán diferentes procedimientos que se aplican en ensayos estandarizados de mecánica de rocas.

La presente investigación tiene como objetivo principal desarrollar una metodología para la obtención de la Resistencia Compresiva Uniaxial de las rocas a partir de mediciones sobre riptos de perforación, con lo que se persigue contribuir a la solución del problema de la poca disponibilidad de núcleos a los cuales se les pueda hacer las pruebas convencionales. La prueba alternativa indirecta propuesta es la Microindentación. En los numerales siguientes se expondrá las diferentes pruebas tanto directas como indirectas que existen para encontrar la resistencia de las rocas ya sea de compresión o tensión. Pero antes de decidir que método seleccionar para encontrar una propiedad es importante conocer las condiciones de la prueba y cuales son y de que tipo los resultados que se obtienen en las diferentes procedimientos. Primero se presenta los métodos convencionales (directos), después los no convencionales o indirectos También se expondrán las ventajas y las desventajas de cada una de estas técnicas.

1.1.1 Prueba de Compresión Inconfinada.

Significado y uso

La Resistencia Compresiva Uniaxial de las rocas es usada en muchas formulas de diseño y en algunas ocasiones se usa como propiedad índice para seleccionar una técnica apropiada de excavación o perforación. La resistencia de los corazones de roca medidas en el laboratorio no reflejan

exactamente las propiedades in-situ a gran escala de las formaciones subterráneas, ya que estas están fuertemente influenciadas por fallas, heterogeneidades, planos de debilidad y otros factores. Por lo tanto los valores para especímenes intactos deben ser empleados con ajustes apropiados para las aplicaciones ingenieriles³

Descripción.

En una prueba de compresión inconfiada se introduce una muestra de roca en una maquina de carga con presión de confinamiento cero. Mediante el monitoreo continuo del esfuerzo axial y de las deformaciones tanto axiales como diametrales es posible medir:

- La resistencia Compresiva Inconfiada C_0 (también llamada Resistencia Compresiva Uniaxial UCS)
- Modulo de Young (Modulo tangencial medido como la pendiente de la curva esfuerzo Vs deformación axial)
- Relación de Poisson (Relación entre la deformación radial y axial)

Muchas rocas exhiben falla frágil en la prueba de falla inconfiada, este nivel de carga se toma como la UCS. La curva esfuerzo deformación frecuentemente es no lineal, lo que significa que E y ν dependen del nivel de esfuerzo axial. Es muy común especificar los valores de E y ν en el 50% del valor ultimo del esfuerzo. Los módulos secante e inicial de los módulos también son de interés.

Si la roca es anisotrópica los módulos E y ν no son los parámetros adecuados para describir el comportamiento mecánico de las rocas. Esto se evidencia mediante el planteamiento del tensor de rigideces. En el tensor se puede observar como el valor de relación de Poisson ν medido depende

tanto de la dirección de la carga aplicada como de la dirección del esfuerzo lateral medidos. Por lo tanto la orientación de la simetría de la muestra con respecto a los esfuerzos aplicados y medidos así como las deformaciones deben ser especificadas.

Teóricamente la Resistencia Compresiva Uniaxial depende del nivel de agrietamiento o falla presente en la muestra. Por lo tanto es de esperarse que los valores de UCS sean muy sensibles a la heterogeneidad de la muestra, así como a las grietas causadas por el corazonamiento, transporte o los procedimientos de manejo de los núcleos de roca. Así las cosas es de esperarse una incertidumbre bastante alta en las mediciones. Una alternativa para reducir esta incertidumbre es desarrollar pruebas triaxiales a bajas presiones de confinamiento donde algunas de las grietas no asociadas al comportamiento intrínseco de las rocas se cierran²

Cálculos

Se calcula la resistencia compresiva uniaxial en el espécimen de prueba a partir de la carga compresiva máxima y el área de la sección transversal inicial como sigue

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

σ = Resistencia compresiva

P = Carga Máxima.

A = Área transversal.

1.1.2 Prueba de falla triaxial.

Significado y uso

Es de amplio conocimiento que el comportamiento mecánico de las rocas depende de la presión de confinamiento. La compresión triaxial es usada comúnmente para simular la condición de esfuerzos actuante en las rocas a profundidad⁴.

Descripción

En profundidad, las rocas están expuestas a estados de esfuerzo anisotrópicos. Durante la perforación o la producción de petróleo se incrementan los esfuerzos de cizalla cerca de la cara del pozo. El esfuerzo efectivo principal menor es cero en el hueco o en la pared de la cavidad si la pared es permeable y un poco alto si por ejemplo el fluido de perforación transporta partículas mas allá del límite de la cara del pozo (y $P_w > P_o$). Entonces la Resistencia Compresiva Uniaxial de la roca es el parámetro más importante a la hora de describir la estabilidad de la pared del pozo. Por lo tanto para evaluar la estabilidad del hueco es de gran valor conocer como las propiedades mecánicas y la resistencia características dependen de las condiciones externas de carga. El procedimiento experimental mas comúnmente usado para este propósito es la llamada prueba triaxial. Aquí el esfuerzo axial σ_1 y la presión de confinamiento σ_3 se mantienen iguales y se incrementan hasta un nivel preseleccionado, a partir del cual el esfuerzo axial σ_1 se incrementa hasta mas allá de que la falla ocurre, manteniendo σ_3 constante. los resultados obtenidos de una prueba triaxial se muestran en la figura 1. Donde ϵ_1 y ϵ_3 son las deformaciones de la muestra en dirección axial y radial respectivamente.

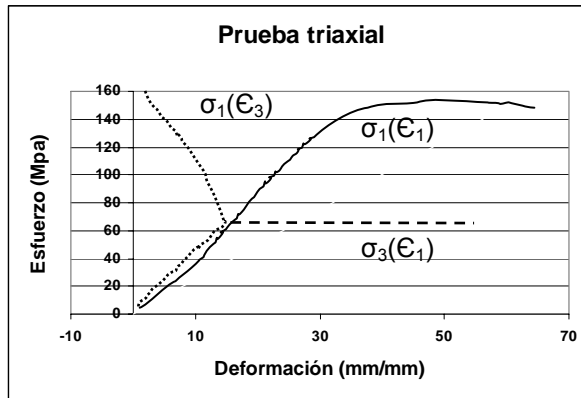


Fig. 1 Ejemplo de resultados experimentales de una prueba Triaxial

Desarrollando una serie de pruebas a diferentes presiones de confinamiento es posible construir la envolvente de falla completa, que es una línea límite para esfuerzos de falla a diferentes presiones de confinamiento. Si el objetivo del programa de prueba es el análisis de estabilidad o el potencial de arenamiento entonces deberá tenerse cuidado con recolectar suficientes datos a bajas presiones de confinamiento, lo cual representa el estado de esfuerzos cerca del pozo. La máxima presión de confinamiento corresponderá al mínimo esfuerzo efectivo principal lejos del pozo. Es posible seleccionar la manera de correr la prueba triaxial, esto es en condiciones drenadas o no drenadas. Dado que los parámetros elásticos como la resistencia dependen de los esfuerzos efectivos, la prueba drenada permite un mejor control experimental ya que la presión de poro es mantenida constante en un valor conocido. Para el caso de shales de extremadamente baja permeabilidad (Nano Darcys) la prueba no drenada con medición de presión de poro puede ser ventajosa dado que la prueba no drenada requiere de un tiempo prolongado para la estabilización². En pruebas drenadas la pendiente de la curva esfuerzo axial Vs deformación axial permite conocer el valor del modulo de Young, y la relación de Poisson se obtiene dividiendo la

pendiente de la curva axial con la pendiente de la curva radial. También es posible graficar el máximo esfuerzo de cizalla $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ Vs la diferencia de deformaciones $\epsilon_1 - \epsilon_3$. la pendiente de esta curva equivale al modulo de cizalladura G . El máximo esfuerzo $\sigma_c = (\sigma_{1max} - \sigma_3)/2$ representa la resistencia de cizalladura. Mas allá de la transición frágil-dúctil puede ser bastante difícil definir el punto de falla, este se observa como un pequeño cambio en la pendiente de la curva esfuerzo de formación. El comportamiento post-falla es importante dado que lo podemos denominar como la resistencia remanente de la roca, es decir cuanta carga soporta la roca después de la falla, por ello se aconseja que la prueba triaxial se lleve a cabo en el modo de desplazamiento controlado.

Para hacer pruebas sobre shales se aconseja desarrollar la prueba consolidada no-drenada (CU). En esta prueba primero se aplica carga hidrostática externa en condiciones drenadas manteniendo constante el nivel de presión de poro. La fase triaxial del experimento es desarrollada en condiciones no-drenadas monitoreando la presión de poro durante toda la prueba.

La prueba también puede desarrollarse en extensión: después de la aplicación de la presión de confinamiento hidrostática σ_3 como se explico para la prueba triaxial estándar, se disminuye la carga axial σ_1 , manteniendo σ_3 constante. Si la falla no ocurre hasta cuando la carga $\sigma_1 = 0$, se incrementa σ_3 . De acuerdo al criterio de Mohr-Coulomb la resistencia de cizalladura τ_c debe ser la misma en compresión o en tensión.

Para evaluar el efecto del esfuerzo intermedio en la envolvente de falla, se utilizan equipos en donde la muestra se encuentra en una condición de esfuerzos verdaderamente triaxial, es decir $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$. Este tipo de sistemas incluyen tres pares de gatos hidráulicos mutuamente

perpendiculares que se comprimen hacia las caras de la muestra que tiene forma cúbica².

Cálculos

Debe hacerse los siguientes cálculos y graficas.

-Grafica de diferencia de esfuerzos Vs deformación axial. La diferencia de esfuerzos esta definida como el esfuerzo principal máximo σ_1 menos la presión lateral σ_3

-Grafica de los círculos de Mohr. Para esto ubicar los esfuerzos de cizalla en las ordenadas y el esfuerzo normal en las abscisas. Debe hacerse como mínimo tres pruebas de compresión triaxial cada una de ellas a diferente presión de confinamiento sobre el mismo material para definir la envolvente de falla por medio de los círculos de Mohr.

-Dibujar una la línea recta que mejor se ajuste (Envolvente de falla) aproximadamente tangente a los círculos de Mohr⁴

1.1.3 Envolvente de falla múltiple. La determinación de la envolvente de falla es una tarea clave en el análisis de estabilidad de pozo y la predicción de arenamiento. Normalmente hay limitaciones en la cantidad de material disponible para las pruebas mecánicas. Por ello puede ser muy atractivo desarrollar un procedimiento donde se determine la envolvente de falla haciendo mediciones sobre una sola muestra de roca. Existen dos métodos diferentes para hacer esto; uno es el estado de falla múltiple, el otro es la prueba de estado de falla continua. En el primer caso la prueba se inicia como una prueba triaxial normal para una presión de confinamiento inicial dada. Cuando se alcanza la falla (se detecta manual o automáticamente

como un cambio significativo en la pendiente de la curva esfuerzo deformación) la presión de confinamiento se incrementa hasta un nivel mas alto. Entonces se incrementa el esfuerzo axial más allá de la falla y se repite para varios niveles de presión de confinamiento. El desarrollo de esta prueba entrega datos bastante confiables incluso para el esfuerzo de falla al menos para rocas frágiles como las areniscas. Obviamente la detección de la falla en materiales dúctiles es mucho mas complicada. Además para rocas duras puede suceder que la roca se debilite en alguno de los pasos. Generalmente el modulo elástico es influenciado por el daño causado por la aplicación previa de carga por, tal razón no se recomienda usar la prueba para encontrar propiedades elásticas. Para el caso de la prueba de estado de falla continuo el principio es similar que para la prueba de estado de falla múltiple. Para el estado de falla continuo tanto el esfuerzo axial como el de confinamiento se incrementan para monitorear continuamente la envolvente de falla²

1.2 METODOS INDIRECTOS DE MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS.

. Como respuesta al problema de disponer de material corazonado para desarrollar las pruebas estandarizadas que se utilizan convencionalmente han surgido una serie de técnicas que de una u otra manera buscan obtener información del comportamiento mecánico de las rocas, pero dando alternativas al uso de equipos de alto costo como las maquinas utilizadas para hacer mediciones indirectas, estas son las pruebas índice o indirectas, las cuales por medio de correlaciones con las mediciones directas permiten la predicción de los valores por ejemplo de resistencia o de módulos elásticos². Estas técnicas se trataran a fondo mas adelante Como se dijo anteriormente la Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) de las rocas se puede determinar por varios métodos, principalmente se utiliza la

compresión inconfiada y la compresión triaxial. No obstante se para desarrollar este tipo de pruebas se presentan varios inconvenientes de tipo técnico y operativo. Quizás el problema más importante de todos es que no siempre existe material corazonado para desarrollar las pruebas sobre probetas de geometría adecuada. Otro de los problemas es el alto impacto causado en la perforación pues el realizar una operación de corazonamiento requiere efectuar tareas como viajes de tubería lo cual representa un aumento en el tiempo de exposición y por tanto incremento de la vulnerabilidad a la inestabilidad de las paredes del pozo así como incrementos propios en los costos generales por detener la operación de perforación. Varias son las investigaciones que han estado dirigidas a desarrollar pruebas y metodologías que soluciones el problema de la no existencia de núcleos, estas se denominan pruebas índice. Las pruebas índice permiten determinar los valores de algunas propiedades mecánicas como Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) Resistencia a la tensión, y Modulo de Young por medio de pruebas índice o indirectas para lo cual se han desarrollado correlaciones. Algunas de las pruebas ya se encuentran estandarizadas como es el caso del *Método Estándar de prueba para determinación del punto índice de resistencia de carga de las rocas (ASTM D5731)*, *Método estándar de prueba para la resistencia tensil de fractura de especímenes de roca intacta (ASTM D3967)* o *la determinación de la dureza de las rocas por rebote de martillo (ASTM D 5873)*. Algunas otras aun no están estandarizadas como es el caso del *método de rayado*. Aquí se presentan las más relevantes. Para evitar observar sesgo en los valores hallados muchas personas han hecho miles de pruebas utilizando diferentes medios en los mismos tipos de roca. Los resultados muestran que en muchos casos la estimación de la resistencia de la roca por métodos sencillos o indirectos es mas representativa que la evaluada por métodos y pruebas mas elaboradas¹

1.2.1 Método Estándar de prueba para determinación del punto índice de resistencia de carga de las rocas. La norma ASTM D 5731 abarca los lineamientos requerimiento y procedimientos para la determinación del punto índice de resistencia de las rocas para especímenes en forma de núcleos, bloques o trozos de forma irregular. La prueba puede ser desarrollada en campo o en laboratorio ya que la maquina de prueba es portátil. El valor encontrado con la prueba es un valor índice y se usa para clasificar y caracterizar la roca. La prueba es aplicable a rocas duras,(Resistencia a la compresión superior a 15 Mpa o 2200Psi)

Resumen del método de prueba.

La prueba es desarrollada sometiendo un espécimen de roca a un incremento de carga concentrada hasta que la falla ocurre rajando el espécimen de roca. La carga concentrada es aplicada a la roca a través de dos elementos en forma de conos truncados coaxiales con su soporte (ver figura 2). La carga de falla es usada para calcular el punto índice de resistencia de carga, con el cual a su vez se calcula la Resistencia Compresiva Uniaxial.

Significado y uso.

La prueba de Compresión Uniaxial es usada para encontrar la resistencia Compresiva de especímenes de roca. Pero esta es una prueba costosa y que consume tiempo que además requiere de un proceso de preparación de los especímenes de roca. Cuando se requieren pruebas extensivas para reconocimiento e información preliminar, alternativas como la prueba del punto de carga se pueden usar en campo para reducir tanto tiempo como costo de las pruebas de resistencia a la compresión. El punto de resistencia de carga puede ser usado como una prueba índice para la clasificación de la resistencia del material rocoso. Los resultados no deben ser usados para

diseño o propósitos analíticos. Este método de prueba se desarrolla para determinar el *punto índice de resistencia de carga* ($I_s(50)$) de los especímenes de roca.

Los especímenes de roca de cualquiera de las formas, ya sea corazones, bloques o pedazos de forma irregular pueden ser probados por medio de la aplicación de cargas concentradas a través de un par de elementos cónicos truncados. En general se requiere poca o ninguna preparación de los especímenes. Sin embargo los resultados pueden ser altamente influenciados por la forma como las muestras sean tratadas desde el momento en que se recuperan hasta el momento de la prueba. Por lo tanto puede ser necesario manipular las muestras de acuerdo a lo especificado en la norma ASTM D 5079.

Equipo.

Un probador de punto de carga (figura 2) consiste en un sistema, que consta de cuerpo de carga, elementos de transmisión, sistema indicador de la carga P (requerida para romper el espécimen) y un sistema de medición de la distancia D entre los puntos de contacto en las platinas. El equipo debe ser resistente a los golpes y la vibración de tal manera que la precisión de las mediciones no se vea afectada negativamente por la repetición de las medidas.

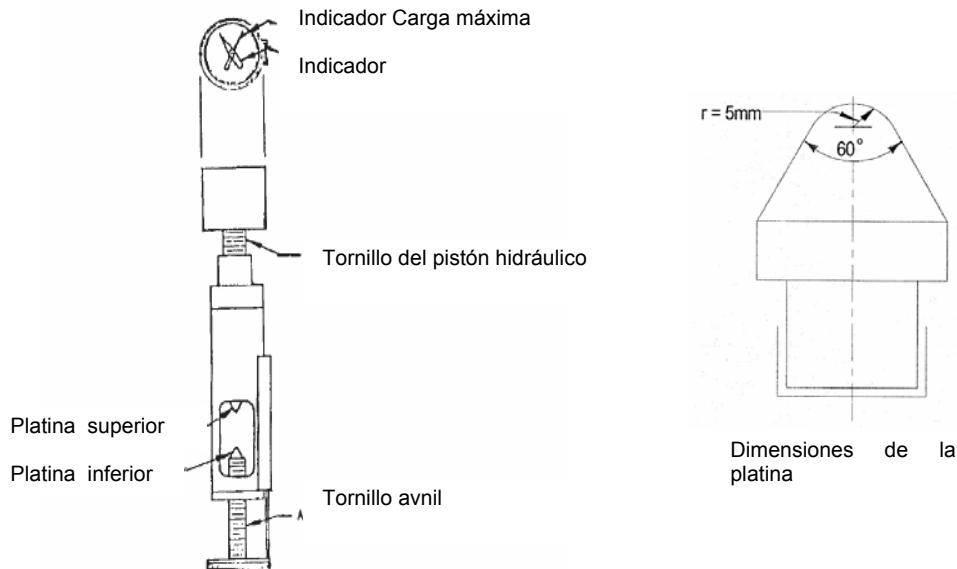


Fig. 2 Esquema del sistema de carga. Tomado de ASTM D 5731

Probetas

Las muestras deben ser separadas de acuerdo al tipo de roca y la resistencia aproximada. Cuando las pruebas se desarrollen sobre corazones o bloques debe seleccionarse al menos diez especímenes. Cuando las pruebas se hagan sobre pedazos irregulares debe seleccionarse al menos 20 especímenes. Es preferible hacer las pruebas sobre especímenes que tengan forma cilíndrica para una clasificación mas precisa.

Las dimensiones externas de los especímenes de prueba no deben ser menores de 30mm ni mayores de 85mm. Se prefiere especímenes de 50mm aproximadamente. En cuanto a la forma se recomienda que las probetas tengan formas como las indicadas en la figura 3. Las caras de las probetas deben estar libres de irregularidades abruptas que causen concentración de

esfuerzos, pero no se requiere una preparación especial, aunque si un tamaño considerable por lo cual la prueba no podría ser aplicable sobre ripios de perforación

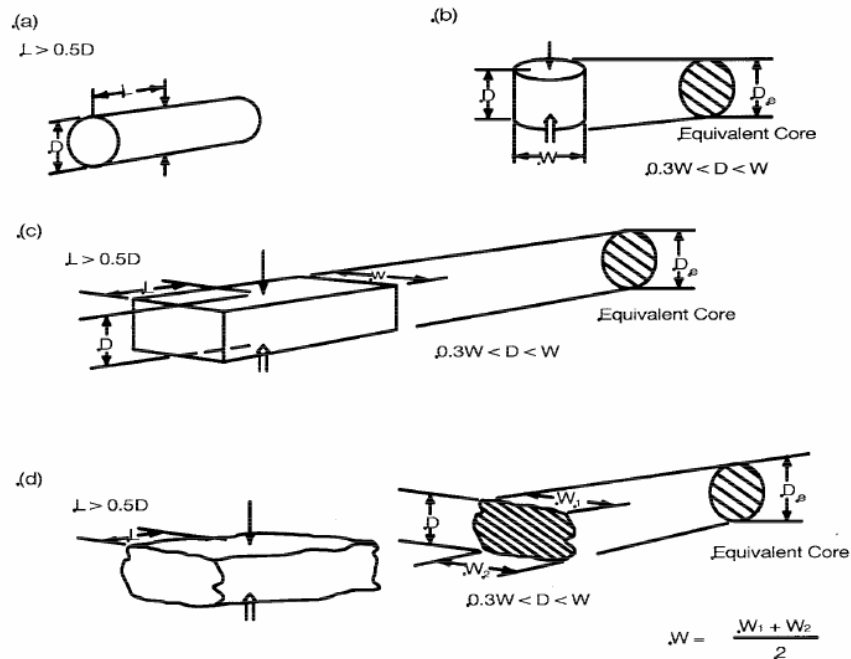


Fig. 3 . Configuraciones requeridos de carga y forma de especímenes para. (a) Prueba diametral, (b) Prueba axial, (c) Prueba sobre bloque, (d) Prueba sobre pedazo irregular de roca. Tomado de ASTM D 5731

Cálculos

El punto índice de resistencia de carga sin corregir se calcula como:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \text{ Mpa.}$$

Donde

P = Carga de Falla

D_e = Diámetro equivalente del corazón =D Para la prueba diametral (figura 4)

$D_e^2 = D^2$ para corazones, mm^2 , o

$D_e^2 = 4A/\pi$ pruebas axiales, bloques, y trozos irregulares, mm^2

Donde $A = WD$ = Mínima área transversal de un plano entre los puntos de contacto de las platinas.

El punto índice de resistencia de carga corregido se calcula como sigue

$$I_{s(50)} = F \times I_s$$

El valor de F puede ser obtenido de la carta de la figura 4 o de la expresión.

$$F = (D_e / 50)^{0.45}$$

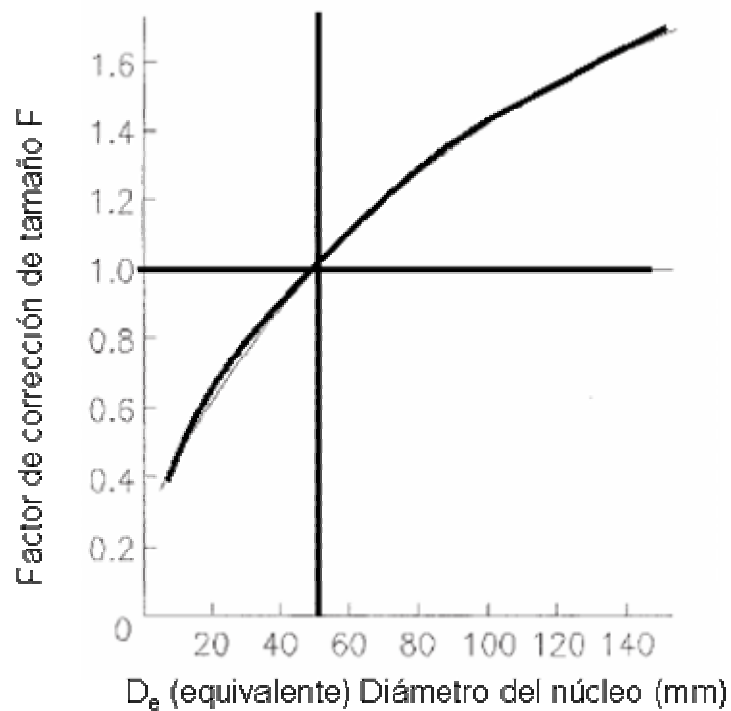


Fig. 4 Carta de factor de corrección. Tomado de ASTM D 5731

Para pruebas con la dimensión cerca de los 50mm el error puede ser calculado usando la expresión:

$$F = \sqrt{D_e / 50}$$

El valor medio de I_s se calcula eliminando los dos valores extremos por arriba y por debajo de la serie de datos. Entonces se calcula el promedio. Si se calcularon pocos valores de I_s entonces se eliminan solo un valor extremo por arriba y uno por debajo. La resistencia compresiva uniaxial se puede obtener usando la figura 5 o usando la siguiente formula.

$$UCS = CI_{s(50)}$$

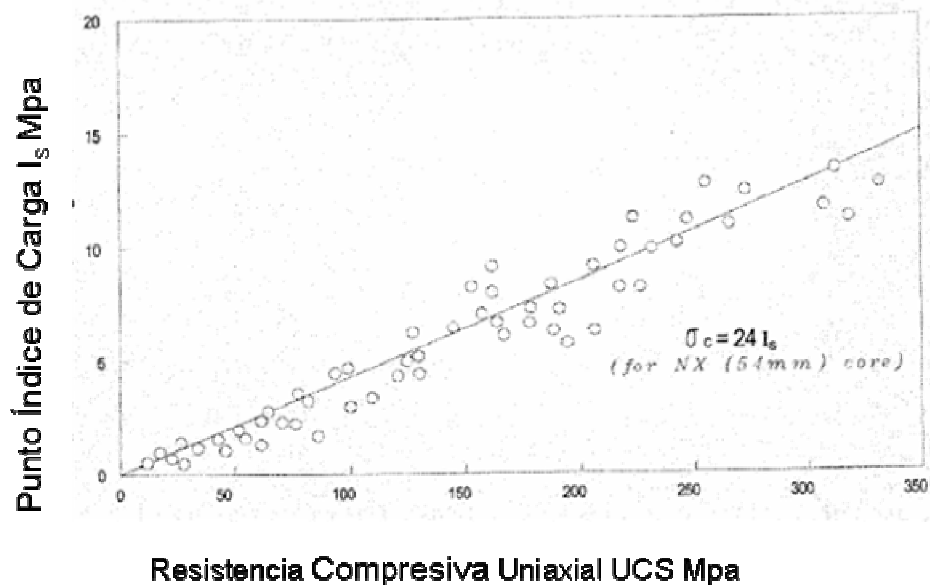


Fig. 5 Correlación entre el Punto Índice de Carga I_s y Resistencia Compresiva Uniaxial UCS. Tomado de ASTM D-5731

Donde.

UCS = Resistencia Compresiva Uniaxial

C = factor que depende del lugar específico de la correlación entre UCS y $I_s(50)$

$I_{s(50)}$ = Punto índice de resistencia de carga corregido.

Si no se dispone del factor de correlación específico C, use los valores generalizados en la tabla 1 propuesta por la ISRM.

Tabla 1 . Valores de C en general

Core Size, mm	Value of "C" (Generalized)
20	17.5
30	19
40	21
50	23
54	24
60	24.5

[^] From ISRM Suggested Methods.⁵

1.2.2 Método estándar de prueba para la resistencia tensil al rajado en especímenes de roca intacta La norma ASTM D 3967 comprende el procedimiento de prueba para determinar la resistencia tensil al rajado de especímenes de roca intacta a lo largo de una línea de compresión sobre un disco de roca.

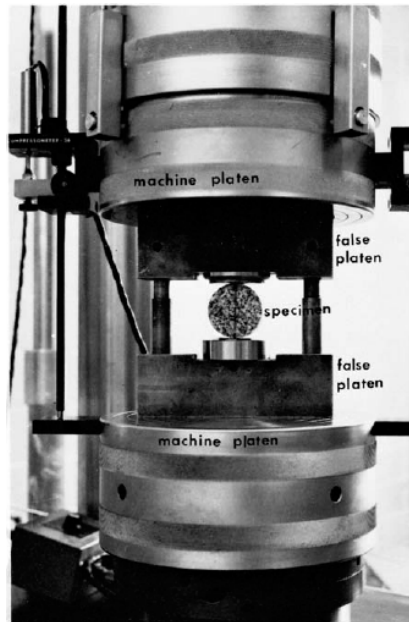
Significado y uso.

Por definición la resistencia tensil de las rocas se obtiene por medio de la prueba de tensión uniaxial directa. Pero la prueba de tensión es costosa y difícil de hacer de manera rutinaria, aparte de que requiere de especímenes cilíndricos para que pueda hacerse el ensayo. La prueba de tensión al rajado aparece como una alternativa atractiva ya que ésta es mucho más simple y

económica. Por lo tanto los ingenieros involucrados en la mecánica de rocas la consideran de gran utilidad. En la aplicación de la mecánica de rocas usualmente se trata con estados de esfuerzo complicados incluyendo varias combinaciones de esfuerzos de tensión y compresión. Bajo dichas condiciones la resistencia tensil debe ser obtenida bajo esfuerzos compresivos para que ésta sea representativa de las condiciones de campo. La resistencia de tensión al rajado es una de las pruebas más simples en la cual se producen dichos esfuerzos. Desde que la prueba empezó a ser usada ampliamente surge la necesidad de utilizar un método estándar para que los datos puedan ser comparables. La prueba estándar asegura que el espécimen de roca se rompa diametralmente debido a la tensión actuante a lo largo del diámetro que esta sometido a carga.

Equipo.

El equipo usado en la prueba de resistencia tensil al rajado es básicamente un sistema que aplica carga en compresión sobre un espécimen de roca cilíndrico. La carga se transmite al espécimen a lo largo de la línea de contacto entre los platos superior e inferior y el espécimen (figura 6). El sistema debe estar dotado de un mecanismo que registre la carga de rotura que es el valor de interés



**Fig. 6 Equipo de prueba propuesto para la resistencia tensil de rajado
Tomado de ASTM D 3967**

Cálculos.

La resistencia tensil al rajado de un espécimen de roca puede ser calculada como sigue

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

Donde:

σ_t = Resistencia tensil al rajado Mpa o Psi

P = Maxima carga aplicada por la maquina de prueba N, lbf

L = Grosor del espécimen de roca mm o Pul

D = Diámetro del espécimen mm, Pul

1.2.3 Determinación de la dureza de las rocas por el método de rebote de martillo La norma ASTM D 5873 da las especificaciones técnicas para el equipo de prueba, preparación de especímenes, y procedimientos de prueba para determinar la dureza por número de rebote de un material rocoso usando un dispositivo que es un martillo de acero unido a un resorte, referenciado en ocasiones como martillo de rebote, prueba de impacto de martillo, o prueba de martillo sobre concreto. Este método de prueba es más adecuado para rocas que tengan una Resistencia Compresiva Uniaxial entre 1 y 100 Mpa. Por ser portable, el aparato de prueba puede ser utilizado bien sea en laboratorio o en campo, siendo un medio de evaluación rápido de la dureza de las rocas o por lo menos un indicador de la misma.

Significado y uso

El método de dureza por rebote es un medio para hacer una clasificación rápida de la dureza de las rocas que se requiere en diseños de ingeniería, para propósitos de construcción, reconocimiento geotécnico de grandes perforaciones o reportes de descripción física en núcleos de roca. El número de dureza por rebote puede servir en una gran variedad de aplicaciones ingenieriles que requieren de caracterización del material rocoso. Esas aplicaciones incluyen por ejemplo predicción de tasas de penetración para la perforación de túneles, determinación de la calidad de la roca para propósitos constructivos y predicción de la erodabilidad hidráulica de la roca.

La prueba está limitada a ser usada en rocas que tengan una resistencia bien sea muy alta o muy baja (Resistencia Compresiva Uniaxial UCS menor de 1Mpa o Mayor de 100Mpa). No es aconsejable utilizar los valores de dureza para convertirlos en valores de resistencia y usarlos como datos de resistencia para diseño.

Equipo

El martillo de rebote consiste de un pistón cargado con un resorte, el cual es proyectado sobre un avnil metálico que esta en contacto con la superficie de roca. El martillo debe proyectarse con una velocidad reproducible y ajustada. La distancia de rebote del pistón es medida en una escala lineal que esta incluida en el cuerpo del instrumento, esta se toma como una medida empírica de la dureza de la roca.

Cálculos

Usando los datos obtenidos para unas diez mediciones, y desechando las lecturas que se alejen del promedio en más de 7 unidades, se debe calcular el promedio de las lecturas restantes, no sin antes corregir el valor como dice en el numeral 9.7 de ASTM D 5873.

1.2.4 Otras Mediciones de dureza.

Dureza Brinell.

El numero de dureza Brinell N_{Br} surge de la razón entre la fuerza aplicada F sobre una indentación esférica a una profundidad D . donde

$$N_{Br} = \frac{F}{2\pi r D} = \frac{F}{\pi r_s^2}$$

Donde r es el radio de la esfera r_s es el radio del área superficial de la indentación. Por lo tanto la prueba es no destructiva. Para metales y vidrios hay correlaciones teóricas entre N_{Br} , el esfuerzo de cadencia σ_{yield} , y el modulo de Young E :

$$N_{Br} = \left(a + b \ln \frac{E}{\sigma_y} \right) * \sigma_y$$

Donde a y b son constantes tal que si la resistencia de cedencia se incrementa proporcionalmente con E, entonces N_{Br} se medirá de σ_{yield} (2).

Van der Vlis (1970) y después Geertsma (1985) estudiaron la correlación entre N_{Br} con los módulos elástico y dinámico y la Resistencia Compresiva Uniaxial de las rocas para areniscas en particular. Geertsma encontró una relación lineal entre la dureza Brinel y el modulo dinámico de Young para areniscas bien consolidadas.

$$E_{dyn} = 77.25N_{Br}$$

El mismo Geertsma también presento una aproximación de la Dureza Brinell al esfuerzo de cadencia

$$N_{Br} = \sigma_{yield}$$

Existen otras pruebas de dureza por medio de las cuales puede cuantificarse la dureza de las rocas. Estas pruebas de dureza tienen en común que son pruebas de indentación o pruebas de dureza de rebote.

La Microindentación.

Dentro de la amplia gama de pruebas y procedimientos utilizados para obtener parámetros mecánicos de las rocas solo la Microindentación ofrece la opción de utilizar cortes de perforación para hacer los ensayos.

Esta técnica presenta una alternativa realmente atractiva para caracterizar las formaciones ya que permite realizar pruebas a partículas de forma y tamaño irregulares como los ripios de perforación. Quizás este es el paso más importante de toda la técnica, además un equipo de Microindentación puede ser portátil, de tal forma que dicha caracterización bien podría hacerse en campo, en tiempo real. Para desarrollar la prueba de Microindentación se

elabora un disco en un material cementante en el que quedan encapsulados los ripios de perforación. El disco debe ser desbastado y lijado para descubrir la mayor cantidad de partículas, además para garantizar paralelismo entre las caras del disco. El hacer las caras paralelas garantiza que la carga se aplicará perpendicularmente a la superficie de la partícula. Luego la prueba se desarrolla aplicando carga por medio de un indentador. Tanto la carga como la profundidad de penetración se registran simultáneamente, con estos valores se construye una grafica de carga Vs Penetración. De esta grafica se obtienen los parámetros de Microindentación que servirán para estimar la Resistencia Compresiva Uniaxial de las rocas. La técnica se explicara en detalle en el capitulo 3.

2. EVALUACIÓN TÉCNICA DEL USO DE EQUIPOS DE DUREZA SUPERFICIAL PARA DETERMINAR UCS EN ROCAS

2.1 JUSTIFICACIÓN

Por las razones expuestas anteriormente y ante la necesidad de desarrollar metodologías alternativas al uso de núcleos en la caracterización mecánica surge la idea de utilizar los cortes de perforación como fuente valiosa de información. Los ripios son un material disponible permanentemente en la perforación y lo más importante es que ellos representan la totalidad de la columna perforada. En este punto la pregunta es ¿Cómo extraer la información de material tan particulado ?. Lograrlo tiene consecuencias muy importantes que se reflejan en un ahorro substancial de recursos y de tiempo.

En la caracterización mecánica de formaciones en el subsuelo la obtención de corazones es quizás una de las tareas más necesarias. No obstante se lleva a cabo con muy baja frecuencia hasta el punto de estar limitada a la zona de reservorios. La razón es muy clara; La obtención de corazones de roca en profundidad tiene un gran impacto a nivel técnico como operativo, que se refleja en un incremento substancial del costo de desarrollo de un plan de perforación. La perforación se afecta técnicamente porque la extracción de corazones implica bajar la tasa de perforación a niveles muy bajos mientras duren las labores de extracción de núcleos, lo cual causa retraso en los planes de perforación trazados en comparación con uno que no incluya dichas tareas. Claro que el beneficio puede reflejarse en la curva de aprendizaje, pero para la perforación de un pozo determinado es perjudicial. Desde el punto de vista operativo el impacto también es alto,

pues se requiere la extracción de toda la tubería de perforación para cambiar la broca e introducirla nuevamente, el tiempo de duración de esta operación varia con la profundidad y para 11000 pies podría ser de hasta 24 horas. Lo anterior suponiendo que no se presente ningún problema que retrase las operaciones

De todos los métodos estudiados que permiten determinar parámetros mecánicos de las rocas solo los relacionados con el concepto de dureza permiten pensar que es posible implementar una metodología apta para aplicar sobre fragmentos de roca que no requieren de especímenes de geometría determinada. Si se quisiera implementar uno de los métodos estandarizados, el mas cercano a ser una prueba practica rápida y económica es la prueba del punto índice de resistencia de carga pero no seria aplicable a ripsos de perforación pues los especímenes de roca deben tener un tamaño considerable. Como vemos el problema mas importante en la caracterización mecánica de formaciones es disponer de muestras aptas para desarrollar las pruebas.

En los últimos años la industria petrolera ha llegado a la conclusión que uno de los principales factores que influye en la estabilidad de los pozos es la resistencia de la roca, según un estudio adelantado por Facultad de Minas – Ingeniería de Petróleos de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín en cabeza del ingeniero José Gildardo Osorio Gallego., que planteo un modelo geomecánico estadístico en donde se identificó las variables que mas influyen en la estabilidad de los pozos y con base en el análisis estadístico se obtuvo que para los dos modelos planteados la UCS de la formación fue la variable de mas alta influencia. Así para los dos modelos planteados se presentaron los siguientes resultados (tomado de Seminario de estabilidad de pozo, José Gildardo Osorio Gallego ICP 2004)

Efectos Promedio (Modelo 1)

Tabla 2 Efectos promedio modelo Geomecánico Estadístico 1. Tomado de seminario en Estabilidad de Pozo. Gildardo Osorio. ICP 2004.

FACTOR	EFEECTO PROMEDIO	Porcentage
UCS	-186,5300602	100
Azimut	130,119976	69,7581805
Ángulo de ataque	-125,8282896	67,457379
Inclinación	-121,0794473	64,9114932
Peso de lodo	-89,82649289	48,1565774

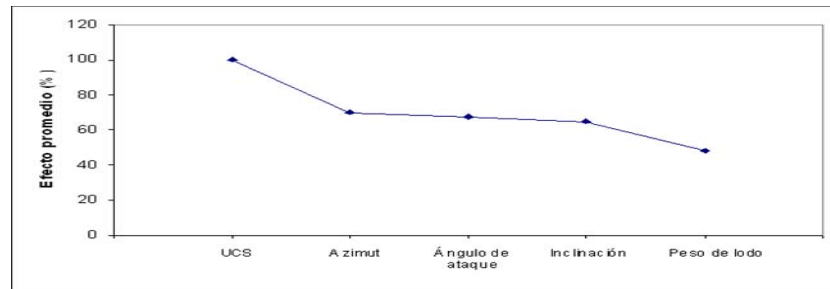


Fig. 7 Efectos promedio modelo Geomecánico Estadístico 1 Tomado de seminario en Estabilidad de Pozo. Gildardo Osorio. ICP 2004.

Efectos Promedio (Modelo 2)

Tabla 3 Efectos promedio modelo Geomecánico Estadístico 2. Tomado de seminario en Estabilidad de Pozo. Gildardo Osorio. ICP 2004.

FACTOR	EFEECTO PROMEDIO	Porcentage
UCS	-187,0875135	100
Azimut	117,7697652	62,949
Inclinación	-110,5037228	59,0653
Tiempo de exposición	-95,87063245	51,2437
Peso de lodo	-95,29186379	50,9344

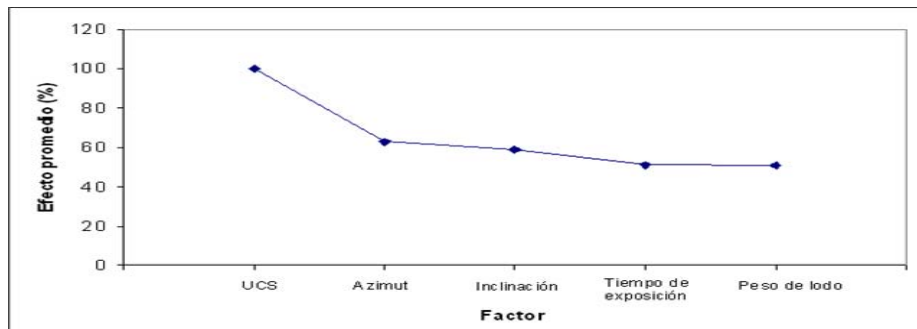


Fig. 8 Efectos promedio modelo Geomecánico Estadístico 2. Tomado de seminario en Estabilidad de Pozo. Gildardo Osorio. ICP 2004.

El estudio muestra cuales son los parámetros que mas causan problemas de inestabilidad En donde se nota claramente la gran influencia que tiene la UCS de las rocas en el comportamiento mecánico de los pozos de perforación.

Con base en estudios como el anterior y otros hechos a nivel mundial es que la industria petrolera ha tenido un interés creciente en hacer una mejor caracterización de las formaciones antes y durante y después de la perforación.

Las formaciones en estado natural están sometidas a condiciones de esfuerzos aleatorias que dependen en gran medida de la estructura geológica predominante, y esta se convierte en el factor que determina la condición de esfuerzos en profundidad. Ahora bien, perforar un hueco en un sistema que se encuentra en equilibrio, inmediatamente altera la condición de esfuerzos in-situ y es de por si el primer paso para que el pozo y la zona circundante pierda su equilibrio natural. Que el pozo se mantenga estable o no dependerá de factores como, el estado de esfuerzos in-situ, la concentración de esfuerzos en los alrededores del pozo, el comportamiento

de las propiedades geomecánicas de la roca, la trayectoria del pozo, el peso de lodo.

En las zonas tectónicamente activas como el Piedemonte Llanero Colombiano los esfuerzos horizontales tienen diferente magnitud presentándose lo que se conoce como anisotropía de esfuerzos. Esta anisotropía es precisamente la que gobierna la dirección en la que se debe perforar el pozo y por consiguiente la respuesta de la roca ante la nueva condición de esfuerzos. Es decir de una buena caracterización mecánica de las formaciones a perforar dependerá el grado de inestabilidad que se tenga durante la perforación

Tanto los métodos directos como los indirectos para determinar la resistencia de la roca, ya sea de compresión o de tensión requieren que las pruebas se hagan sobre especímenes de roca de geometría conocida como se demostró en la descripción de los métodos de prueba. Después de hacer un reconocimiento de los métodos mas importantes usados para determinar el comportamiento mecánico de las rocas por métodos tanto directos como indirectos reportados en la literatura nos concentraremos en las pruebas desarrolladas en esta investigación con el objetivo de implementar una metodología para determinar parámetros mecánicos de las rocas haciendo ensayos sobre partículas de forma y tamaño bien diferentes a los exigidos por los métodos convencionales, los ripsos de perforación.

2.2 PRUEBAS DE DUREZA SUPERFICIAL.

Buscando desarrollar una metodología que permitiera obtener información del comportamiento mecánico de las rocas mediante pruebas alternativas a las existentes el frente de MICROTECNOLOGÍA de ripsos se concentro en

dos aspectos básicamente, que son: la consulta bibliográfica y desarrollo de pruebas en laboratorio. Desde un principio la investigación ha estado orientada en desarrollar una metodología que permita obtener parámetros mecánicos de las rocas de formaciones subterráneas pero a partir de pruebas no convencionales, ya que las pruebas tienen grandes dificultades tanto técnicas como operativas. Las dificultades técnicas hacen relación a que la obtención de parámetros mecánicos de las rocas con los métodos convencionales implica disponer de material corazonado y esto acarrea altos costos, consumo de tiempo, y por ello la obtención de corazones esta limitada a zonas de reservorio donde se hace indispensable obtener características petrofísicas de las rocas para lo cual es necesario corazonar. Las operativas tienen que ver con que el proceso extracción de los núcleos ocasiona un impacto muy alto en las tareas de perforación, ya que se requiere cambiar la broca y esto implica hacer dos viajes completos de las herramientas de perforación. Este panorama obliga a comenzar un trabajo orientado a desarrollar una metodología que permita caracterizar la roca mecánicamente haciendo pruebas sobre ripios de perforación, ya que este material esta presente continuamente en perforación y representa con fidelidad toda la columna litoestratigrafica perforada. Los problemas de inestabilidad ocurren a lo largo de toda la perforación, esto implica que los parámetros mecánicos de las formaciones se requieren permanentemente si se quiere atacar o solucionar dichos problemas.

Lo primero que se planteo fue investigar la posibilidad de desarrollar alguna correlación utilizando equipos de dureza superficial en una escala apropiada (Vickers, Knoop, Brinnel, Rocwell, ect). A continuación se hizo un reconocimiento de los equipos presentes en el ICP, de lo cual se concluyo que tanto los equipos de dureza como de Microdureza eventualmente podrían medir la variación de las características mecánicas de las rocas, para comprobarlo se llevan a cabo una serie de pruebas que se describen en

detalle a continuación. Un primer esfuerzo se orienta a desarrollar alguna correlación entre Microdureza o Dureza y Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS). A continuación se describe lo relacionado con la primera etapa de laboratorio.

Las pruebas llevadas a cabo en esta etapa son fundamentales, ya que se trata de detectar las posibles variaciones de la resistencia mecánica de rocas utilizando métodos no convencionales, como es la prueba de Dureza en escala Rockwell, o la microdureza en escala vickers utilizando equipos desarrollados para hacer mediciones sobre materiales metálicos. Para ello se desarrollaron tres ensayos diferentes con condiciones que se describen a continuación.

2.2.1 Microdureza. La prueba de microdureza es muy utilizada para la evaluación de materiales, control de calidad de procesos y manufactura, también se utiliza para desarrollar proyectos de investigación. Convencionalmente la microdureza es utilizada para hacer pruebas sobre materiales metálicos. La microdureza puede ser correlacionada con la resistencia tensil y compresiva para muchos metales, también es un indicador de la resistencia al desgaste y la ductilidad.¹³ Estas pruebas se realizan utilizando equipos de microdureza como el de la figura 5. Por medio de un indentador, el equipo aplica una carga determinada sobre el material a ensayar y produce en el una marca. Esta marca tiene forma de rombo Figura 2, con la ayuda de un microscopio interno se toman las dimensiones de las aristas del rombo (D_1 , D_2). Una de las formulas utilizadas para determinar la microdureza es la que se presenta como (xx)

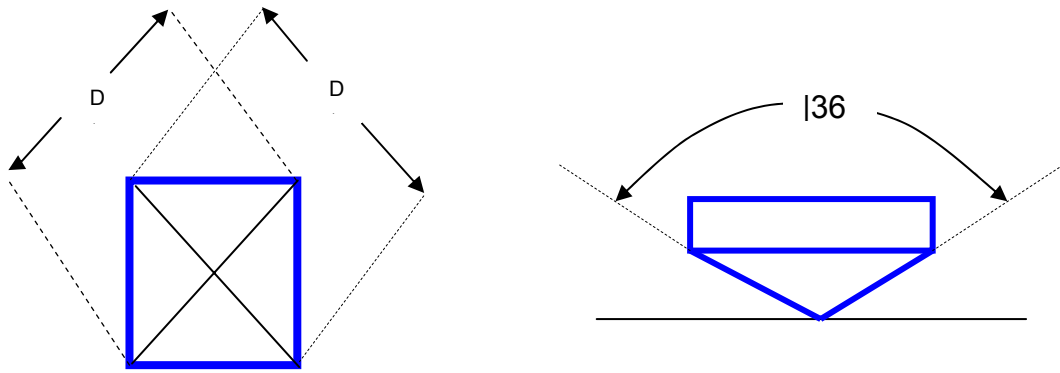


Fig. 9 Geometría del indentador. Microdureza Vickers

$$VHN = 1.72 \left(\frac{P}{D_1^2} \right) \quad (xx) \quad \text{Donde:}$$

P= Fuerza en Kgf

D_1 = longitud de la diagonal, mm

En un comienzo la investigación se orientó a la aplicación de microdureza como técnica base del análisis de ripios para determinar propiedades mecánicas en las rocas, pero aparece un problema en su aplicación, que radica básicamente en que los equipos de microdureza, han sido desarrollados para analizar la geometría de la marca en el material hecha con una carga constante y no es posible medir la respuesta de la roca de manera permanente ni el nivel de carga en el cual la roca cede o sufre deformación permanente, sin que la carga sea aumentada considerablemente. El hecho de que la microdureza se haga utilizando indentadores de dimensiones de orden micro favorece la aplicación a ripios de perforación.

Ya en esta etapa se tuvo conocimiento de la existencia una técnica aplicable a ripios de perforación llamada Microindentación. En la cual se utiliza un

sistema que aplica carga a una tasa variable y esta se registra con una celda de medición. Los detalles completos de la técnica se describirán mas adelante. Aquí sin embargo se llevan a cabo pruebas de microdureza y con base en los resultados decidir que tan viable es el desarrollo de la técnica.

Con el objetivo de encontrar la manera de correlacionar microdureza con propiedades mecánicas se escogen muestras de ripios de los pozos Buca 1 Buca 2 y Buca 3 que están almacenados en la Litoteca Nacional Bernardo Taborda Arango del ICP, estos provienen de perforación (zanja húmeda).

Se procedió haciendo una selección de partículas de tamaño apropiado, esto es diámetro mínimo de 3mm (Figura 10) que pudieran ser probadas con equipos de microdureza.



Fig.10 Muestra típica de ripios de perforación

Como producto de esta actividad se seleccionó cerca de 18 muestras a diferentes profundidades de los pozos mencionados anteriormente para llevar acabo pruebas de Microdureza .

- **Elaboración de probetas**

Los procedimientos que aquí se describen fueron desarrollados en los laboratorios de ICP.

Posteriormente a la selección de las muestras se hizo un montaje de fragmentos de shales en un material de moldeo, que para este caso fue Bakelita, Para la elaboración de las probetas se procedió de la siguiente manera.

Las partículas de roca son ubicadas en el equipo de elaboración de probetas (Figura 11), en una cavidad cilíndrica, sobre las partículas se vierte Baquelita hasta cubrir las totalmente, luego se cierra herméticamente la cavidad y se pone en funcionamiento la maquina, que por medio de la aplicación una temperatura de 200°C y 80Psi de presión hace un moldeo de los fragmentos y se obtiene como resultado un cuerpo cilíndrico de 2.5cm de diámetro



Fig.11 Montadora de probetas en Bakelita

aproximadamente y 10mm de espesor (Figura 13). Luego con la ayuda de una maquina lijadora (figura 12) se desbasta una de sus caras hasta descubrir la mayor cantidad de partículas y de paso haciendo que sus caras

sean paralelas y lo más lisas posible, para asegurar que tanto el indentador como la carga sean perpendiculares a la superficie, y de esta manera asegurar que los datos de microdureza sean más confiables.



Fig. 12 Desbastadora



Fig.13 Probeta con fragmentos de roca

- **El Microdurómetro.**

El equipo utilizado es un Microdurómetro SHIMADZU HMV 2000 en el que se puede aplicar cargas entre 10 y 1000gr, tiene un lente que puede tomar imágenes con 100 -500 aumentos. Este equipo posee un plato giratorio sobre el cual se ubica la probeta y su principio de funcionamiento es óptico. Ver figura 14



Fig. 14 Microdurómetro SHIMADZU HMV 2000

- **Los resultados.**

Se desarrollo la prueba haciendo lecturas de microdureza sobre tres partículas de roca formando una X sobre l superficie del tal manera que con las mediciones se barra toda el área expuesta. Sobre cada fragmento de roca se hicieron mediciones con cargas de 5,10,15,25,50,100 gr como se relaciona en las tablas 4,5,6. Para las cinco primeras mediciones no se observa alguna variación en la superficie aparte de la marca hecha por el indentador. Pero en la medición que se aplica 100 gramos aparece una zona ligeramente deformada alrededor de la marca (figura 15), aquí se alcanza a apreciar una deformación plástica sufrida por la roca. A pesar de la aparente nitidez de la marca en la fotografía, se presenta dificultad a la hora de medir

en el microdurómetro, pues este tiene menor potencia que el microscopio donde fue tomada la foto

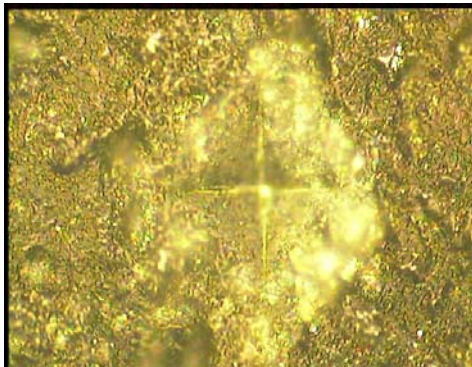


Fig. 15 Fotografía hecha con 1890 aumentos donde se muestra una zona de falla que circunda toda la marca. También se aprecia la impresión de las aristas que indentador hace sobre la superficie del Shale

Para las 3 muestras la falla se observa entre 50 y 100 gr pero no es posible determinar el nivel de carga exacto en el que sucede la falla. Los resultados se encuentra que los valores de microdureza para las muestras es de 38.3 y 55.75 para las muestras 1 y 3 respectivamente, para la muestra 2 la lectura no fue posible por problemas de reflexión de la luz. La relación de los resultados se presenta en las tablas 4,5,6 respectivamente.

Tabla 4 Resultados Microdureza Vickers

MUESTRA 1 PROBETA 1			
P (gr.)	D1	D2	Hv
5	16.3	17.6	32.2
5	16.9	14.9	36.5
10	23.9	23.5	32.9
10	23.3	22.4	35.4
15	22.9	23.9	51.1
15	27.8	29.9	33.3
15	28.9	28.5	33.7
25	34.8	33.3	39.9
25	33.5	34.6	39.9
50	53.7	51.3	33.6
50	46.4	43.6	45.7
100	62.3	67.5	44
100	70	68.3	38.7
MICRODUREZA VICKERS			38.3

Tabla 5 Resultados Microdureza Vickers

MUESTRA 2 PROBETA 1			
5	16.8	16.8	32.7
5	12.9	13.4	53.4
10	17.7	17.4	70
10	18.7	18.5	53.4
15	21.5	21.3	60.6
15	17.7	17.6	89.1
25	22.5	21.5	95.6
MICRODUREZA VICKERS			

Tabla 6 Resultados Microdureza Vickers

MUESTRA 1 PROBETA 2			
P (gr.)	D1	D2	Hv
5	12.6	12.3	59.6
5	14.1	13.8	47.5
10	18.9	22.1	44
10	20.2	20.6	44.4
15	23.5	21.2	55.5
15	21.4	22.4	57.9
25	38.6	42.1	56.8
25	25.7	27.4	65.6
50	28.9	28.9	55.4
50	41.1	42.1	53.5
100	53.1	52.1	66.9
100	50.4	50.4	72.9
MICRODUREZA VICKERS			55.75

Aquí el resultado que se obtiene es la viabilidad del uso de los equipos. Entonces se concluye que el Microdurómetro puede medir con coherencia la microdureza de rocas de tamaño de grano del orden de micras, es decir Shales. Para rocas de tamaño de grano mayor es improcedente. Esto porque las dimensiones del indentador son tan reducidas que si lo utilizáramos en una arenisca por ejemplo, la medida podría llegar a hacerse en un grano de cuarzo, que tiene dureza y resistencia conocida y la medición no sería representativa del comportamiento de la roca como un material monolítico,. Aquí el inconveniente es que El equipo posee lentes que pueden deteriorarse ante la presencia de residuos producto de la fractura de la superficie de la roca, esto es muy probable debido a la naturaleza frágil de rocas. Los valores reportados en las tablas 4,5,6 presentan un grado de

incertidumbre bastante alto debido a que la lectura de las dimensiones de la marca hecha por el indentador en la roca no es muy precisa. La razón es que el principio de funcionamiento del equipo de Microdureza es óptico, es decir, la calidad de la lectura hecha depende de la cantidad de luz reflejada por la superficie ensayada y las rocas son materiales opacos.

2.2.2 Pruebas de dureza Rockwell. La prueba de dureza Rockwell es una prueba de dureza de indentación empírica, la cual provee información útil a cerca del comportamiento mecánico de los materiales metálicos. Esta información puede relacionarse con la resistencia tensil, compresiva, resistencia al desgaste, ductilidad y otras características, también puede ser usada para caracterización y control de calidad de los materiales metálicos¹⁴. Si bien es cierto que la dureza Rockwell se desarrollo para caracterizar metales, el diseño del equipo y sobretudo el aplicador de la carga favorecen el desarrollo de pruebas sobre ripios de perforación. Por tal motivo se decide desarrollar una serie de pruebas sobre partículas montadas como se describió para el caso de la Microdureza.

Una de las tareas planteadas en el cronograma de trabajo fue llevar acabo pruebas de dureza superficial para buscar una curva de ajuste con la resistencia Compresiva uniaxial. Para ello se hicieron pruebas de Dureza rockwell en 9 muestras de roca de diferente litología, para observar la variación de la misma, y si los valores coinciden con los esperados de acuerdo a la composición mineralógica de cada una de los tipos de roca ensayados.

- **Ensayo de Dureza Rocwell en Shales.**

La parte experimental llevada a cabo en esta etapa es fundamental, ya que se trata de detectar las posibles variaciones de la resistencia mecánica de

rocas utilizando métodos no convencionales, como es la prueba de Dureza en escala Rocwell utilizando equipos desarrollados para medir en metales (Figura 16.1), es decir se pretende desarrollar una metodología rápida, económica y sencilla que permita correlacionar las variaciones en Dureza con variaciones en resistencia mecánica



Fig. 16.1 Durómetro

En esta oportunidad se tomo las mismas probetas que se había ensayado en el equipo de micro dureza en escala Vickers, se probaron en El equipo de dureza y en escala Rocwell 15T con un indentador de 1/16" y 15Kg de carga. En el desarrolla de estas pruebas se presentaron los inconvenientes citados a continuación.

Las muestras fueron destruidas debido a que la carga aplicada fue muy alta con relación a la que la muestra de Shale puede resistir, debido a esto no fue posible obtener datos reproducibles. Una fotografía del grado de destrucción al que se llevo la muestra se puede apreciar en la Figura 16.

Otro inconveniente importante es que, al igual que en la Microdureza, no es posible detectar el nivel de carga en el cual la roca falla.



Fig. 16 Muestra de Shale destruida por el indentador de 1/16” En la prueba de Dureza Rockwell 15T con 15 Kg. de carga

Aquí es bueno aclarar que los equipos de Dureza tienen un rango de cargas que se pueden aplicar, pero dichas cargas son bastante altas y la menor es 15 Kg. por eso se trabaja con esta carga y de acuerdo a la carga elegida también se escoge la escala en la cual se va a medir el valor de dureza.

- **Ensayo de Dureza Rockwell en areniscas.**

Con el fin de introducir una litología mas en los ensayos se escoge una muestra de la formación Tambor a la que se le conoce el UCS (Resistencia Compresiva uniaxial), pero por lo explicado en el párrafo anterior se decide hacer la prueba en el equipo de Dureza y en escala Rockwell. Los resultados obtenidos se reportan en la tabla 7.

Tabla 7 Resultados Dureza Rockwell 15T en Arenisca Tambor

ROCWELL 15T 15Kg 1/16"	
Arenisca Tambor	
Dureza 1	89,8
Dureza 2	90
Dureza 3	88,8
Dureza 4	88,4
Dureza 5	84,8
Dureza 6	86,4
Dureza 7	88,4
Dureza 8	90,4
1,91367261	88,375

Aquí se puede notar la baja desviación estándar que indica que los datos tomados tienen una tendencia bien marcada. El valor promedio de Dureza R15T para tambor es de 88.37. Pero este es un solo valor tanto de dureza como de UCS, es decir no es posible identificar un comportamiento, puesto que no se tienen valores de dureza y resistencia de otras litologías, que permitan detectar la variación en los resultados obtenidos. Para solucionar este problema se decide incluir en los ensayos otros tipos de roca con resistencia y dureza diferente.

- **Ensayo de dureza Rocwell en rocas de diferente litología**

En esta etapa se decide trabajar con 8 diferentes tipos (figura 17) de roca en donde se incluyen rocas de origen ígneo, sedimentario y metamórfico. Relacionadas a continuación. En estas pruebas no se encapsuló la muestra a ensayar, debido a que tanto el tamaño del pedazo como su consistencia permitieron omitir este paso. En cambio si se garantizó paralelismo de las caras, esto se logro en los cortes de los bloques.

En algunas de las pruebas, la probeta se fracturó pero no por la magnitud de la carga aplicada sino más bien debido a que en el momento de ubicar la mordaza, esta no hizo contacto en su totalidad con la roca, ocasionando concentración de esfuerzos, que llevaron a la falla de la probeta. Los resultados obtenidos se relacionan en la tabla 8 y figura 18.

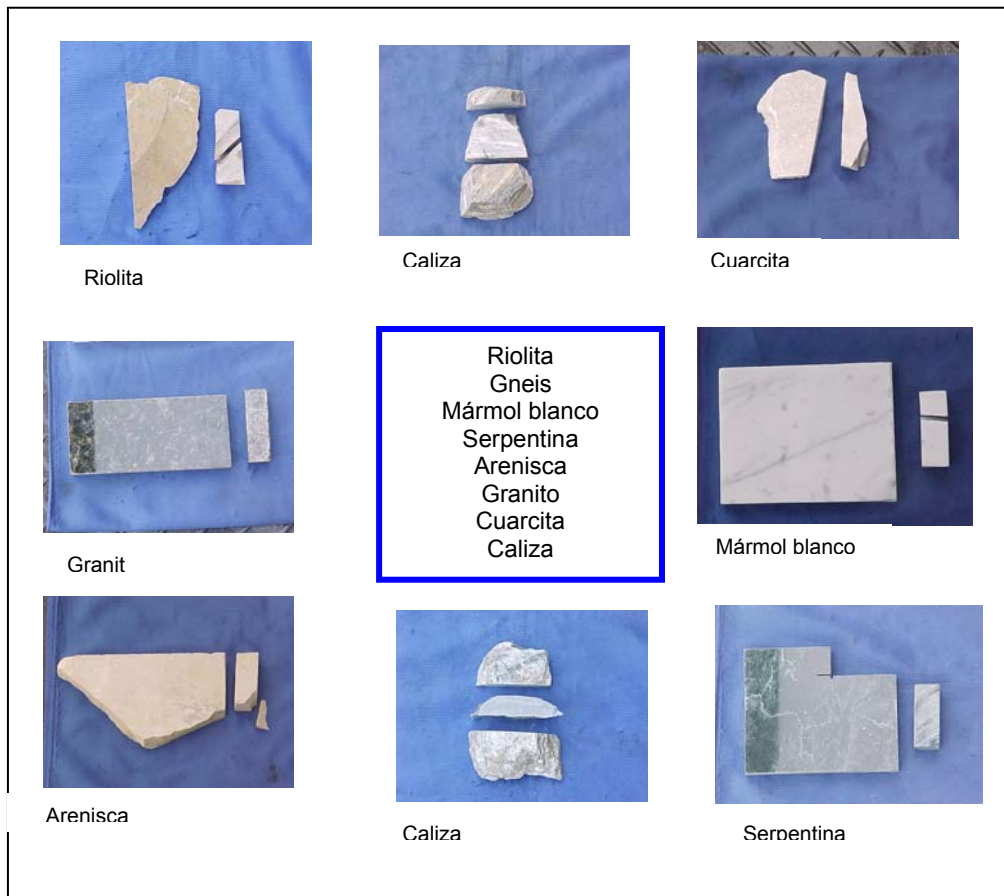


Fig. 17 Varias litologías probadas en dureza

Tabla 8 Resultados Dureza Rockwell varias litologías

Tipo de roca	DUREZA ROCKWELL 15T 1/16"								Desviación estándar	Promedio
	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4	Dato 5					
Mármol Blanco	79,60	82,40	80,00	76,60	75,60				2,74	78,84
Arenisca	87,60	89,40	78,20	84,20	74,60				6,26	82,80
AP cal	85,00	84,20	84,70	86,00	86,60				0,98	85,30
C. Blanca 1	83,60	86,20	84,00	86,00	87,20				1,54	85,40
Arenisca Tambor	89,80	90,00	88,80	88,40	84,80	86,40	88,40	90,40	2,10	88,38
C. Blanca 2	87,40	89,40	92,60	88,80	89,00				1,92	89,44
Riolita	91,80	92,40	90,40	91,20	89,20				1,25	91,00
Mármol Verde	95,60	95,20	95,20	95,60	95,00				0,27	95,32
Gneis	97,40	98,20	93,60	92,40	97,40				2,61	95,80
Granito	95,20	96,00	98,20	98,00	96,60				1,29	96,80

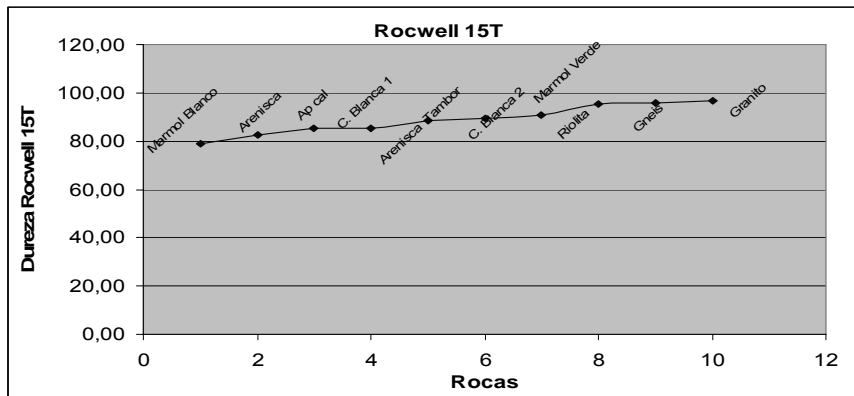


Fig. 18. Resultados dureza Rockwell para diferentes litologías

Como hasta el momento no se tienen valores de resistencia de dichas rocas, se utilizan valores reportados en la literatura para observar que tan relacionables son. Los resultados arrojan que en más del 60% de las rocas estudiadas la dureza y la resistencia tienen el mismo comportamiento, es decir las rocas que tienen menor dureza son también menos resistentes. Los resultados se pueden apreciar en las graficas 18, 19 y 20 en donde se muestra en orden ascendente tanto la dureza como la resistencia. Es importante aclarar que los valores de resistencia tomados de la literatura corresponden a valores límite y no a datos puntuales pues los reportes encontrados relacionan intervalos y en ocasiones estos intervalos se superponen, dificultando la apreciación de los valores de interés.

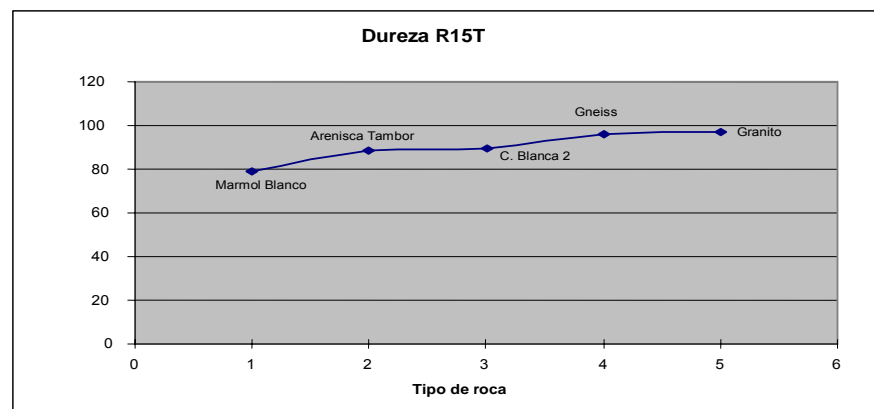


Fig. 19. Resultados dureza Rockwell para diferentes litologías

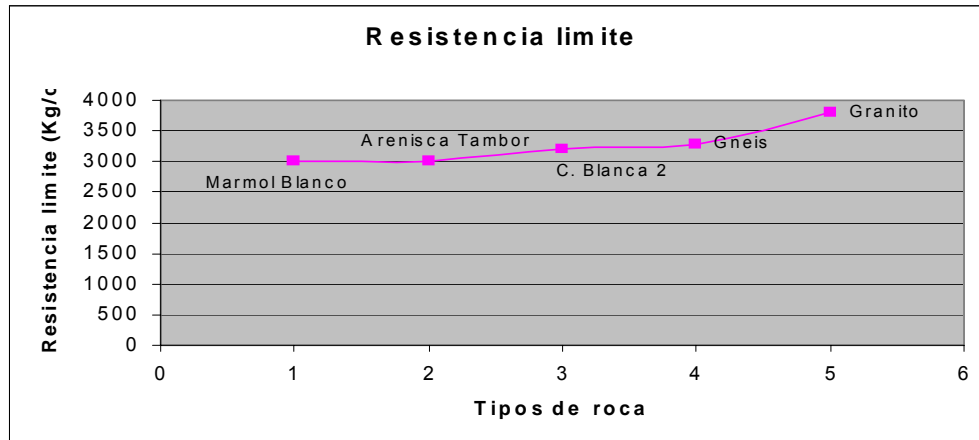


Fig. 20. Valores de resistencia limite para diferentes litologías

Un inconveniente común a las pruebas de dureza superficial desarrolladas es que tanto la Microdureza en escala Vickers como la dureza en escala Rocwell 15T son pruebas índice, esto quiere decir que las mediciones no permiten visualizar la respuesta o el comportamiento mecánico de la roca ante la aplicación de una carga. Por ello se decide descartar la dureza superficial en sus diferentes escalas como una prueba adecuada para encontrar correlaciones con la resistencia de las rocas, y se comienza con la implementación de la Microindentación para desarrollar correlaciones con la Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) de las rocas.

3. MICROINDENTACIÓN.

La microindentación es una técnica aplicada en mecánica de rocas que ayuda a solucionar el problema de la obtención de la Resistencia compresiva Uniaxial (UCS) de las rocas de formaciones subterráneas, ayuda a solucionarlo porque la técnica permite hacer pruebas sobre fragmentos producto de la perforación que aportan información a cerca del comportamiento mecánico de las rocas. A continuación se presenta en resumen algunas de las aplicaciones de la Microindentación reportadas en la literatura y las correlaciones planteadas entre los parámetros de Microindentación y la Resistencia Compresiva Uniaxial UCS de las rocas

Existen varias investigaciones en donde se ha aplicado la Microindentación para caracterizar la resistencia de las formaciones perforadas, las mas relevantes se presentan acontinuación.

3.1 ANTECEDENTES.

- **Evaluación de formaciones a partir de registro de rípios⁸.**

En este artículo los autores presentan una visión global de un vasto proyecto de investigación desarrollado por AGIP Spa llamado Evaluación de la Formación 2000, y que ayudo a caracterizar las formaciones encontradas en la perforación por medio de mediciones en rípios en tiempo real. A la fecha, (1996) el proyecto demostró la viabilidad de obtener valores representativos de velocidad de onda S y P, Resistencia de la roca, deformabilidad, permeabilidad, porosidad, densidad, contenido de fluido residual y saturación. Trabajos posteriores buscan determinar la distribución de tamaño de poro, coeficiente de expansión térmica, resistividad eléctrica de las rocas

a partir de pruebas en rípios de perforación. El artículo presenta la metodología usada para desarrollar sistemáticamente esas técnicas, e ilustra los resultados obtenidos a la fecha a lo largo de varias secuencias de investigación, el diseño inicial de los experimentos, ajustes de laboratorio, y aplicaciones de campo. Además se presenta una serie de casos de campo en los cuales se usaron esas técnicas para ilustrar la aplicación de las pruebas.

Aplicaciones. La experiencia acumulada permitió establecer numerosas aplicaciones de la técnica de indentación para tratar problemas de inestabilidad de pozos. Las zonas más débiles o de más baja resistencia se pueden identificar inmediatamente. Así puede preverse un incremento en la densidad del lodo en tiempo real para evitar una potencial inestabilidad. Modelos simples de estabilidad de pozos también pueden ser usados en tiempo real para evaluar de una manera más cuantitativa la cantidad que debe incrementarse la densidad del lodo. La técnica de indentación es usada por AGIP como parte de una rutina avanzada de análisis de corazones en la cual se determinan las facies mecánicas. La rutina avanzada de análisis de corazones consiste en hacer pruebas de microindentación en los plugs que han sido usados para determinar porosidad y permeabilidad. Y la correlación utilizada es la que se observa en la figura 20

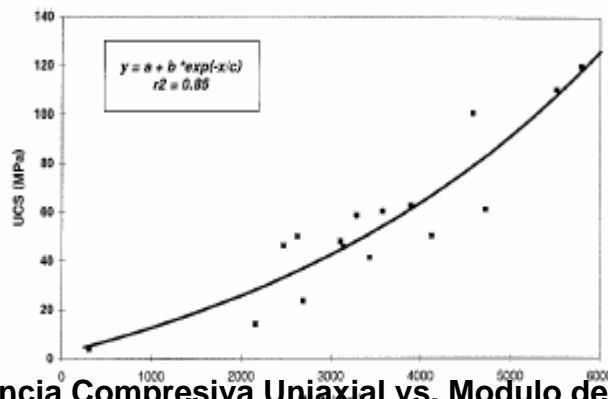


Fig. 20 Resistencia Compresiva Uniaxial vs. Modulo de Indentación. Tomado de Spe 36851

- **Medición de la resistencia de la roca sobre ripios de perforación como datos para optimizar el sistema de selección de la broca⁹**

Otra de las posibles aplicaciones de la Microindentación sobre cortes es la optimización del sistema de selección de la broca de perforación por medio de la medición directa de la resistencia de la roca sobre los fragmentos producto de la perforación. Estos valores de resistencia son fuente de información para alimentar los modelos de selección existentes. Se ha comprobado que la prueba de indentación es suficientemente confiable para determinar las propiedades mecánicas de las formaciones (8,10) Sin embargo es bueno nombrar algunas consideraciones ventajosas y otras desventajosas para ser objetivos en el análisis.

Ventajas

Los ripios se producen de manera constante durante toda la perforación sin ningún costo adicional, representando una fuente de información a lo largo de toda la sección del pozo. El muestreo continuo de las formaciones es costoso y extremadamente difícil de realizar.

La tecnología de ripios es la mejor manera para obtener rápidamente características de la formación.

Desventajas

Ensanchamiento del pozo o dificultades para determinar el tiempo de tránsito correcto de los ripios pueden ser fuente de problemas para definir la profundidad exacta de la cual provienen los ripios de perforación.

Algunas formaciones pueden ser demasiado sensibles a la broca de perforación. Por ejemplo cuando se usan brocas PDC los ripios pueden sufrir un daño bastante alto. Entonces el material puede tener variaciones altas

tanto en mineralogía como estructuralmente alterando completamente la respuesta mecánica.

La presencia de cavings debe ser monitoreada cuidadosamente con el objetivo de determinar correctamente el nivel de perforación en el que se están haciendo las pruebas de Microindentación, esto porque puede darse que la aparición de cavings suplante a los ripios y si no se tiene certeza de la profundidad de la que provienen estos se estaría haciendo pruebas de Microindentación sobre la formación equivocada.

Los problemas mencionados deben ser evaluados cuidadosamente para ampliar la efectividad de las mediciones y asegurar que los valores obtenidos son representativos de las formaciones estudiadas. Un esquema general del sistema de selección y uno modificado por la prueba de Microindentación se muestra a continuación en la figura 22.

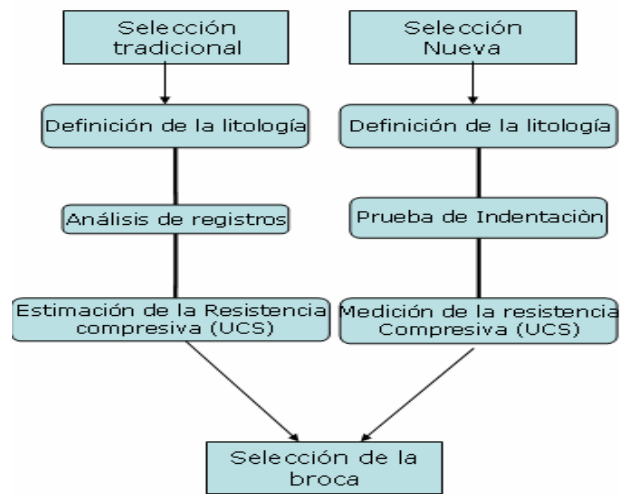


Figura 22 Esquema de selección de broca, tradicional y modificado

La correlación que presentan los autores es la que se observa en la figura 23

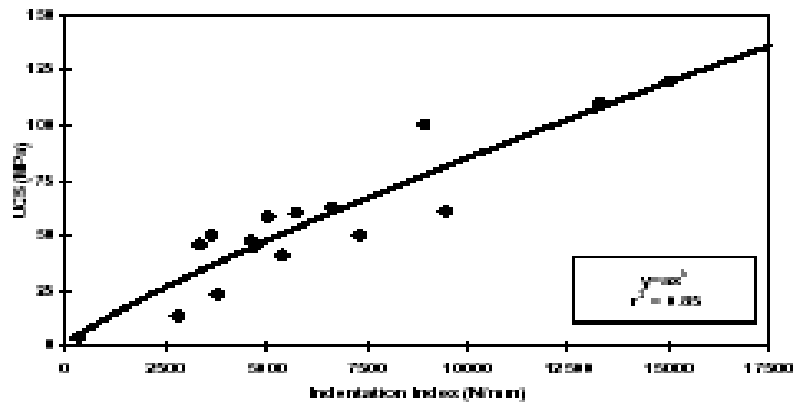


Fig. 23 Resistencia Compresiva Uniaxial vs. Modulo de indentación Tomado de Spe 56441

- **Predicción de parámetros de la roca a partir de mediciones de Microindentación. El efecto del tamaño de la muestra¹⁰**

Medidas de microindentación han sido desarrolladas con la intención de investigar la posibilidad de extraer propiedades mecánicas de pequeñas muestras de roca. Las pruebas que se muestran fueron desarrolladas con un indentador plano de 1mm. Dos parámetros fueron determinados cuando se analizaron las medidas de indentación: El modulo de indentación (IM) y la fuerza crítica de transición (CTF). IM es la pendiente de la curva Fuerza Vs Desplazamiento. La CTF se define como el nivel de fuerza donde el material se deforma sin un cambio significativo en la carga aplicada.

Las muestras de roca fueron moldeadas en un material de montura con el objeto de estabilizarla durante la prueba además de simplificar la preparación de la superficie. Tanto la cara inferior como la superior fueron hechas planas y paralelas para hacer la impresión del indentador. Se probaron 15 materiales incluyendo areniscas rocas limosas y Shales arcillosos con diferentes resistencias y rigideces. Las medidas de microindentación mostraron que tanto IM como CTF son afectados cuando las pruebas son

desarrolladas en muestras pequeñas¹⁰ con rangos de volumen entre 0.04-0.7cm³. Cathrine Ringstard y otros¹⁰ hicieron correlaciones combinando la resistencia compresiva uniaxial (UCS), con IM y CTF. Para mediciones hechas en pequeñas muestras de roca se encontraron las siguientes correlaciones

$$UCS = 0.149 CTF \quad R^2 = 0.90 \quad \text{Figura 24}$$

$$UCS = 0.025 IM \quad R^2 = 0.76 \quad \text{Figura 25}$$

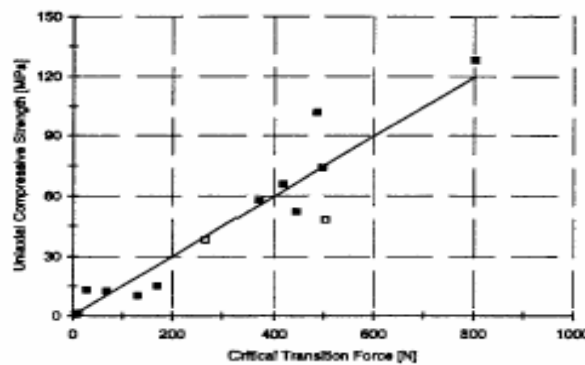


Fig. 24 Resistencia uniaxial compresiva Vs Fuerza Critica de Transición medidas durante la Microindentación en fragmentos. Tomado de Spe 47313

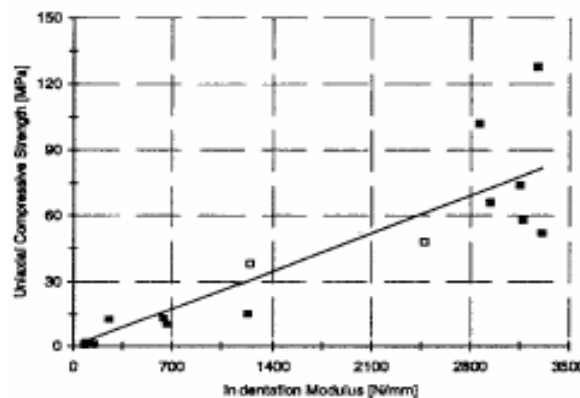


Fig. 25 Resistencia uniaxial compresiva vs. Modulo de indentación medidos durante la microindentación para fragmentos. Tomado de Spe 47313

- **Análisis de estabilidad de pozo en tiempo real¹¹**

La tecnología de ripios desarrollada por AGIP permite medir en tiempo real las propiedades mecánicas de las rocas a partir de fragmentos producto de la perforación hecha por la broca en la roca (cuttings) Estas técnicas son probablemente el paso más importante en toda la metodología desarrollada. Según F Zausa et al.¹¹ la micro tecnología representa la única manera de obtener parámetros críticos de las rocas nunca antes considerados (aproximaciones empíricas), o simplemente supuestas (aproximaciones teóricas) cuando se trata con inestabilidad de pozo.

La manera generalizada de pensar es que las propiedades de la roca se pueden determinar a partir de pruebas en corazones o a través de interpretación de registros, sin embargo esas metodologías son costosas, consumen tiempo y además están limitadas a secciones cortas de pozo (Generalmente reservorios) y casi nunca se desarrollan en tiempo real. Consecuentemente estas técnicas clásicas son de valor limitado a la hora de resolver problemas de inestabilidad de pozo en tiempo real

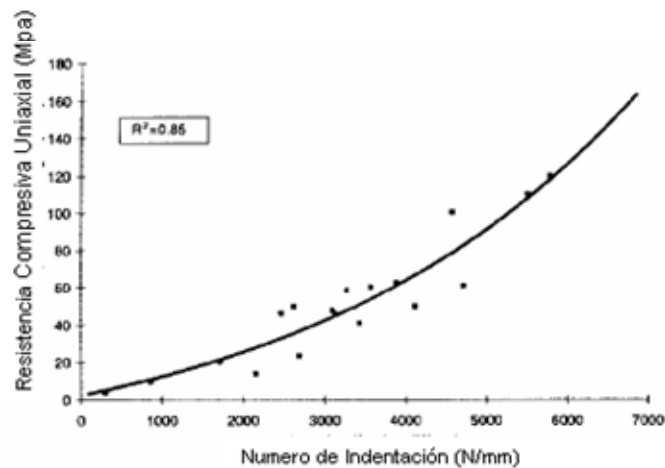
En efecto, alguna técnica sugerida debe obedecer a la solución de al menos tres principales limitaciones de operación.

1. Costos: Se requiere metodologías de bajo costo y con un menor impacto económico en la exploración
2. Tiempo: Es necesario el desarrollo de Pruebas que puedan hacerse en tiempo real en la perforación.
3. Simplicidad: Un operador debe estar en capacidad de hacer las pruebas e interpretar correctamente los resultados.

Una manera óptima de satisfacer estos tres objetivos se ha desarrollado (AGIP) por medio de análisis de ripios, usando tres técnicas básicas que son:

1. Técnica PUC (Pulsed Ultrasound on cuttings)
2. Prueba de Indentación
3. Análisis de Permeabilidad.¹¹

Antes que nada la técnica es no convencional en cuanto a las características del equipo y las probetas utilizadas, las condiciones del lugar de prueba tienen gran diferencia con las condiciones en las que se hacen las pruebas utilizadas de manera generalizada hasta el momento. Esto porque el equipo empleado puede ser compacto y portátil. El procedimiento llevado a cabo también es muy sencillo agregando un beneficio mas, porque tanto la selección de las muestras, su preparación, las mediciones e incluso la interpretación de los resultados, bien podría hacerlas un operario con un entrenamiento muy básico. Los autores presentan la correlación de la figura 26



**Fig. 26 Resistencia Compresiva Uniaxial vs. Numero de indentación.
Tomado de Spe 36713**

3.3 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

Al hacer una prueba de microindentación lo que se hace es aplicar y una carga variable a un cuerpo y al mismo tiempo registrar como es la respuesta mecánica de ese cuerpo ante la condición de carga dada artificialmente, y en este aspecto la microindentación tiene gran similitud con las pruebas convencionales, en que con ellas se produce una acción y se registra una reacción, esta reacción se interpreta y sirve para hacer una clasificación de la naturaleza mecánica del material.

Pero a diferencia de las pruebas convencionales que registran la resistencia de la roca a ser fallada en la microindentación lo que se registra es la resistencia de la roca a ser penetrada con un indentador estándar, por medio del cual se esta aplicando la carga.

3.3.1 Esquema del equipo. Una maquina adaptada para hacer pruebas de microindentación debe tener en su esquema general (Figura 27) dos dispositivos básicos que dan forma a la prueba, ellos son 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. Tener monitoreados permanentemente estos dos parámetros constituye en escénica la prueba de microindentación.

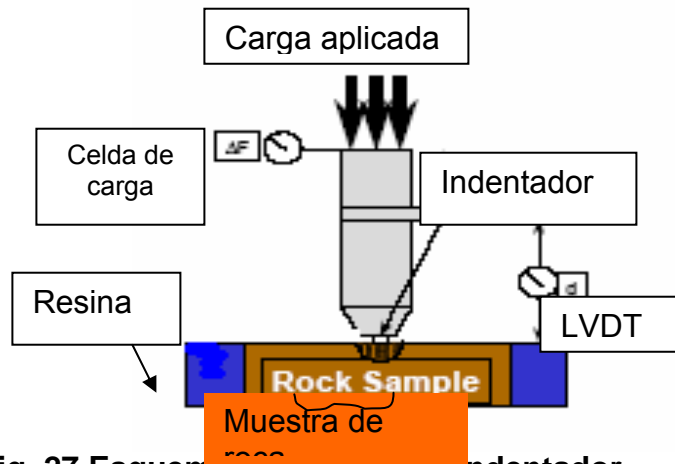


Fig. 27 Esquema general de un indentador

Tanto la celda de carga como el LVDT son detectores de variaciones de parámetros mecánicos que podrían visualizarse con dispositivos como un manómetro para el caso de la carga y un extensómetro para el caso de la profundidad de penetración. Sin embargo el tratamiento de estas señales en un PC requiere que las señales mecánicas se conviertan en impulsos eléctricos, esta es la tarea de los transductores electrónicos. Es así como con los dispositivos básicos nombrados montados adecuadamente y sus funciones se puede hacer pruebas de microindentación y obtener una grafica de Carga Vs penetración como la de la figura 28.

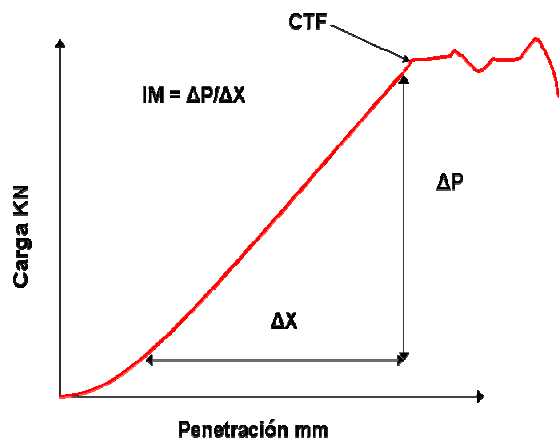


Figura 28. Esquema grafico de Microindentación

3.3.2 Representatividad de los rípios de perforación. El proyecto plantea obtener información del comportamiento mecánico de las rocas a partir de mediciones sobre rípios de perforación.

Desde el punto de vista aplicativo es muy importante, pero técnicamente surgen inmediatamente dos grandes preguntas. Primero, se requiere que los rípios sean representativos del comportamiento mecánico de las rocas, entonces que tanto daño causa la broca en la roca y hasta donde se sigue teniendo certeza de que alguna medición sobre los rípios permite inferir la respuesta mecánica de la formación origen.

Pues bien la literatura reporta que la representatividad de los rípios es la adecuada⁸ para desarrollar una técnica basada en mediciones sobre rípios. Segundo, si los rípios son representativos de la formación, como obtener la información, y aquí el problema es que se hace necesario implementar una técnica que elimine el problema del tamaño y la forma irregular de los fragmentos.

Convencionalmente las mediciones de propiedades mecánicas se han hecho con probetas de geometría conocida y hechas por conveniencia,

Entonces la posibilidad de trabajar con partículas con características bien distintas a la utilizadas convencionalmente se convierte en el paso mas importante en la implementación de toda la metodología, y la solución es muy sencilla, se debe encapsular los fragmentos en un material cementante, que garantice la estabilidad de la probeta y de paso se estandariza la preparación de la muestra.

3.3.3 Probetas. Lo más importante de la técnica es que puede realizarse sobre rípios de perforación, que son partículas pequeñas y de forma

completamente irregular. Para ello los ripios de perforación de diámetro mínimo de 3mm son encapsulados en un material cementante con el cual se forma una probeta que tiene forma de disco (Figura 29).

Aquí los fragmentos se montan de tal manera que queden al descubierto después del fraguado del material cementante. Uno de los cuidados que se debe tener es que el disco tenga caras completamente planas y paralelas para así garantizar que la carga se esta aplicando perpendicularmente a la superficie del fragmento.



Fig. 29 Probeta con fragmentos

La resina de encapsulamiento cumple funciones muy importantes como dar soporte a los fragmentos de roca y por otra parte evitar la propagación de fallas tensiles producidas por el indentador que puedan generar la falla de la muestra de roca.

3.3.4 Resultado de la prueba de Microindentación Cuando se hace una prueba de microindentación tanto carga como desplazamiento se registran en una gráfica como la de la figura 30. *Nótese que tanto desplazamiento como carga aplicada tienen signo negativo en compresión.*

|

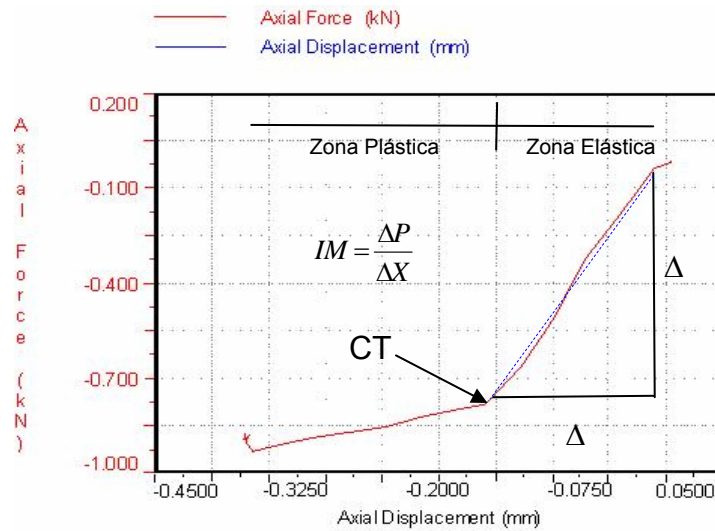


Fig. 30 Curva Obtenida en la prueba de microindentación.

En la grafica puede observarse una zona lineal en donde la roca se comporta elásticamente, de este tramo se obtiene a pendiente de la recta que se denominará Modulo de microindentación (IM), este tiene unidades de N/mm. Más adelante encontramos un punto donde esa linealidad o proporcionalidad se pierde, este punto lo llamaremos Fuerza Crítica de Transición (CTF) que tiene unidades en Newtons. Estos son los parámetros que se utilizarán para hallar las correlaciones con la UCS de las rocas. Además se observa una zona donde la deformación de la roca no es proporcional a la carga aplicada, que evidencia como la roca esta sufriendo deformaciones permanentes o plásticas. Como vemos esta grafica se parece mucho a una grafica esfuerzo deformación convencional, la gran diferencia es que esta prueba no se hizo sobre una probeta de dimensiones conocidas sino sobre una partícula totalmente amorfa encapsulada adecuadamente. La resistencia que oponen los fragmentos de roca a ser penetrados es un indicativo de la resistencia Compresiva Uniaxial de la roca origen. Así por ejemplo un material como el yeso con baja resistencia tendrá también un IM y CTF bajo. Este es el hecho

que se aprovecha para extraer la información a cerca de la resistencia de la roca y poder plantear las correlaciones correspondientes.

3.4 PRUEBAS PRELIMINARES DE MICROINDENTACIÓN.

Llevar acabo pruebas de laboratorio implica utilizar procedimientos experimentales que están en función de las características de los materiales y los equipos utilizados, y en muchas ocasiones estas características se presentan como limitantes a la hora de obtener los resultados esperados. Es así como en relación con las características de los equipos surgen problemas que involucran aspectos como el principio físico o mecánico de funcionamiento, grado de precisión de las mediciones o numero de pruebas a desarrollar. Ahora bien, las rocas son materiales complejos que presentan características bien diferentes de los materiales manufacturados a los cuales se les puede verificar diferentes parámetros mecánicos o físicos con los cuales se han diseñado, por el contrario las rocas son materiales que pueden presentar estados de anisotropía que van desde el estado de esfuerzos en el que se encuentran, pasando por grados de compactación, tamaño de grano, grado de fracturamiento, hasta la forma de depositación. Debido a la gran variedad de aspectos que pueden generar desigualdad en las condiciones de las muestras, se busca una estandarización de la prueba que permita garantizar condiciones mas homogéneas para todas las muestras y para ello antes del desarrollo de las pruebas de microindentación se requiere llevar acabo tareas de ajuste de procedimientos y equipos tales como la selección de la resina para la elaboración de las probetas e influencia de esta en la los fragmentos, el montaje y comportamiento de las probetas a ensayar, fabricación y comportamiento del indentador, selección de las muestras de roca, además, los parámetros de funcionamiento del equipo como velocidad de desplazamiento del indentador en la roca y la penetración máxima. estos aspectos se trataran a continuación

3.4.1 Tipo de resina. En un comienzo se había planteado encapsular las muestras de rocas en Bakelita, que es polvo de aluminio (bakelita) con la ayuda de una maquina que aplica temperatura y presión para formar discos de las dimensiones adecuadas. El problema con esto es que la aplicación de cerca de 200°C de temperatura a la cual se somete la muestra en la montadora de probetas figura 31 puede alterar aun más las condiciones de la muestra de roca. Por ello se decidió cambiar la resina de encapsulamiento por una de montaje en frío, que fuera de fácil adquisición y que se tuviera en el mercado local para así eliminar los procesos de adquisición.



Fig. 31 Montadora de probetas en Bakelita

Por estas razones se decidió utilizar una resina acrílica llamada metacrilato utilizada en dentistería para hacer montajes y prótesis dentales y elaboración de piezas sintéticas. Varios fueron los beneficios de escogerla, tales como rápida adquisición, menor costo. Esta resina es medianamente traslucida, el tiempo de curado es de aproximadamente 30 minutos, y la viscosidad de la mezcla depende de las proporciones de mezclado de sus aditivos. En cuanto al efecto que causa la resina en los fragmentos tenemos que al hacer el vaciado de la resina sobre los fragmentos de roca o ripios de perforación, esta tiende a invadir los espacios porosos de la roca, siendo más relevante cuanto mas porosa es la roca. Es por esto que antes de conocer el efecto que causa esta invasión se decidió hacer unas pruebas preliminares sobre

calizas, las cuales presentan una porosidad mucho mas baja que las areniscas. Sin embargo este efecto esta siendo estudiado por el frente de Microtecnología de ripios del Grupo de estabilidad de pozo en la actualidad por medio del análisis de secciones delgadas hechas con partículas montadas sobre la resina coloreada adecuadamente para observar el fenómeno citado en el microscopio. Esto con el objetivo de encontrar la proporción de mezclado optima de tal manera que la invasión de la roca sea mínima. Mientras se conoce este efecto la Microindentación debe hacerse lo más centrada posible sobre la partícula para minimizar este efecto.

3.4.2 Montaje y comportamiento de las probetas. Después de la selección de la resina se procedió a hacer el montaje de los ripios. Para ello se utilizaron moldes (Figura 32) de 2.5cm de diámetro. Primero se ubicó 2 o 3 fragmentos (dependiendo del tamaño de las partículas) de roca en cada molde, previamente impregnado con un aceite antiadherente para evitar que el disco se pegue al molde. En un recipiente aparte se mezclaron los aditivos hasta lograr una solución de viscosidad adecuada para garantizar que esta se amolde fácilmente a la forma de los fragmento y del recipiente.



Fig. 32 Moldes y probetas

Se dejo fraguar durante 30 minutos, transcurrido este tiempo el molde fue desmontado, obteniéndose los discos que se observan en la figura 32. Para

el montaje de las probetas fue necesario utilizar la cámara extractora de olores (Figura 33) del laboratorio de resistencia de materiales, pues la reacción de los aditivos hace que se liberen vapores que tienen un olor bastante fuerte.

Después de tener el disco es necesario desbastarlo para descubrir la mayor cantidad de fragmentos posible. Este procedimiento también sirve para uniformizar las superficies y hacerlas planas y paralelas, para garantizar que la carga se aplica perpendicularmente a la superficie de los fragmentos, esto se hace utilizando la maquina desbastadora de la figura 34



Fig. 33 Cámara de extracción de vapores



Fig. 34 Maquina desbastadora

En cuanto al comportamiento de las probetas existe un problema relacionado con el tamaño de los fragmentos y es que para partículas delgadas, del orden de 2mm o menos, la prueba de microindentación podría contaminarse por la deformación sufrida por la resina. Esto se evidenció al observar que para una prueba sobre la resina el indentador penetra con más facilidad que sobre los fragmentos de caliza probados en ese momento. Es por esto que debe tenerse cuidado a la hora de escoger los fragmentos, seleccionando partículas que no tengan zonas con espesores de este orden. Lo que pasa es que cuando se hace el proceso de desbaste para descubrir los fragmentos y haciendo una vista en planta no es posible identificar estas zonas.

Otra observación importante que pudo hacerse en relación al tamaño y densidad de fragmentos en cada probeta, es que debe evitarse, por un lado que la probeta tenga demasiados fragmentos, o muy grandes. También que las partículas queden en los bordes de la probeta. La cuestión es que la carga se transmite a la roca y una parte de esta a su vez se transmite a la probeta y en el caso de que un fragmento haga contacto con el borde de la probeta se genera una zona de dilatación, que tiene menor rigidez, por lo que la carga tenderá a dirigirse hacia esta zona generándose inmediatamente una fractura como la que observamos en la figura 34a. En este caso la resina de encapsulamiento pierde una de sus funciones específicas que es evitar la propagación de fallas tensiles es decir, de dar soporte lateral al fragmento. Pero para el rango de cargas que se maneja, con garantizar que el fragmento no tenga contacto con el borde de la probeta se está eliminando este fenómeno.

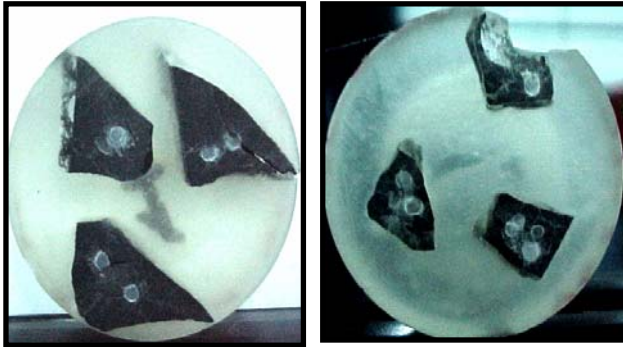


Fig. 34a Probetas fracturadas

3.4.3 Fabricación del indentador. Para la fabricación del indentador se utiliza una pieza de acero inoxidable que según la clasificación de la AISI SAE es una 4340. El 43 indica que es una aleación de Cr, Ni, Mo y el 40, que tiene un 40% de carbono, esta aleación es de alta resistencia utilizada en las varillas de succión en la industria petrolera, la pieza se aprecia en la figura 35. El efecto de los componentes se presenta a continuación.

Carbono: Ingrediente esencial en todos los aceros, proporciona mayor endurecimiento. Con el aumento del contenido de carbono en la varilla, aumenta su resistencia a la tensión, dureza, y susceptibilidad al tratamiento térmico.

Níquel: Tiene un efecto positivo en la dureza del acero debido a que el efecto corrosivo del sulfuro de hidrógeno y otros gases que pueden tener el crudo, se contrarrestan si la varilla tiene níquel como elemento de aleación

Cromo: Forma un carburo estable y contribuye fuertemente en la dureza del acero, sin embargo es menos efectivo que el níquel a la resistencia corrosiva del sulfuro de hidrógeno. A niveles del 12-13% Cr, la resistencia a la

corrosión por H₂S es significativa. *Molibdeno*: Es uno de los mas poderosos elementos que contribuye en la dureza del acero, aunque no en forma igual al carbono, ayuda a mejorar la templabilidad.

Después de una búsqueda exhaustiva en la literatura se encontró que la mejor configuración para realizar la prueba es utilizar un indentador plano de 1mm de diámetro (8,9,11). Sin embargo Zausa¹⁰ plantea el uso de un indentador semiesférico. No obstante y por ser mayor el numero de referencias que citan indentadores planos se decide por la construcción de este



Fig. 35 Pieza de acero inoxidable

Esta pieza se lleva al torno (Figura 36) de la sección de mantenimiento del ICP y allí se fabrica el indentador que se observa en la figura 37, cuyas dimensiones son 1mm de diámetro y 3mm de longitud, esto para la zona de aplicación de la carga.



Fig. 36 Torno (Mantenimiento ICP)



Fig. 37 Indentador. Dimensiones en la punta. 1mm de diámetro y 3mm de longitud

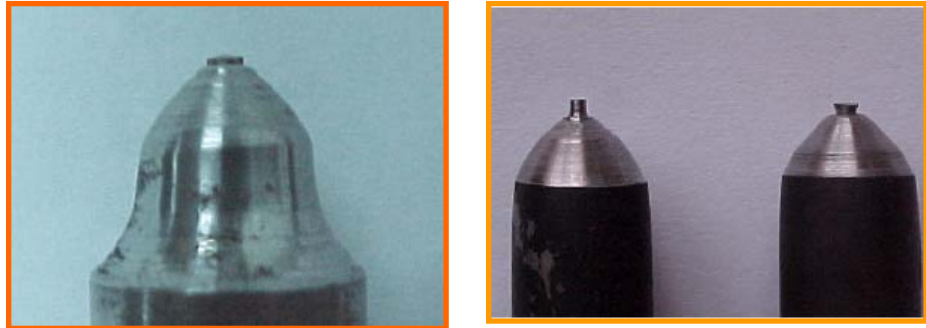
3.4.4 Comportamiento Mecánico del indentador. Sobre el primer prototipo se llevaron a cabo 3 pruebas preliminares con el fin de evaluar el comportamiento del indentador de 3mm de longitud en punta y 1mm de diámetro. Se observó que después de 3 pruebas la punta del indentador presentó pandeamiento (Figura 38) provocado por la esbeltez, ya que la relación de diámetro-altura es de 1-3. Con base en esta observación se decide bajar la altura del indentador a 1mm, teniendo un mejor desempeño.



Fig. 38 Indentador pandeado.

A pesar de que con las nuevas dimensiones el indentador no sufrió pandeamiento alguno si se observó una deformación alta que aparece como

un achatamiento Figura 39. Para solucionar este problema se hizo un tratamiento térmico en la pieza de fabricación del indentador antes del maquinado, esto le dio mayor resistencia disminuyéndose la deformación producida por el uso, aunque no se eliminó por completo.



a)

b)

Fig. 39 Gasto del indentador de 1mm de diámetro y 1mm de altura en punta. a) Sin tratamiento térmico, b) Con tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos hechos a la familia de los aceros 4340 son:

Temple:

consiste en un rápido enfriamiento, usualmente en agua o aceite, para producir una estructura dura. En el estado después del temple, el material es demasiado duro y frágil para ser usado, por lo tanto, siempre después del temple se debe realizar un revenido para alcanzar la tenacidad requerida en el material. calentamiento a 845 ° C –875 °C, se mantiene a esta temperatura, se templea en agua o en aceite.

Revenido:

el revenido es un recalentamiento del acero para aliviar los esfuerzos internos, ablanda el material e incrementa su tenacidad. como mínimo se deja media hora en rangos de 200 –700 °C; se enfría al aire o en agua. Para conocer el efecto logrado con el tratamiento térmico hecho se hizo un estudio metalográfico que es básicamente un barrido de Microdureza en

una sección transversal del indentador para saber hasta que profundidad hizo efecto el tratamiento térmico y si es necesario mejorarlo y de que manera. La decisión de hacer este estudio se basa en la teoría de que el tratamiento térmico no haya penetrado hasta el centro de la pieza. Entonces esta sería la razón de la deformación de la punta. No obstante se hicieron las pruebas de Microindentación y es allí donde se confirma que el tratamiento no tuvo el efecto esperado, pues la punta se deforma plásticamente alrededor de la quinta prueba. Los resultados del análisis metalográfico ver (tabla 9) muestran que la microdureza de toda la sección transversal es lo suficientemente uniforme como para descartar la teoría propuesta. Entonces el efecto obedece a que los tiempos y las temperaturas a que se debe someter la pieza no fueron los requeridos. Por tal motivo las piezas se someten nuevamente a tratamiento térmico.

Tabla 9 Resultados Análisis Metalográfico

<i>Barrido de Microdureza</i>	
<i>Distancia al borde</i>	<i>Microdureza</i>
0,25	519
0,5	587
1	612
1,5	617
2	612
2,5	640
3	590
3,5	594
4	622
4,5	587
5	585
5,5	602
6	576
6,5	587
7	574
7,5	590
8	585
8,45	Borde

3.4.5 El equipo de prueba. El equipo utilizado para la validación de la Microindentación es un MTS-810 como Ver **figura 40**.

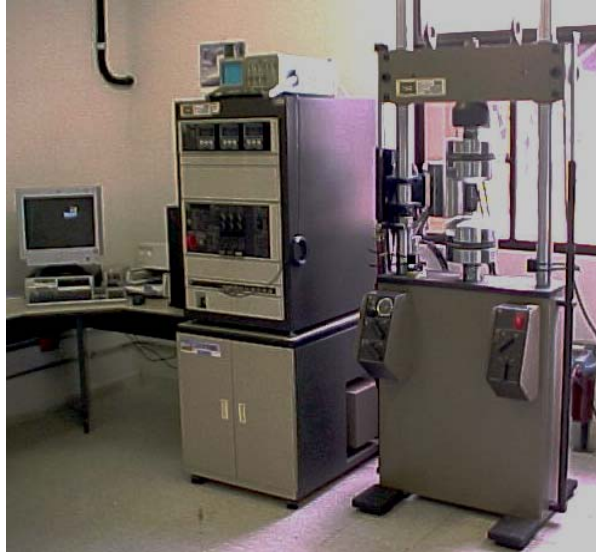


Fig. 40 Maquina de prueba de Materiales MTS-810. utilizado para hacer las pruebas de Microindentación

A pesar de que la microindentación no es una prueba normalizada, los resultados obtenidos en el laboratorio tienen una alta repetitividad. Para asegurar esto se hizo seguimiento cuidadoso de los detalles que podrían afectar los resultados finales, gracias a esto las mediciones de microindentación son reproducibles, tienen buena repetitividad y son coherentes con los resultados reportados en la literatura. Después de tener certeza de la representatividad de los ripios y saber que el encapsulamiento garantiza la estabilidad de la prueba, los esfuerzos se orientan hacia poder registrar gráficamente la carga y la deformación. Gracias a la versatilidad del equipo de prueba de materiales MTS-810 y después de hacer algunos ajustes se logra registrar de manera simultánea la carga aplicada y el desplazamiento del indentador en la roca. El resultado es una grafica de Carga Vs Deformación como la que vemos en las figuras 41,42,43

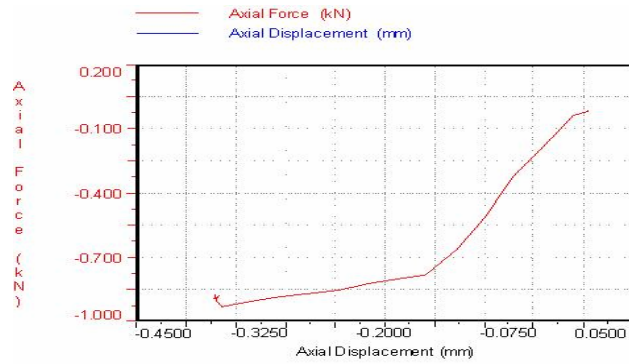


Fig. 41 Indentación prueba 1 Muestra de la formación Rosa Blanca

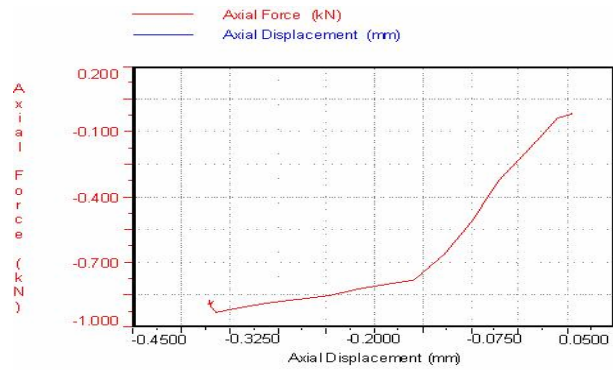


Fig. 42 Indentación prueba 2 Muestra de la formación Rosa Blanca

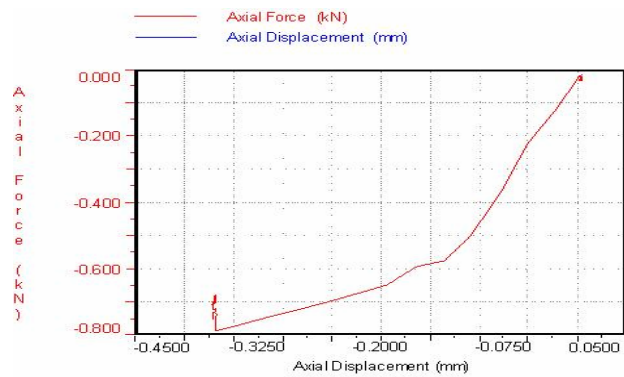


Fig. 43 Indentación prueba 3 Muestra de la formación Rosa Blanca

En donde podemos observar la repetitividad de la prueba, aquí se observan claramente parámetros como Modulo de Microindentación (IM) y Fuerza Critica de Transición (CTF), así como la zona elástica, la de transición y la plástica explicados. Al comienzo de la grafica observamos una pequeña zona irregular, la cual puede interpretarse como el acomodamiento del indentador, después de esta zona si se observa claramente la zona elástica. Nótese que tanto los desplazamientos como la carga aplicada tienen signos negativos (por configuración del equipo)

3.4.6 Parámetros de funcionamiento del equipo. Además de los resultados de las pruebas en si, a partir de la experiencia se pueden hacer conclusiones y observaciones importantes, que ayudan a mejorar tanto procedimientos como el mismo análisis de los datos. En la Microindentación existen varios parámetros críticos de los cuales depende la repetitividad de las mediciones y la representatividad del comportamiento mecánico de las rocas, y hasta el hecho de que pueda correrse la prueba.

Para poder registrar las mediciones es necesario dar al equipo parámetros de funcionamiento, que controlen el procedimiento. Los parámetros mas importantes son el desplazamiento máximo del indentador, que es la profundidad a la cual el equipo detiene la aplicación de la carga, este se fijo en 0.3mm, ya que la punta del indentador mide 1mm (30% aproximadamente).

El otro parámetro es la tasa de penetración, la cual se fijo en 0.01mm/s. Dados estos valores, lo que el equipo hace es registrar la carga necesaria para penetrar 0,3mm a una velocidad de 0.01mm/s. También se puede calcular el tiempo de prueba con la velocidad y el desplazamiento de aquí se obtiene que una prueba de Microindentación dura 30 segundos aproximadamente.

3.4.7 Análisis de resultados. Para analizar los resultados de las pruebas de microindentación se hizo un procesamiento de las diferentes graficas que consiste básicamente en la obtención de los parámetros de microindentación que son el índice de Microindentación (IM) y la Fuerza Critica de Transición (CTF) a partir de las gráficas obtenidas en las pruebas de microindentación para cada muestra de fragmentos y como se indicó en la figura 44.

En las Figuras 45-48 se presentan superpuestas cada una de las graficas obtenidas para las diferentes muestras, es decir cada curva es una prueba.

Los parámetros de Microindentación registrados en la tabla 10 se obtuvieron utilizando las siguientes expresiones.

Los valores presentados en el ejemplo pertenecen a la figura 44:

$$IM = \frac{C_2 - C_1}{D_2 - D_1} = \frac{N}{mm}$$

$$IM = \frac{725 - 112.5}{0.141 - 0.025} = 5284 N / mm$$

$$CTF = 725(N)$$

Donde C1, C2 son la carga inicial y final y D1,D2 son los desplazamientos inicial y final para la zona de proporcionalidad respectivamente.

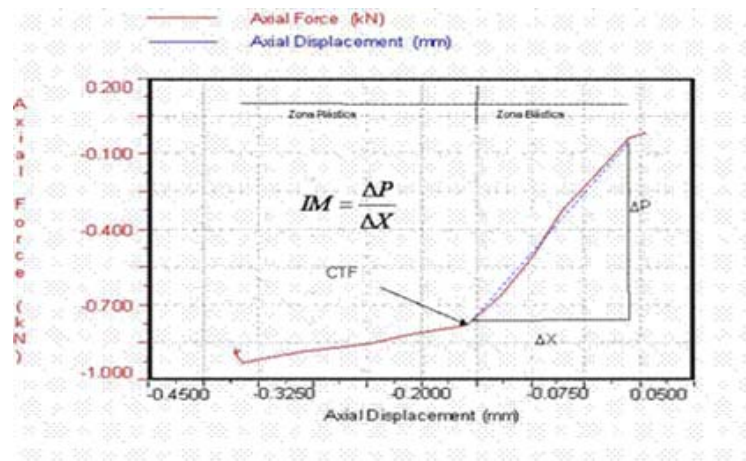


Figura 44 grafica de Microindentación para muestra de roca de la formación Rosablanca

En las graficas 45-48. Se muestran familias de curvas de Microindentación. En donde se puede observar una buena repetitividad que se refleja en valores promedio más representativos y por lo tanto mejor ajuste de las correlaciones a plantear.

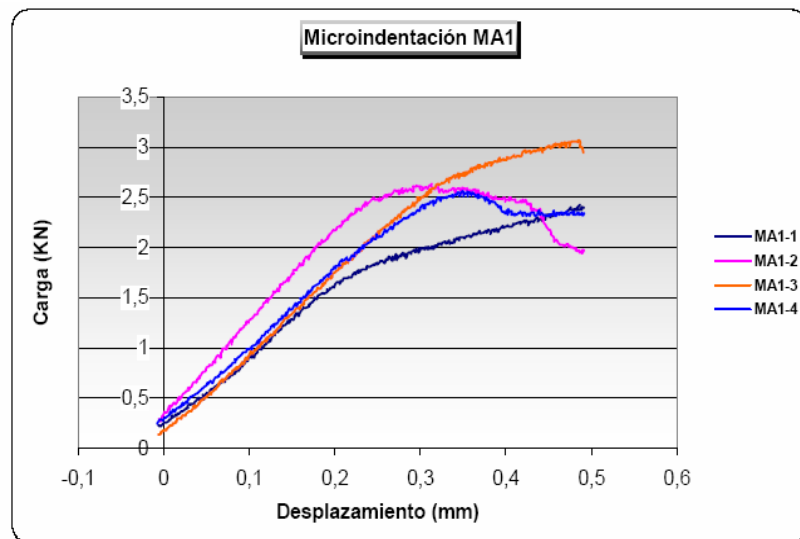


Fig. 45 Familia de curvas de Microindentación para la muestra MA1

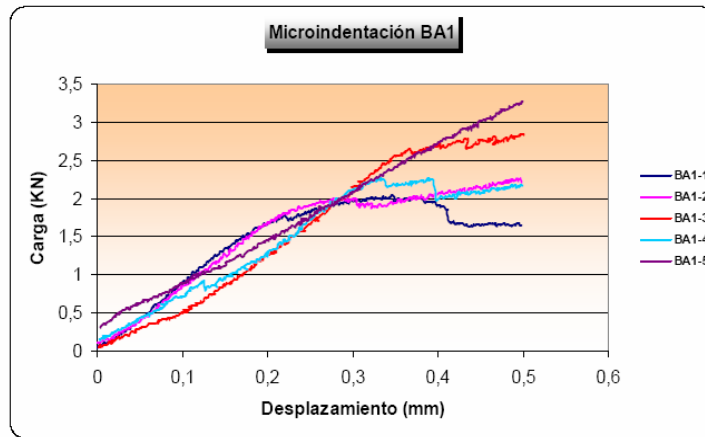


Fig. 46 Familia de curvas de Microindentación para la muestra BA1

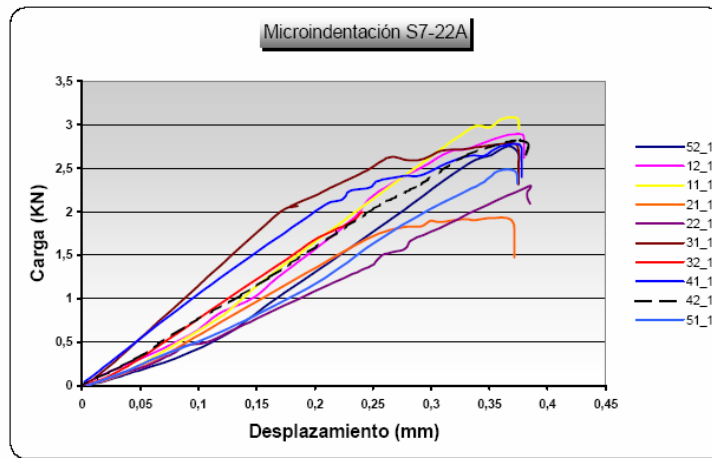


Fig. 47 Familia de curvas de Microindentación para la muestra S7-22A

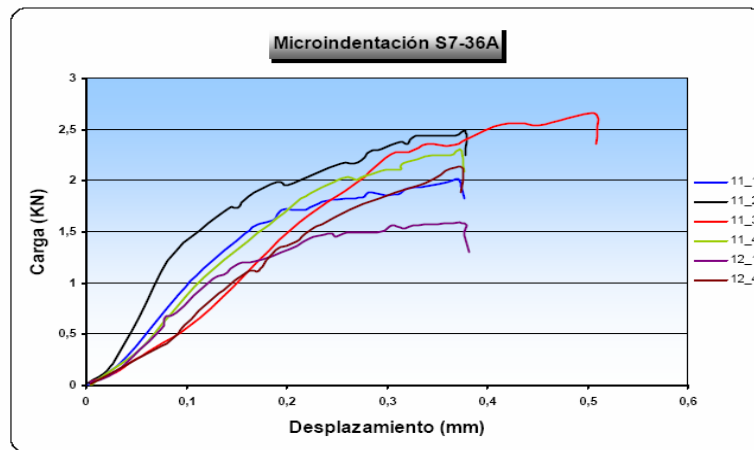


Fig. 48 Familia de curvas de Microindentación para la muestra S7-36A

Los resultados se presentan en la tabla 10 en donde también se muestran parámetros estadísticos. En la tabla 11 se muestra en resumen las muestras con el tipo de roca, formación, procedencia y valores de UCS así como los parámetros de microindentación. De esta tabla se sacan los datos que se muestran en forma dispersa en las gráficas de comparación 49 y 50. La figura 49 pertenece a la comparación entre UCS y CTF mientras que la figura 50 corresponde a la comparación entre UCS y IM. Un mejor resultado se lograra si se continúa alimentando la nube de puntos hasta conseguir un mejor ajuste de las curvas planteadas.

Tabla 10 Resultados parciales de Microindentación

<i>Parametros estadisticos de la prueba de Microindentación</i>								
Muestra	Fuerza Critica de Transicion (CTF)				Modulo de Microindentacion(IM)			
	Coefficient e de variacion	Varianza	Desviacion Estandar	Media	Coefficiente de variacion	Varianza	Desviacion estandar	Media
S7-23A	31,10447	0,11115	0,3333915	1,071844	28,7119398	3923813	1980,86161	6899,087
BA1	15,16277	0,095832	0,30956698	2,041625	11,6705674	794163,9	891,158722	7635,95
M30	16,38243	0,01761	0,13270316	0,810033	19,3312741	2691112	1640,46091	8486,046
MA1	3,002207	0,00563	0,07503215	2,499233	17,6154268	1868739	1367,01826	7760,347
S7-22A	18,83101	0,160308	0,44855947	2,382025	19,148271	2972317	1724,04096	9003,638
S7-25A	26,38303	0,187747	0,43329733	1,642333	33,8502907	8880443	2980,00719	8803,491
S7-36A	26,04416	0,186537	0,43189891	1,658333	22,1458073	4185883	2045,94314	9238,512

Tabla 11 Resultados preliminares de Microindentación. Detalles de procedencia

<i>Valores de UCS y Parametros de Microindentacion</i>						
Muestra	Tipo de roca	Formación	Origen del valor de UCS	UCS	Fuerza Critica de Transicion (CTF)	Modulo de Microindentación (IM)
S7-23A	caliza	Rosablanca	L.M.Rocas	20188	1,07184444	6899,087
BA1	Arenisca	Barco	L.M.Rocas	31204	2,041625	7635,95
M30	caliza		L.Civil	18528	0,81003333	8486,046
MA1	Arenisca	Mirador	L.M.Rocas	36204	2,49923333	7760,347
S7-22A	caliza	Tablazo	L.M.Rocas	32895,96	2,382025	9003,638
S7-25A	caliza	Rosablanca	L.M.Rocas	43383	1,64233333	8803,491
S7-36A	caliza	Rosablanca			1,65833333	9238,512

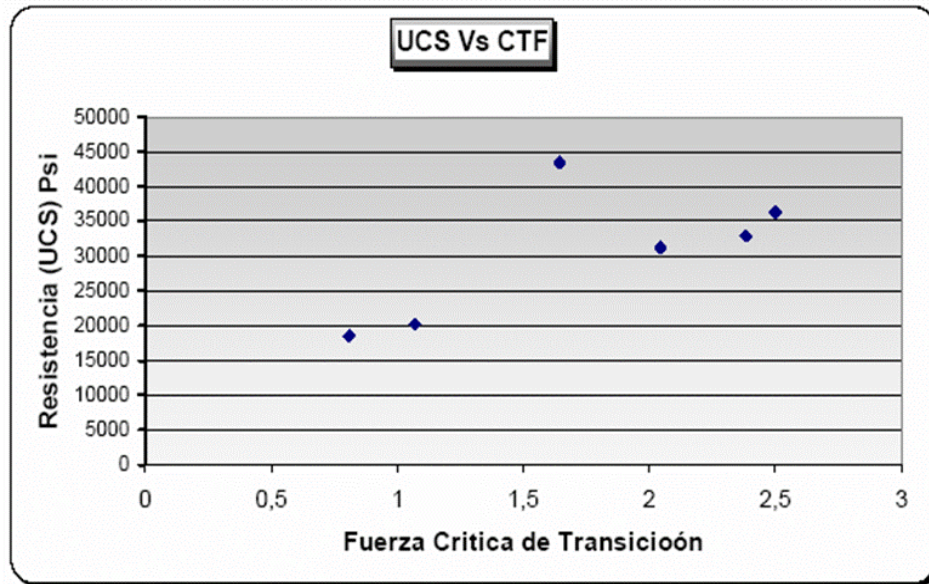


Fig. 49 Resistencia Compresiva Uniaxial Vs Fuerza Critica de Transición

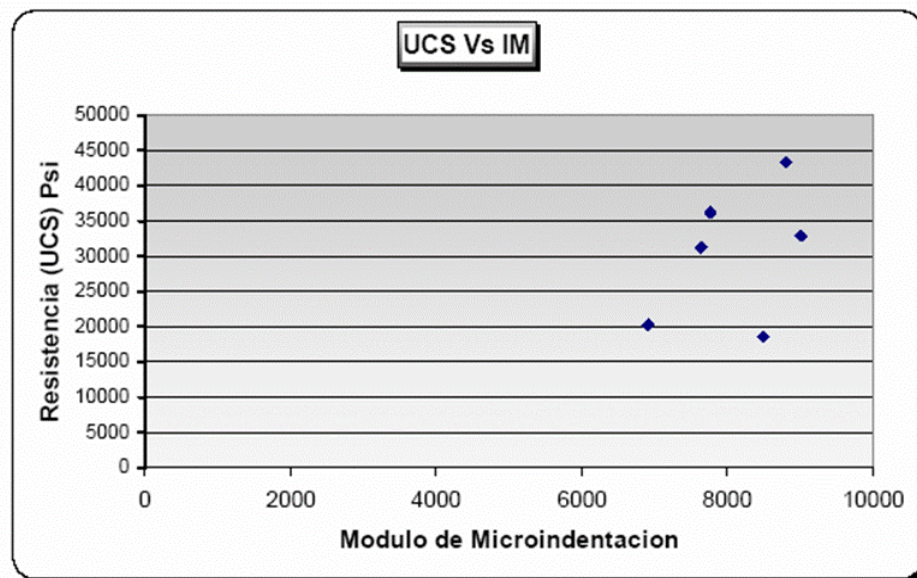


Fig. 50 Resistencia Compresiva Uniaxial Vs Modulo de Microindentación

Los resultados alcanzados en esta primera aproximación a la validación de la Microindentación muestran que los módulos de la prueba tienen relación con la resistencia de la roca, este hecho permite afirmar que es posible el desarrollo de correlaciones adecuadas. Sin embargo el planteamiento de una correlación es un proceso muy delicado, que incluye llevar a cabo una gran cantidad de pruebas, para conocer a fondo el comportamiento de las variables en estudio.

El uso de datos de laboratorio medidos de una muestra para definir el comportamiento de una población es una tarea que debe estar soportada por un número de datos suficientemente grande para asegurar que los valores inferidos sean fiables y se garantice con algún grado de confianza la validez de la medición.

Las consideraciones anteriores quedan resueltas si se realiza un buen diseño experimental de las pruebas involucradas.

4. PRUEBAS DE COMPRESIÓN INCONFINADA Y DE MICROINDENTACIÓN SOBRE MUESTRAS DE LA FORMACIÓN TAMBOR.

El planteamiento de una correlación requiere de un conocimiento claro y profundo de las variables involucradas, para tener valores confiables que garanticen en lo posible un resultado libre de efectos desconocidos que impidan obtener resultados ciertos después de implementar el uso de una correlación.

La validación de la Microindentación y el establecimiento de una correlación entre sus módulos y la Resistencia Compresiva Uniaxial no es ajena a la situación descrita es por esto que se hace necesario comprobar a fondo la relación que existe. Frente a este panorama se debe orientar esfuerzos con el objetivo de comprobar el nivel de sensibilidad de la Microindentación para detectar variaciones de resistencia. Hasta ahora se había hecho pruebas sobre rocas de diferente formación y litología, en donde los resultados mostraron que si es posible detectar la variación de la resistencia de las rocas con la prueba solo que los rangos de oscilación de la resistencia pasan los 2000 Psi como se observa en la tabla 11. Ahora se quiere hacer lo mismo, es decir medir la capacidad del ensayo para medir la resistencia pero esta vez en rocas del mismo tipo y formación, o en su defecto establecer el nivel de sensibilidad de la prueba y el tipo de distribución que tienen los datos, para esto se escogió la formación Tambor.

Otro de los beneficios de hacer suficientes pruebas sobre una formación en especial es que se da un valor agregado a los resultados que es el soporte estadístico.

Para cumplir con el objetivo descrito se plantea el desarrollo de pruebas de Compresión Uniaxial sobre 10 cilindros Figura 51 de la formación Tambor tomando muestras de cada uno de ellos para desarrollar las pruebas de Microindentación y así relacionar las variaciones de las dos pruebas. Los resultados que aquí se obtengan se toman como un primer dato en la correlación definitiva.

Con el objetivo de determinar la viabilidad del uso de la técnica se hacen pruebas de Compresión inconfiada para encontrar valores de resistencia en probetas estándar, junto con ensayos de Microindentación sobre muestras de los cilindros ensayados para comprobar la correspondencia de las dos pruebas, y de esta manera dar los primeros pasos hacia el planteamiento de una correlación entre las pruebas mencionadas.

Para hacer las pruebas de Microindentación se utilizó el equipo de prueba de materiales MTS-810, el cual hace parte del laboratorio de resistencia de materiales del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), para los valores de resistencia se hicieron pruebas en la cámara de compresión Triaxial del laboratorio de Mecánica de Rocas del ICP.

Utilizando los parámetros estadísticos obtenidos de las pruebas preliminares de Microindentación se calcula un número de pruebas $n=16$, garantizando que el 90% de los valores estará en el intervalo de confianza es decir el valor medio \pm un error esperado de 1480 N/mm. (Unidades del Modulo de Microindentación)

El análisis de los resultados permitirá observar que tanta correspondencia existe entre las dos pruebas para cada plug o en su defecto determinar a que tipo de distribución se ajustan mejor, y que tan representativo es el valor medio calculado para cada uno de los parámetros.

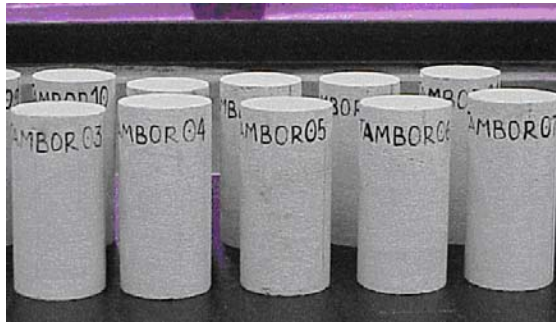


Fig 51 Especimenes de la formación Tambor

4.1 GENERALIDADES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.

En adelante se utilizará los términos muestra y población para referirse a un número de elementos escogidos aleatoriamente (Muestra) que representan el universo (población).

Cuando se quiere encontrar un intervalo de confianza para la media μ de una población con varianza σ^2 conocida utilizando la media muestral \bar{x} se puede partir de la siguiente definición:

Si \bar{x} es la media muestral de una muestra aleatoria de tamaño n de una población con varianza conocida σ^2 , un intervalo de confianza del $100(1-\alpha)\%$ esta dado por:

$$\bar{x} - Z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + Z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

donde $Z_{\alpha/2}$ es el punto de la distribución normal estándar que corresponde al porcentaje $\alpha/2$. En otras palabras, se garantiza que el $100(1-\alpha)\%$ de los datos se encuentra en intervalo de confianza, es decir la media mas o menos el error. Cuando se requiere encontrar el valor medio de una variable para una muestra se debe plantear una pregunta inicial ¿se conoce la desviación

estándar de la población?. Si la respuesta es afirmativa y la distribución es normal entonces el número de pruebas n se calcula fácilmente por medio de :

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

A partir de esta expresión puede definirse que si se utiliza la media de la muestra \bar{x} para estimar la media de la población μ puede tenerse una confianza del $100(1-\alpha)\%$ de que el error $|\bar{x} - \mu|$ no será mayor que una cantidad específica E cuando el tamaño de la muestra sea n, donde se conoce la varianza de la población σ^2 y $Z_{\alpha/2}$ es el punto de la distribución normal estándar que corresponde al porcentaje $\alpha/2$, σ es la desviación estándar y E es el máximo error esperado en la prueba.

Cuando el tamaño de las muestras es pequeño no se puede asumir que el intervalo de confianza para la media de la variable proviene de una distribución normal, entonces debe emplearse otro procedimiento. Para producir un intervalo de confianza válido debe hacerse una hipótesis más fuerte con respecto a la población de interés. La hipótesis es que la población está distribuida de manera normal, esto conduce a intervalos de confianza basados en distribuciones t

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde el error es

$$E = t_{\alpha/2, n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Cuando no se conoce la desviación estándar σ la selección del tamaño n de la muestra necesario para proporcionar un intervalo de confianza de la longitud requerida no es tan fácil como en el caso en que se conoce σ , debido a que la longitud del intervalo depende tanto del valor de σ (el cual no se conoce antes de recopilar los datos) como del tamaño de n de la muestra. Por otra parte n ingresa al intervalo de confianza a través de los términos $1/\sqrt{n}$ y $t_{\alpha/2, n-1}$. En consecuencia el tamaño n de la muestra debe obtenerse a partir de un procedimiento de prueba y error utilizando una estimación previa de σ (la cual puede basarse en la experiencia). Otra posibilidad es tomar una muestra preliminar de n observaciones para obtener una estimación de σ . Luego utilizando el valor calculado de s (desviación estándar de la muestra) a partir de esa muestra como aproximación de σ puede emplearse la ecuación de abajo para calcular el valor requerido de n que proporciona la exactitud y el nivel de confianza deseados.

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

La apariencia general de la distribución t es similar a la de la distribución normal estándar: ambas son simétricas y unimodales y el valor máximo de la ordenada se alcanza en la media $\mu = 0$ sin embargo la distribución t tiene colas mas amplias que la normal, esto es, la probabilidad de las colas es mayor que en la distribución normal. A medida que el número de grados de libertad aumenta la forma límite de la distribución t es la distribución normal estándar

Según lo planteado arriba, cada una de las pruebas pertenece a un caso. Por una parte el ensayo de compresión en donde no se conoce la desviación estándar σ y por otra la Microindentación, en donde se tiene una estimación de la desviación estándar σ obtenida en las pruebas preliminares. Los dos casos se presentan a continuación.

4.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA (UCS).

4.2.1 Diseño de la prueba Antes que nada se debe saber o en su defecto suponer que tipo de distribución tienen los datos. Y aquí surge la necesidad de decidir cual asumir pues no se sabe a ciencia cierta que colocación sigue la prueba de Compresión Inconfinada. Otro aspecto a tener en cuenta es el número de datos que exige cada distribución. Esto es, para asumir una distribución normal se debe contar por lo menos con 30 datos, mientras que la distribución t permite usar un n menor o igual a 30, que se ajusta mas pues se cuenta con 10 plugs para fallar, entonces se asume una distribución t para la prueba de compresión de la formación Tambor. Al seleccionar una distribución de ajuste también se esta seleccionando una forma de calcular el intervalo de confianza y el error.

4.2.2 Descripción de las Muestras Para este estudio, se trabajó con diez plugs de la Formación Tambor, de un afloramiento en la mesa de Ruitoque, Santander. Estos plugs fueron extraídos de una roca de superficie, la cual fue cortada o seccionada en cuatro partes como se muestra en la figura 52. De la “sección 1” se extrajeron 13 plugs de 1 ”de diámetro por 2” de longitud (ver figura 53), de los cuales se escogieron los diez para el presente estudio.



Figura 52. Roca de Superficie. Formación Tambor, Afloramiento

Ruitoque. Tomado de Caracterización geomecánica de la formación tambor.
ICP-USL Laboratorio de Mecánica de Rocas



Fig. 53 Grupo de plugs extraídos.

Se hicieron diez pruebas de Resistencia inconfiada. Los plugs trabajados para las pruebas de Resistencia inconfiada para encontrar la UCS de la formación Tambor fueron: Tambor 17, Tambor 18, Tambor 20, Tambor 22, Tambor 23, Tambor 25, Tambor 26, Tambor 28, Tambor 30. En la Tabla 12 se muestran el diámetro promedio de cada una de las muestras trabajadas el área y la porosidad.

Tabla 12 Dimensiones y porosidad de las muestras ensayadas

<i>Muestra</i>	<i>Diámetro mm</i>	<i>Área m2</i>	<i>Porosidad %</i>
tambor 16	25,142	0,0004965	10,400
tambor 17	25,110	0,0004952	10,800
tambor 18	25,010	0,0004913	11,100
tambor 20	25,542	0,0005124	8,800
tambor 22	25,230	0,0004999	10,700
tambor 23	25,920	0,0005277	10,700
tambor 25	25,548	0,0005126	11,100
tambor 26	25,534	0,0005121	11,700
tambor 28	25,276	0,0005018	10,900
tambor 30	25,210	0,0004992	11,000

4.2.3 Preparación de las Muestras Las muestras (Plugs), son recibidas del laboratorio de Análisis Petrofísicos Básicos donde son sometidas a un

proceso de limpieza, halladas sus propiedades básicas (porosidad y permeabilidad). En especial para las pruebas de compresión inconfiada las muestras deben ser sometidas al proceso de planitud de las caras¹⁶.

1. **Planitud de Caras:** Para llevar a cabo, cualquiera de las pruebas realizadas en el Laboratorio de Mecánica de Rocas, las caras de los plugs cilíndricos usados, deben ser perpendiculares a su eje longitudinal y lo suficientemente paralelos entre si, de manera que la máxima variación en la longitud del plug medida entre cualquiera de los puntos de una de sus caras, superior e inferior no sea mayor a 0.025 mm, para garantizar esto, las caras de los plugs son pulidas en el equipo EndFace Grinder (Figura 53), y el paralelismo entre sus caras medido usando un Comparador de Carátula suspendido sobre una Mesa de Mármol sobre la cual se desliza la muestra¹⁶ (Figura 54).



Fig. 53 EndFace Grinder



Fig. 54

Medición de Planitud

4.2.4 Descripción del Equipo MTS 815 (Celda Triaxial). Para la ejecución de estas pruebas se cuenta con el equipo “Rock Mechanics Test System Model 815 ”ubicado en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de ECOPETROL- ICP, el cual a continuación se describe (Figura 55):

1. **Marco de carga Modelo 815.02:** Es la estructura madre del sistema, sobre ella se arman las diferentes configuraciones que permiten realizar pruebas Uniaxiales, Triaxiales, Brazilian y Dureza de Fractura, esta estructura soporta toda la carga axial a la que es sometida una muestra (aprox. 345.000 Psi, para muestras de 1 ½”). La Figura 56, muestra una descripción detallada del marco de carga y en la Tabla 13 se presentan sus características generales

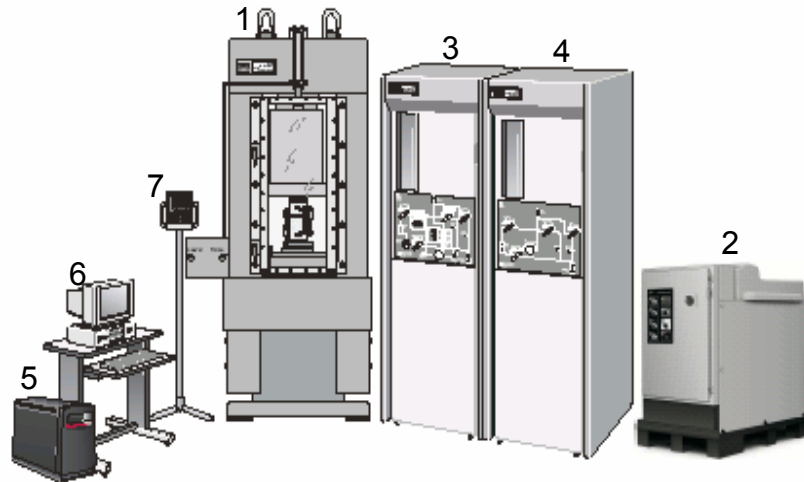


Fig. 55 Rock Mechanics Test System Model 815.

Tabla 13. Características Marco de Carga Modelo 815.

Marco de Carga Modelo 815.12 de MTS		
Resistencia(KN)		Carrera del Actuador
Compresión	Tensión	mm
2,700	1,350	100

2. **Unidad de Potencia Hidráulica (Modelo 505 SilentFlo):** Es la encargada de suministrar la potencia hidráulica a los componentes del sistema que lo requieren (Marco de Carga, Intensificador de Presión de Poro, Intensificador de Presión de Confinamiento). Su presión máxima de

salida es 3000 PSI a un caudal máximo de entrega de 26.5 Litros por minuto.

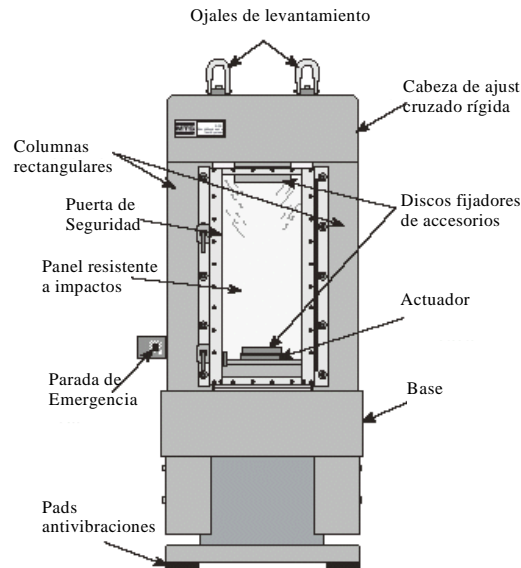


Fig. 56 Marco de Carga MTS Modelo 815.12

3. **Intensificador de Presión de Confinamiento (Modelo 286.20):** Sus funciones principales son, almacenar el fluido hidráulico usado como agente confinante en la Celda Triaxial e incrementar la presión suministrada por la Unidad de potencia de 3,000 Psi hasta valores de 20,000 Psi.
4. **Intensificador de Presión de Poro (Modelo 286.30):** Sus funciones principales son, almacenar el fluido usado para llenar y presurizar el volumen poroso de la muestra e incrementar la presión suministrada por la Unidad de potencia de 3,000 Psi hasta valores de 12,000 Psi.
5. **Caja de Controladores Digitales:** En esta se ubican las tarjetas controladoras de todas las unidades del “Rock Mechanics Test System Model 815”, sirve como puente de comunicación entre tarjetas y como

interfase con la estación de control remoto y el computador administrador del sistema.

- 6. Computador:** Permite el control automático del equipo y desde el se controlan todas las funciones del “Rock Mechanics Test System Model 815” a través del software Test StarII.

- 7. Estación de Control Remota:** Es una caja de controles para la manipulación manual del equipo y generalmente se ubica cerca del Marco de Carga, controla las funciones básicas del “Rock Mechanics Test System Model 815” ¹⁶.

4.2.5 Procedimiento de la prueba de Compresión Inconfinada. Para la realización de esta prueba, la muestra es preparada tal como se indica en el ítem 1 de la sección “Preparación de la Muestra”.

1. Primero se ubica el plug en la celda de carga, ubicando un endcap en cada extremo del plug. Ver Figura 57.

2. Se ubica el collar de la celda sobre el endcap superior. Para esto se baja el collar sin que se toquen en algún punto para ajustar manualmente la rotula de tal manera que las dos superficies queden haciendo contacto completamente paralelas.

3. Se cierra la ventana de seguridad y se empieza aplicar carga, con una velocidad de 0.0017mm/sec sobre el plug hasta que sucede la falla, que se presenta alrededor de los 35 minutos después de comenzada la aplicación de la carga.

4. los datos son almacenados en el computador y luego se utilizan para encontrar la carga máxima aplicada que es la Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS). Dada en Psi como aparece en la [tabla 14](#). En donde se presentan los resultados de Resistencia Compresiva Uniaxial para los 10 especímenes de roca fallados.

4.2.6 Resultados la prueba de Compresión Inconfinada. Los resultados de las pruebas de compresión inconfinada se presentan en la [tabla 14](#). La desviación estándar y la media en la [tabla 15](#). Nótese que la dispersión de los datos de UCS es relativamente alta, lo cual aumenta el error, incrementándose la longitud del intervalo de confianza. Los especímenes fallados se observan en las figuras 58,59,

Tabla 14 Resultados de la prueba de Compresión Inconfinada

Muestra	Prueba	Carga Máx KN	Diámetro mm	Área m2	UCS Kpa	UCS Psi	Porosidad %
tambor 16	1	54,026852	25,142	0,00049647	108822,861	15786.45	10,4
tambor 17	2	44,314774	25,11	0,0004952	89488,0886	12979,1734	10,8
tambor 18	3	32,495022	25,01	0,00049127	66145,3883	9593,59483	11,1
tambor 20	4	60,790459	25,542	0,00051239	118641,257	17207,4907	8,8
tambor 22	5	48,269562	25,23	0,00049995	96549,2658	14003,3124	10,7
tambor 23	6	38,11161	25,92	0,00052767	72226,6413	10475,6076	10,7
tambor 25	7	37,381748	25,548	0,00051263	72921,553	10576,3962	11,1
tambor 26	8	42,447422	25,534	0,00051207	82894,1208	12022,7975	11,7
tambor 28	9	49,527988	25,276	0,00050177	98706,1269	14316,1392	10,9
tambor 30	10	44,02877	25,21	0,00049916	88206,5793	12793,3059	11



Fig. 58 Especímenes después de la prueba de Compresión Inconfinada

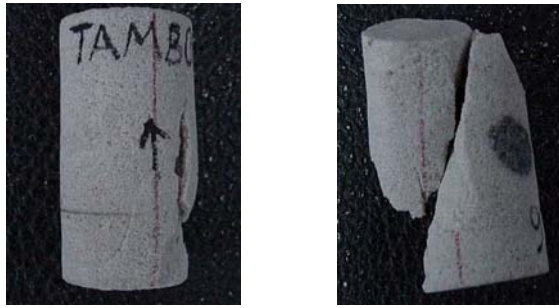


Fig. 59 Especímenes después de la prueba de Compresión Inconfinada

En la Figura 60 se compara la UCS contra la porosidad y puede observarse que a menor porosidad hay mayor resistencia

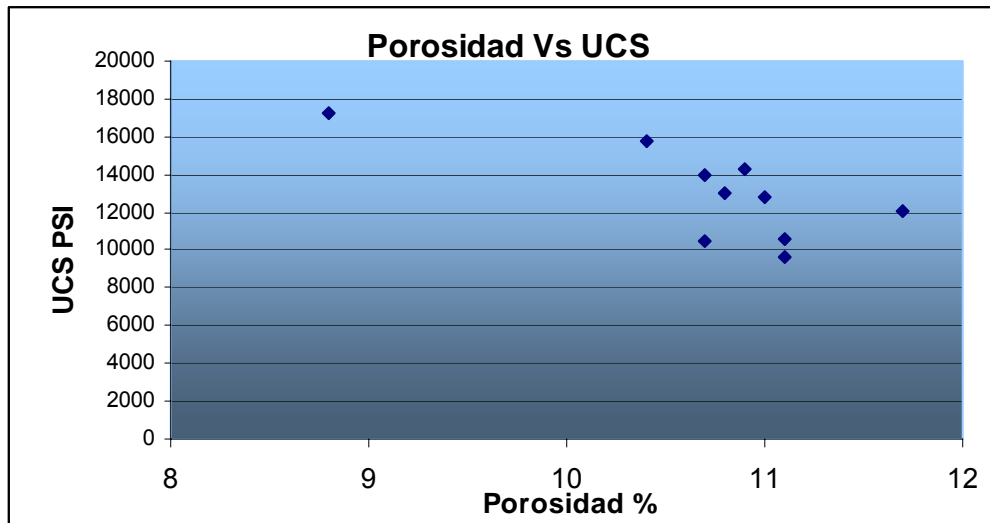


Fig. 60 Porosidad Vs UCS para los especímenes de la formación Tambor ensayados

A partir de los datos obtenidos, más exactamente de la desviación estándar se puede recalcular el valor de n para pruebas futuras (ver tabla 15) utilizando la siguiente expresión .

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

En donde se recalcula el n para dos valores diferentes de σ . 2427.4205 para la totalidad de los valores de UCS y 1733.5075 eliminando el valor de UCS de la muestra Tambor 20.

Tabla 15. Numero de pruebas de compresión n recalculado

Pruebas	Desviación	Promedio	n para E = 500 Psi	n para E = 1000Psi
10	2427,4205	12975,1268	90	23
9	1733,50758	12663,0909	46	12

En esta tabla se puede notar como el numero de pruebas n es sensible a la variación del error esperado y a la desviación estándar.

El intervalo de confianza se calcula como sigue:

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$12975 - 1404.74 \leq \mu \leq 12975.1268 + 1404.74$$

$$11570 \leq \mu \leq 14397$$

Los valores calculados corresponden a una desviación estándar de 2427.42.

4.3 ENSAYO DE MICROINDENTACIÓN.

4.3.1 Diseño de la prueba De las pruebas preliminares de Microindentación cuyos resultados se presentaron en el numeral 3.4.7 se obtuvieron los parámetros estadísticos para cada una de las muestras ensayadas. Teniendo en cuenta que el numero de ensayos n depende del valor de la desviación estándar, se toma la mayor de las desviaciones estándar para ser conservativos, la cual fue de 2980 N/mm para el módulo de Microindentación

tomando un error esperado de 1480N/mm se obtiene un $n = 16$, lo que quiere decir que como mínimo debe hacerse 16 pruebas de microindentación sobre cada muestra de roca para garantizar que el 90% de los datos estará en el intervalo de confianza $1480 < \mu < 1480$. Aquí lo que se hace es afinar el número de pruebas. Es decir, las pruebas preliminares se hicieron con un n no calculado, a partir de la desviación estándar de la muestra s se supone una desviación estándar de la población σ . Este proceso bien podría hacerse sucesivamente de tal manera que cada vez se tendría una desviación estándar de la muestra más cercana al de la población.

4.3.2 Resultados de las pruebas de Microindentación. Los aspectos relacionados con la prueba de Microindentación se trataron a fondo en el numeral 3.3 Los fragmentos de roca sacados de los especímenes de la formación tambor se montaron en la resina de encapsulamiento, como aparece en la figura 61.

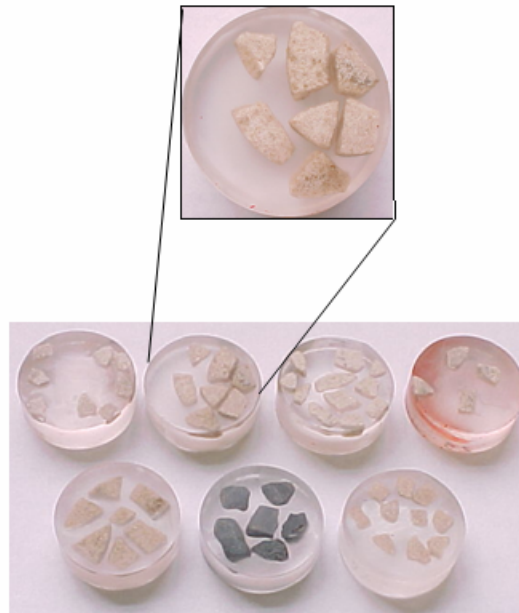


Fig. 61 Fragmentos de roca de la formación tambor montados en la resina de encapsulamiento

El número de pruebas por fragmento de roca depende principalmente del tamaño de este, así, para fragmentos con 4mm de diámetro en planta o más se hicieron 2 indentaciones. Una huella típica hecha por el indentador en la roca es la que aparece en la Figura 62



Fig. 62 Huella hecha por el indentador en la roca. Diámetro 1mm.

A continuación se presenta los resultados de las pruebas de Microindentación para cada muestra de la formación tambor en tablas con el cálculo del Módulo de Microindentación (IM) y la fuerza Crítica de transición (CTF) promedio (Tablas 16-29). Las familias de graficas de las pruebas para cada una de las muestras se presentan en los anexos 1-7

Tabla 16. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 30

MICROINDENTACIÓN TAMBOR 30						
Prueba	x2	y2	x1	y1	IM	CTF
3017	0,1871	0,6502	0,06042	0,2229	3373,06599	0,6502
3018	0,1388	0,6422	0,026	0,1299	4541,66667	0,6422
3019	0,1011	0,4461	0,01678	0,153	3476,04364	0,4461
3021	0,177	0,8832	0,065	0,2742	5437,5	0,8832
3022	0,1443	0,8144	0,04112	0,2631	5343,08975	0,8144
3023	0,1464	0,8127	0,037	0,2591	5060,32907	0,8127
3026	0,1623	1,0255	0,053	0,3753	5948,76487	1,0255
3027	0,214	0,9557	0,1183	0,4216	5580,98224	0,9557
3031	0,167	0,7117	0,04322	0,2316	3921,47358	0,7117
3032	0,2194	0,8033	0,074	0,2776	3615,54333	0,8033
3033	0,164	0,9527	0,05455	0,4525	4570,12334	0,9527

3016	0,159	0,8181	0,05958	0,2762	5450,61356	0,8181
3011	0,2001	0,6663	0,057	0,2128	3169,11251	0,6663
3012	0,1791	0,5884	0,036	0,1597	2995,80713	0,5884
3013	0,1397	0,6072	0,034	0,2054	3801,3245	0,6072
3014	0,1582	0,6475	0,03986	0,1738	4002,87308	0,6475
3015	0,1602	0,7194	0,036	0,2742	3584,54106	0,7194

Tabla 17 Estadísticos Muestra Tambor 30

Parámetro	IM	CTF
Coef Variación(%)	22,0713811	20,3465819
Varianza	919879,494	0,0232862
Desviación estándar	959,103485	0,15259817
Media	4345,46202	0,74999412

Tabla 18. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 28

MICROINDENTACIÓN TAMBOR 28						
Prueba	x2	y2	x1	y1	IM	CTF
2811	0,1418	0,6005	0,048	0,3323	2859,27505	0,6005
2812	0,1537	1,0923	0,05077	0,4421	6316,91441	1,0923
2813	0,1951	0,6364	0,095	0,2544	3816,18382	0,6364
2814	0,1623	0,8164	0,063	0,3068	5131,92346	0,8164
2815	0,1317	0,9366	0,036	0,3947	5662,48694	0,9366
2822	0,1456	0,7056	0,0465	0,2289	4810,29263	0,7056
2831	0,1506	0,9493	0,047	0,4159	5148,64865	0,9493
2832	0,1653	0,9164	0,05161	0,425	4322,27988	0,9164
2833	0,1665	1	0,05119	0,5038	4303,18272	1

Tabla 19 Estadísticos Muestra Tambor 28

Parámetro	IM	CTF
Coef Variación(%)	21,7780526	20,0613059
Varianza	1051221,75	0,02910406
Desviación estándar	1025,29106	0,17059912
Media	4707,90973	0,85038889

Tabla 20. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 26

MICROINDENTACIÓN TAMBOR 26						
Prueba	x2	y2	x1	y1	IM	CTF
311	0,2803	1,6563	0,1275	0,7308	6056,93717	1,6563
312	0,3806	2,1075	0,1829	0,9849	5678,30046	2,1075
313	0,3822	1,1407	0,2114	0,4166	4239,46136	1,1407
314	0,2261	1,3035	0,09609	0,5958	5443,42743	1,3035
315	0,2702	1,7963	0,1116	0,8785	5786,88525	1,7963
316	0,2593	1,7124	0,1086	0,7019	6705,37492	1,7124
317	0,3361	1,9971	0,1938	1,1511	5945,18623	1,9971
318	0,2349	1,4844	0,089	0,5156	6640,1645	1,4844
319	0,3961	2,125	0,1682	0,8523	5584,46687	2,125
3110	0,355	2,51	0,154	1,1998	6518,40796	2,51

Tabla 21 Estadísticos Muestra Tambor 26

Parámetro	IM	CTF
Coef Variacion(%)	12,3542336	23,2670855
Varianza	524090,486	0,17216408
Desviacion estandar	723,940941	0,41492659
Media	5859,86121	1,78332

Tabla 22. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 23

MICROINDENTACIÓN TAMBOR 23						
Prueba	x2	y2	x1	y1	IM	CTF
2311	0,1288	0,4599	0,03105	0,1473	3197,95396	0,4599
2312	0,1061	0,6069	0,02973	0,2991	4030,37842	0,6069
2313	0,09231	0,6589	0,0214	0,3393	4507,1217	0,6589
2314	0,1829	0,7157	0,07511	0,3125	3740,60674	0,7157
2321	0,1548	0,6949	0,04238	0,2803	3687,95588	0,6949
2322	0,2614	0,7909	0,1174	0,3105	3336,11111	0,7909
2323	0,2412	0,7388	0,1065	0,3155	3142,53898	0,7388
2331	0,2811	1,0148	0,1267	0,4176	3867,87565	1,0148
2332	0,2463	1,03195	0,1212	0,5978	3470,42366	1,03195
2333	0,2547	0,8093	0,12	0,3518	3396,43653	0,8093
2334	0,3453	1,1195	0,1598	0,5247	3206,469	1,1195
2335	0,2626	0,9621	0,1145	0,4182	3672,51857	0,9621
2336	0,1883	0,606	0,09231	0,2937	3253,4639	0,606
2341	0,2467	1,0433	0,1141	0,5925	3399,69834	1,0433
2343	0,1724	0,7946	0,054	0,4427	2972,12838	0,7946
2342	0,2257	0,9933	0,1	0,4766	4110,58075	0,9933
2344	0,1951	0,7429	0,08854	0,4135	3091,21622	0,7429
2345	0,1909	0,7039	0,09	0,3145	3859,2666	0,7039
2346	0,2102	0,8332	0,08266	0,3934	3448,32994	0,8332
2347	0,2198	0,5646	0,1128	0,3528	1979,43925	0,5646
2348	0,2496	0,8093	0,1099	0,3286	3440,94488	0,8093

Tabla 23 Estadísticos Muestra Tambor 23

Parámetro	IM	CTF
Coef Variación(%)	14,7229322	22,2545953
Varianza	260585,048	0,03130118
Desviación estándar	510,475316	0,17692138
Media	3467,21231	0,7949881

Tabla 24. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 22

MICROINDENTACIÓN TAMBOR 22						
Prueba	x2	y2	x1	y1	IM	CTF
221	0,2891	1,091	0,1296	0,3988	4339,81191	1,091
222	0,266	1,1168	0,09861	0,29	4939,36316	1,1168
223	0,2051	1,02826	0,08	0,379	5189,92806	1,02826
224	0,2249	1,2538	0,077	0,4333	5547,66734	1,2538
225	0,2337	1,2008	0,09735	0,5247	4958,56252	1,2008
226	0,1741	0,9852	0,06462	0,4951	4476,61673	0,9852
227	0,2421	1,2652	0,1074	0,623	4767,63177	1,2652
228	0,2635	1,2145	0,1195	0,5193	4827,77778	1,2145
229	0,2702	1,0141	0,1132	0,3796	4041,40127	1,0141
2210	0,2576	1,1256	0,1023	0,4196	4546,03992	1,1256

Tabla 25 Estadísticos Muestra Tambor 22

Parámetro	IM	CTF
Coef Variación(%)	9,12497683	8,96187416
Varianza	188934,923	0,01024684
Desviación estándar	434,666451	0,1012267
Media	4763,48005	1,129526

Tabla 26. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 17

MICROINDENTACIÓN TAMBOR 17						
Prueba	x2	y2	x1	y1	IM	CTF
17_1_1	0,3075	1,2357	0,1045	0,4324	3957,14286	1,2357
17_1_2	0,3823	1,5341	0,1942	0,7852	3981,39288	1,5341
17_1_3	0,4603	2,0481	0,1439	0,661	4384,00759	2,0481
17_1_4	0,3054	1,8144	0,08896	0,5673	5761,87396	1,8144
17_1_6	0,4074	2,2059	0,1498	0,8963	5083,85093	2,2059
17_1_7	0,4351	2,2814	0,154	0,8167	5210,60121	2,2814
17_1_8	0,4015	2,4281	0,1439	0,8127	6270,96273	2,4281

17_1_9	0,3302	2,2586	0,1548	0,946	7483,46636	2,2586
17_1_10	0,4301	2,557	0,1531	0,9147	5928,88087	2,557
17_1_11	0,4519	2,657	0,1875	0,8614	6791,22542	2,657
17_1_12	0,3831	2,3029	0,1472	0,757	6553,20051	2,3029
17_1_13	0,3848	2,4338	0,1816	1,07	6711,61417	2,4338
17_1_14	0,3936	2,4727	0,1338	0,9305	5936,1047	2,4727
17_1_15	0,3835	2,5456	0,1691	1,1162	6666,97761	2,5456
17_1_16	0,4129	1,75	0,2274	0,814	5045,8221	1,75

Tabla 27 Estadísticos Muestra Tambor 17

Parámetro	IM	CTF
Coef Variación(%)	18,8487466	19,0548749
Varianza	1161513,14	0,17071525
Desviación estándar	1077,73519	0,41317701
Media	4288,3562	1,626265

Tabla 28. Resultados pruebas de Microindentación. Muestra Tambor 16

MICROINDENTACIÓN TAMBOR 16						
Prueba	x2	y2	x1	y1	IM	CTF
1611	0,1351	0,7889	0,0428	0,2974	5325,02709	0,7889
1612	0,399	0,7506	0,3218	0,3863	4718,91192	0,7506
1622	0,1107	0,6455	0,04699	0,3565	4536,17956	0,6455
1631	0,1493	0,8711	0,06839	0,4344	5397,35509	0,8711

Tabla 29 Estadísticos Muestra Tambor 16

Parámetro	IM	CTF
Coef Variación(%)	8,63176145	12,2577458
Varianza	185848,906	0,00877074
Desviación estándar	431,101967	0,09365224
Media	4994,36841	0,764025

Los valores de los parámetros de Microindentación son el promedio del total de las pruebas realizadas sobre las diferentes muestras (ver tabla 30)

Tabla 30 Estadísticos Muestra Tambor 16

Muestra	UCS Psi	IM	CTF
tambor 17	12 979,17	4288,3562	1,6263
tambor 18	9 593,59		
tambor 20	17 207,49		
tambor 22	14 003,31	4763,4800	1,1295
tambor 23	10 475,61	3467,2123	0,7950
tambor 25	10 576,40		
tambor 26	12 022,80	4315,1000	1,7832
tambor 28	14 316,14	4707,9097	0,8504
tambor 30	12 793,31	4345,4620	0,7500
Tambor 16	15 786,45	4994,3684	0,7640
Barco	31 204,00	7635,0000	2,0400
Mirador	36 204,00	7760,0000	2,4900

Al comparar los resultados obtenidos para el módulo de Microindentación IM con el UCS se observa una tendencia bien marcada (figura 63). Lo cual indica que existe una muy buena correspondencia entre los dos ensayos.

Esta observación tiene unas implicaciones muy importantes en relación a que si es posible desarrollar una correlación entre los resultados de las dos pruebas incluso con un nivel de precisión bastante alto.

Para ello debe seguirse investigando en esa dirección haciendo muchas mas pruebas siguiendo el procedimiento utilizado.

Por lo tanto seria muy apropiado llevar a cabo pruebas para diferentes tipos de litología por separado e intentar desarrollar correlaciones para cada tipo de roca. Por ejemplo plantear correlaciones diferentes para Areniscas, Calizas y Shales.

Otra observación importante es que a partir de los resultados obtenidos se puede concluir que muy posiblemente los cilindros ensayados tenían alteraciones en su comportamiento mecánico de ahí que la dispersión de los

datos de resistencia sea tan alta, esto producido muy posiblemente por el intemperismo ya que las muestras fueron tomadas de la mesa de Ruitoque (Santander) en donde tiene afloramiento la formación Tambor.

Para estudiar este fenómeno y comprobar aun más la correspondencia entre las dos pruebas deberá estudiarse la cimentación que tienen los plugs ensayados ya que este factor puede afectar bastante la resistencia de la muestra de roca. Esto deberá hacerse por medio del estudio de secciones delgadas

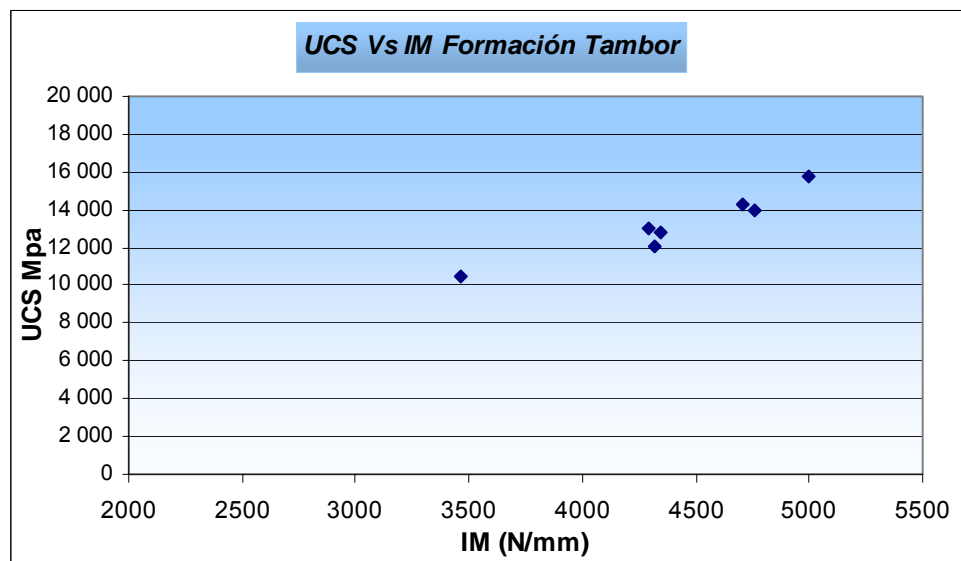


Fig. 63 Comparación entre IM y UCS formación Tambor.

Aprovechando el hecho de que dentro de las pruebas preliminares se hicieron pruebas sobre las formaciones Barco y Mirador, se incluyen en la grafica de comparación y se obtiene la figura 64.

Estas graficas no son mas que comparaciones iniciales, que permiten ver que esta ocurriendo con los resultados, en ningún momento se esta planteando correlación alguna.

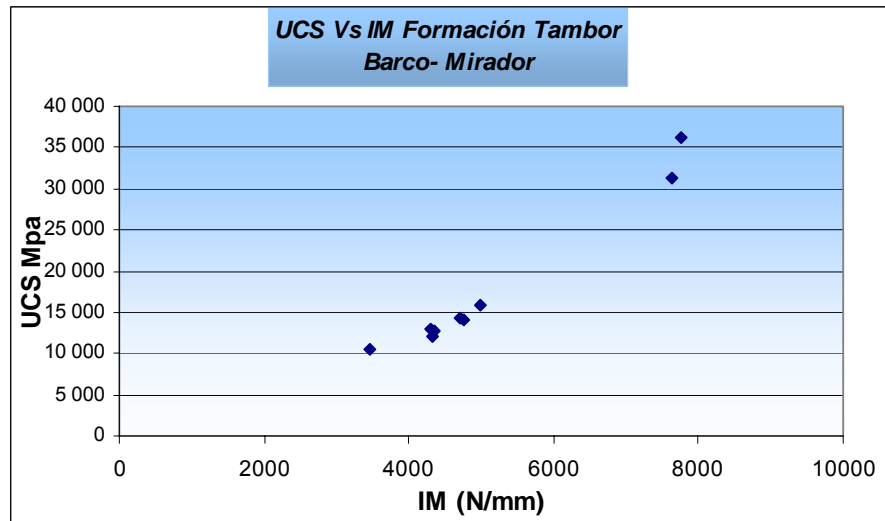


Fig. 64 Comparación entre IM y UCS formación Tambor, Barco y Mirador

Al comparar los resultados obtenidos para La Fuerza Crítica de Transición observamos que la tendencia no es tan marcada como en el caso de UCS Vs IM. (Ver figuras 65 y 66)

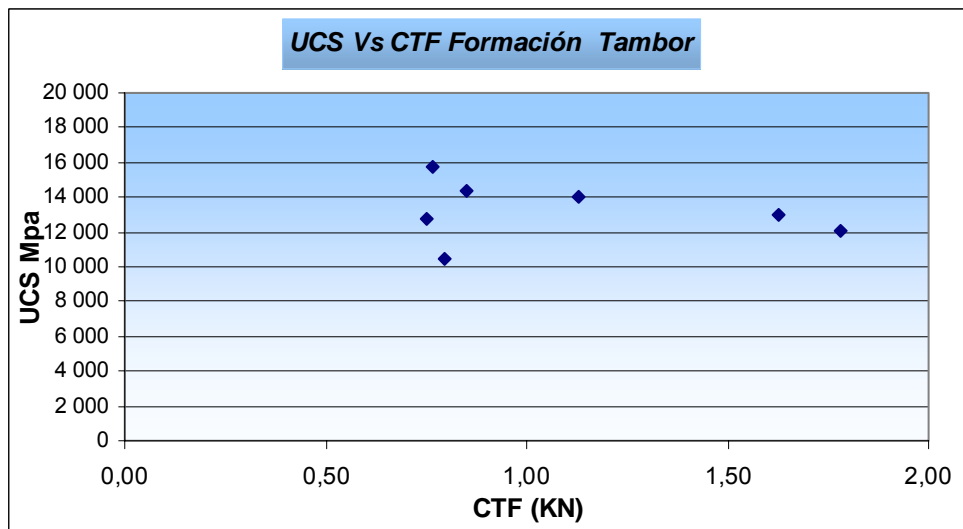


Fig. 65 Comparación entre CTF y UCS formación Tambor.

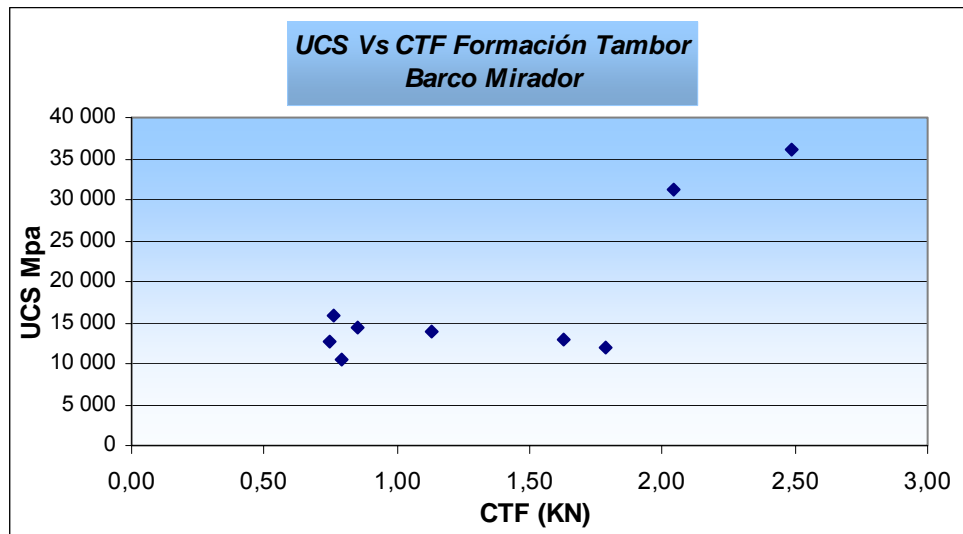


Fig. 66 Comparación entre CTF y UCS formación Tambor, Barco y Mirador

No obstante debe seguir calculándose la fuerza Crítica de Transición en cada una de las pruebas futuras con el fin de aumentar la densidad de la nube de puntos y lograr una mejor visualización de la tendencia, ya que de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares la tendencia más marcada se observó en la comparación de UCS Vs CTF.

CONCLUSIONES

Para encontrar una correlación entre la resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) y los parámetros de microindentación de una litología determinada es necesario llevar a cabo un procedimiento experimental que incluya pruebas de Resistencia Inconfinada y al mismo tiempo pruebas de Microindentación sobre grupos de especímenes de roca en los que exista variaciones en el comportamiento mecánico y axial comprobar que los resultados observados en una de las pruebas son reflejados en la otra.

En cualquiera de los dos ensayos, a medida que se incrementa en número de pruebas se disminuye el error y por consiguiente la longitud del intervalo de confianza para los valores medios de los parámetros buscados. La desviación estándar hallada en cada una de las pruebas debe utilizarse para recalcular el valor n de pruebas futuras.

El comportamiento mecánico de los indentadores se mejoró substancialmente con el tratamiento térmico aplicado, no obstante para disminuir el número de indentadores utilizados sería aconsejable utilizar un indentador de alta dureza superior a 60 RocwellC.

La búsqueda de correlaciones entre propiedades mecánicas de las rocas y parámetros de pruebas de dureza superficial como Dureza Brinell, Rocwell, Microdureza Vickers es un campo que no se ha explorado en profundidad, sería interesante dirigir esfuerzos hacia su desarrollo pero enfocando la investigación al estudio de una formación en particular.

Para asegurar que las partículas de roca tengan un soporte lateral adecuado, la altura del disco no debe ser menor de 10mm y los fragmentos no deben cubrir mas de cuatro mm de esta altura para evitar la propagación de fallas tensiles, que lleven a la fractura de la probeta, axial mismo la superficie superior de la probeta no deberá tener menos del 60% de área de resina.

RECOMENDACIONES

Una buena manera de continuar con la investigación es desarrollar correlaciones para diferentes tipos de roca, cada tipo de roca a su vez tiene un intervalo de resistencias que deben ser definidas con la prueba de compresión incofinada y comprobadas con Microindentación.

Se recomienda seguir trabajando en el desarrollo de las correlaciones, empleando la metodología utilizada sobre la formación Tambor, pero es necesario incluir pruebas sobre areniscas de diferentes propiedades tanto mecánicas como petrofísicas para observar la tendencia marcada por los parámetros en estudio

Se recomienda profundizar en la investigación sobre la conveniencia del uso del metacrilato como resina de encapsulamiento, que porcentaje del fragmento es invadido y en función de que variables aumenta su efecto. Se debe encontrar las proporciones adecuadas de mezclado en peso o en volumen para garantizar una dosificación óptima, que permita una manipulación adecuada de la resina pero que no afecte la respuesta mecánica de la roca por invasión de su espacio poroso.

El equipo de prueba de materiales MTS_810 es apto para hacer las pruebas de Microindentación, sin embargo se como la Técnica tiene su mayor potencial en el uso directamente en perforación se recomienda diseñar y construir un equipo de Microindentación que sea compacto y portátil, o en su defecto adquirir un **Heavy Duty Texture- Analyzer** (HD-TA) Fabricado por La empresa **Stable Microsystem** de Inglaterra o uno similar.

NOMENCLATURA UTILIZADA

UCS	= Resistencia Compresiva Uniaxial Mpa
CTF	= Fuerza Crítica de Transición. (N)
IM	= Módulo de Microindentación. N/mm
E	= Módulo de Young. MPa.
ν	= Relación de Poisson.
G	= Módulo de rigidez. MPa.
P	= Carga Aplicada.
A	= Área Transversal
σ_1	= Esfuerzo principal máximo. MPa
σ_2	= Esfuerzo principal intermedio. MPa.
σ_3	= Esfuerzo principal mínimo. MPa
σ_t	= Resistencia tensíl. MPa.
τ_s	= Resistencia a la cizalladura. MPa.
φ	= Ángulo de fricción interna. Grados.
c, τ_o	= Cohesión de la roca. MPa
ε_1	= Deformación normal en la dirección X.
ε_3	= Deformación radial dirección r
$I_{s(50)}$	= Punto índice de resistencia de carga corregido
De	= Diámetro equivalente del corazón.
N_{Br}	= Numero de dureza Brinell
HVN	= Numero de dureza Vickers.
E_{dyn}	= Módulo de Young dinámico Mpa
σ_{yield}	= Esfuerzo de cadencia .Mpa

REFERENCIAS

1. Robert Hack and Marco Huisman "Estimating the intact rock strength of a Rock by simple means".
2. FJAER E., and RASMUS R. "Petroleum Related Rock Mechanics", 1996.
3. ASTM Designation: D 2938 – 95 (Reapproved 2002). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens
4. ASTM Designation: D 2664. Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of undrained rock core Specimens Without pore pressure measurements.
5. Artículo "Mecánica de rocas". Propiedad del laboratorio de Mecánica de rocas ICP.
6. ASTM Designation D 3148-02. Standard test method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Especímen in Uniaxial Compression.
7. Allen W. Hatheway and George A. Kiersch. "Ingeniering Properties of Rock"
8. Santarelli, F.J., Marshala, A.F., Brignoli, M., Rossi E. and Bona N: "Formation Evaluation from Logging on Cuttings". Paper SPE 36851, Proc. Eur. Petrol. Conf. (Milano), 1996.
9. V. Uboldi, SPE, ENI SpA, L.Civolani, SPE, Smith International, and F. Zausa, "Rock Strength Measurements on Cutting as input data for Optimizing Drill Bit Selection" SPE, ENI SpA 56441
10. Ringstad, C., Lofthus, E.B., Sønstebø, E.F., Fjær, E., Zausa, F. and Giin-Fa Fuh: "Prediction of Rock Parameters from Micro-Indentation Measurements: The Effect of Sample Size". Paper SPE 47313 EUROCK '98, Trondheim 8-10 July 1998.
11. Zausa, F., Civolani, L., Brignoli, M. and Santarelli, F.J.: "Real time wellbore stability analysis at the rig-site". Paper SPE/IADC 37670 -Drilling Conference, Amsterdam 4-6- March 1997.

12. Lofthus, E.B.: "The Effect of Rock Thickness on Micro-Indentation". Student Report submitted to the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, 1997.

13 ASTM Designation: E 384 – 99e Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

14. ASTM E-18 Designation: E 18 – 03 Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials

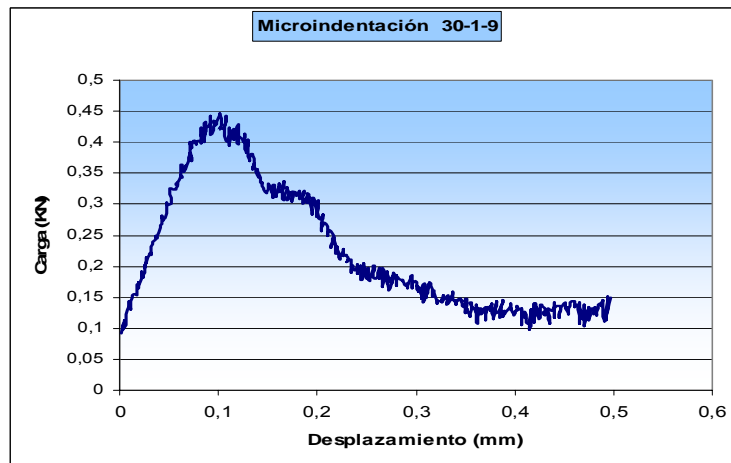
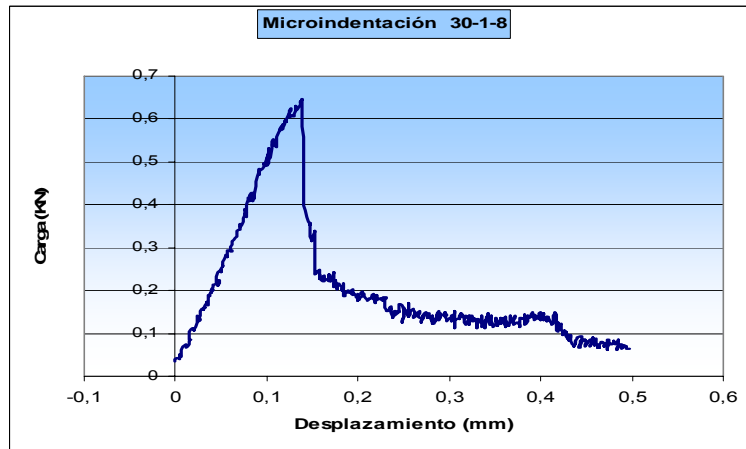
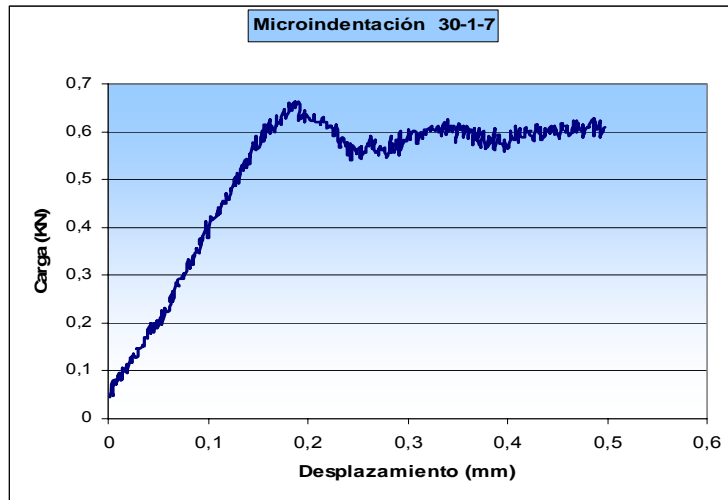
15 Juárez Badillo, Rico Rodríguez. "Mecánica de suelos Tomo 1 Fundamentos de la mecánica de suelos".

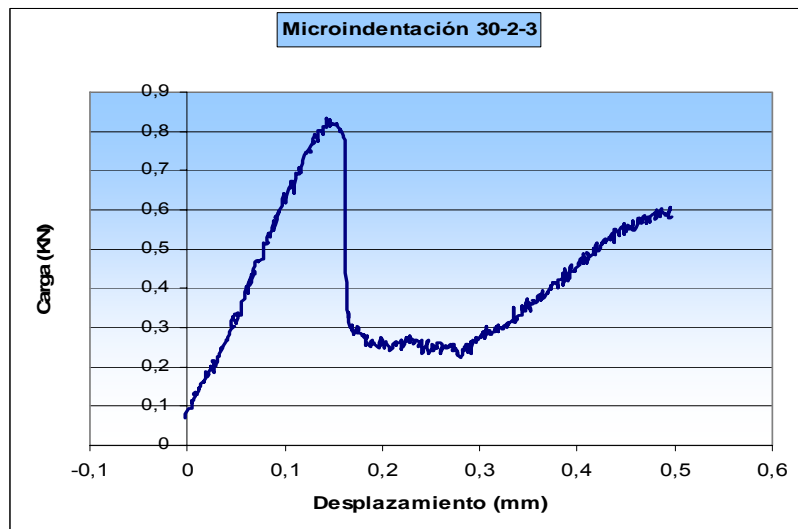
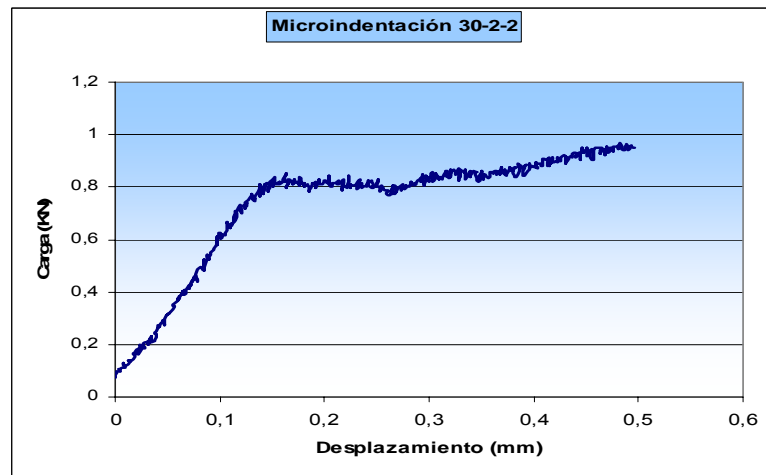
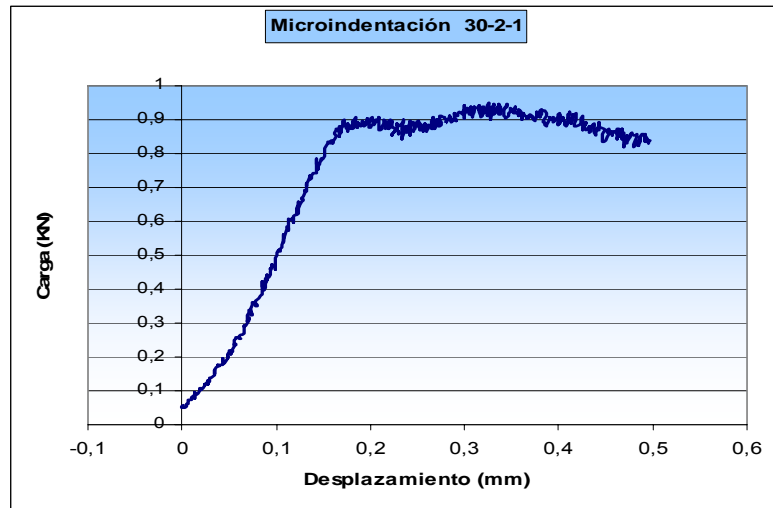
16 Caracterización geomecánica de la formación tambor. ICP-USL Laboratorio de Mecánica de Rocas.

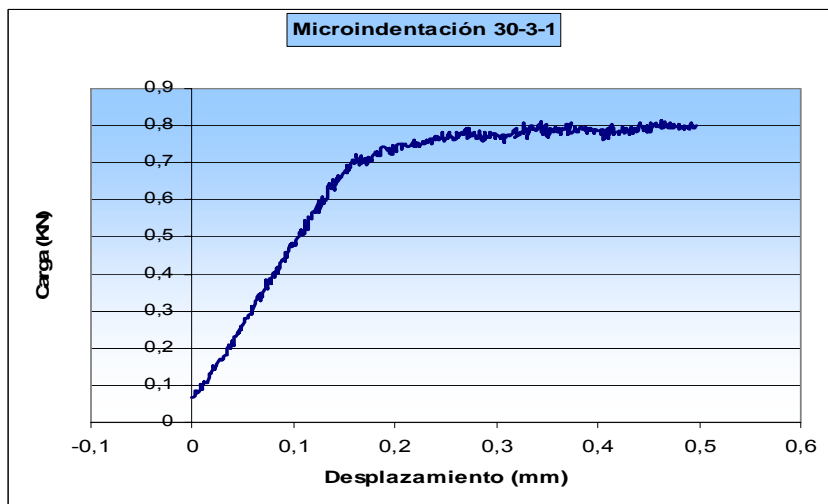
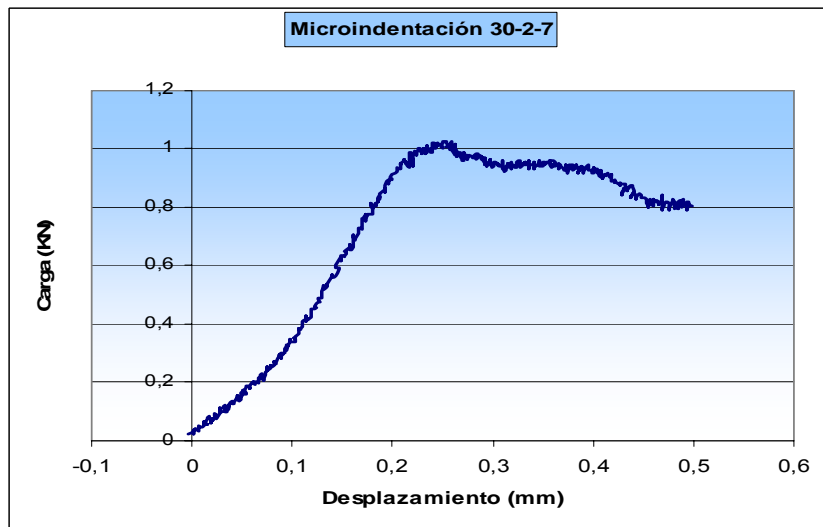
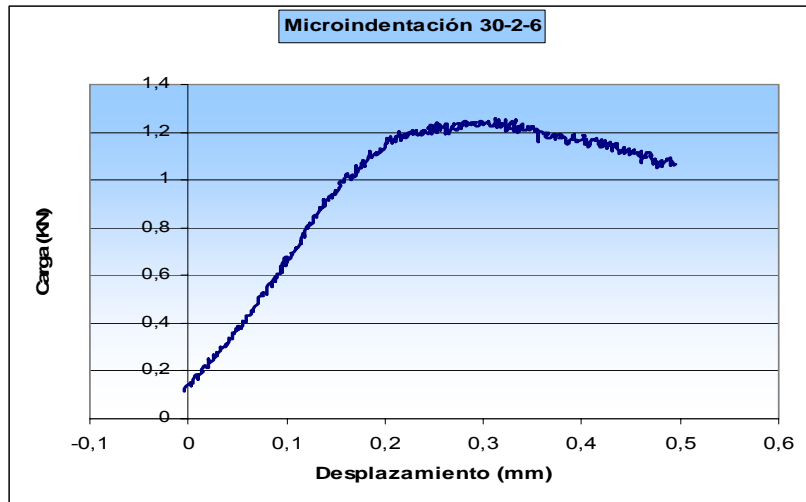
ANEXOS

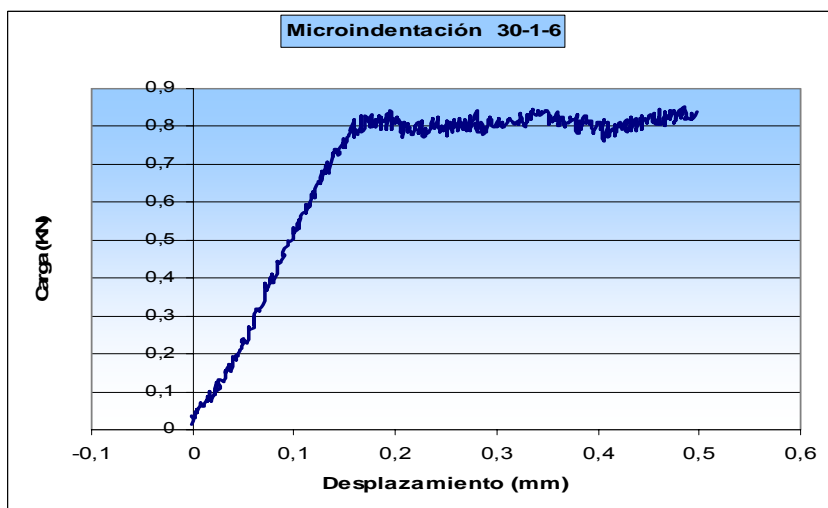
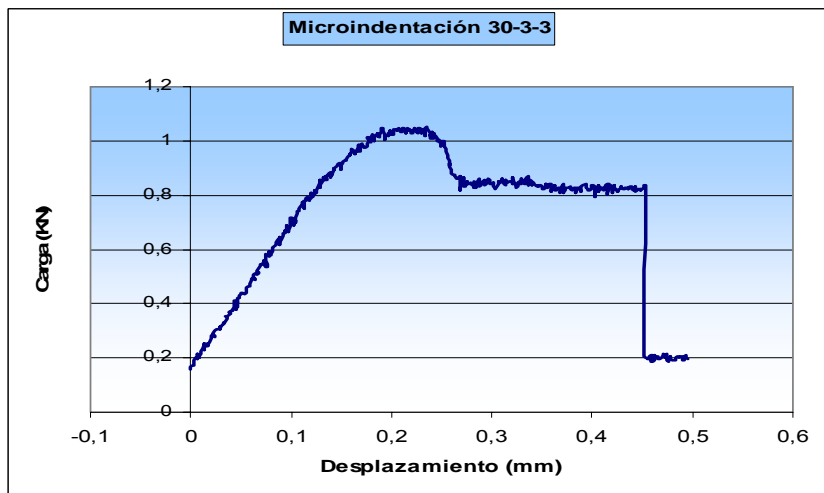
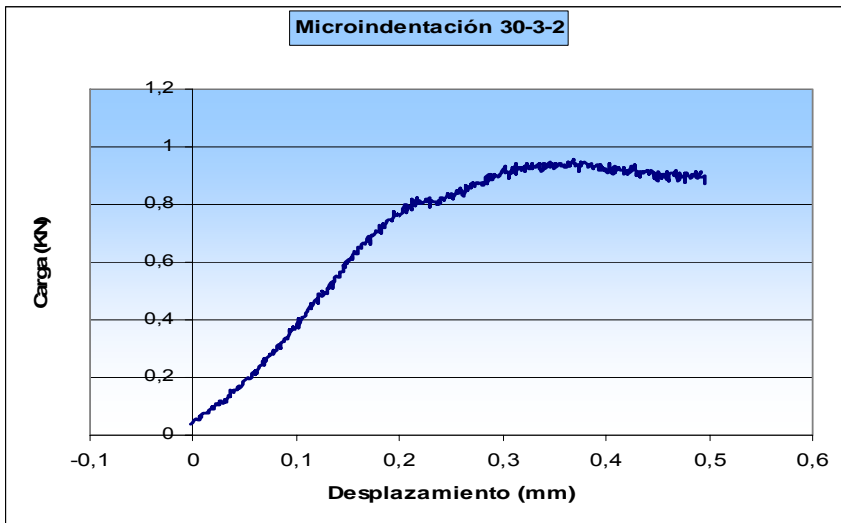
ANEXO 1

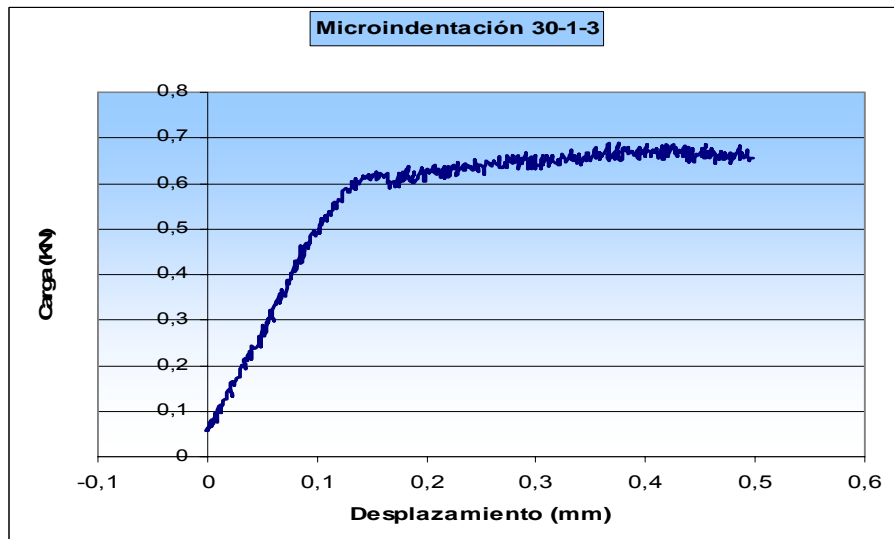
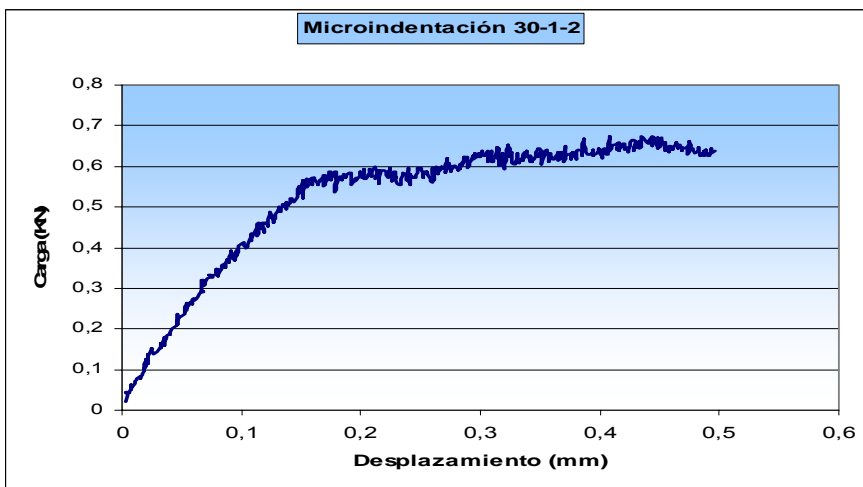
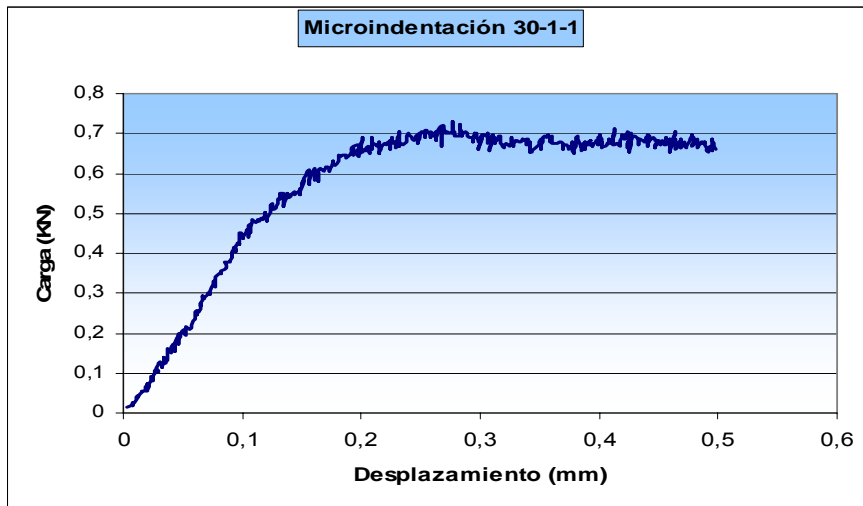
Graficas de la prueba de Microindentación Muestra Tambor 30

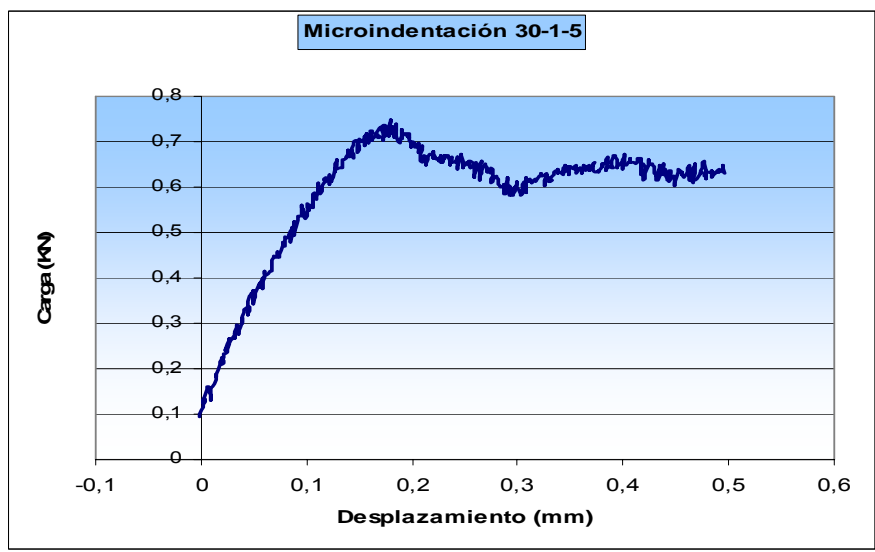
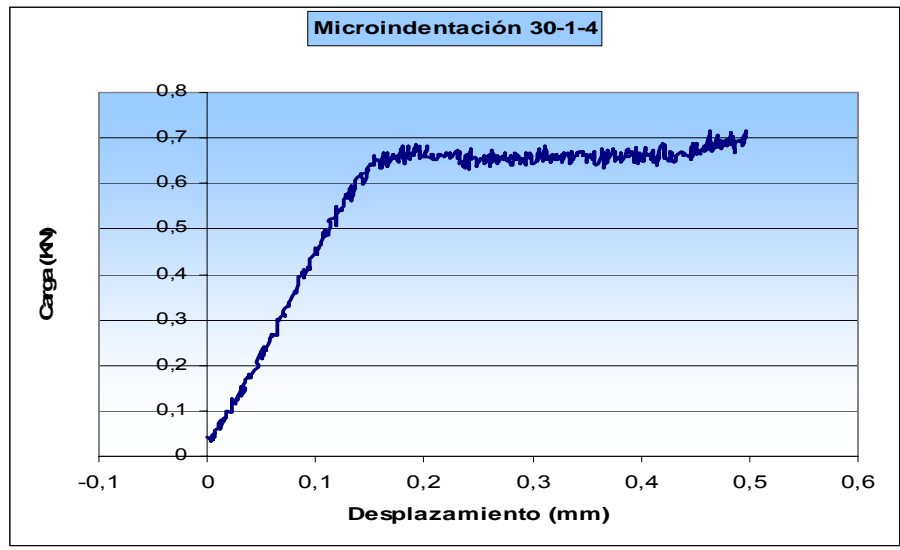






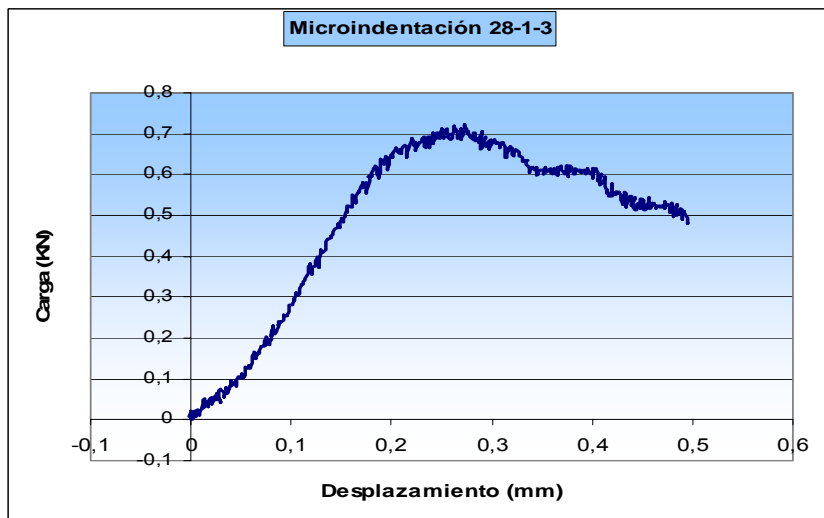
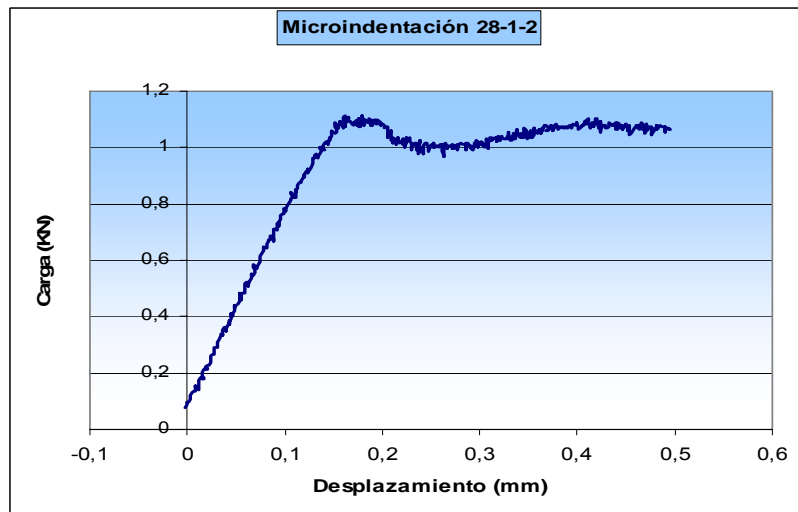
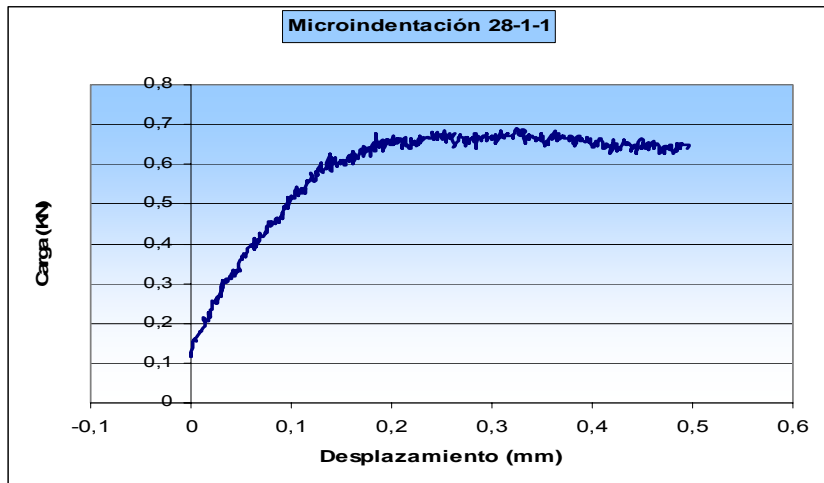


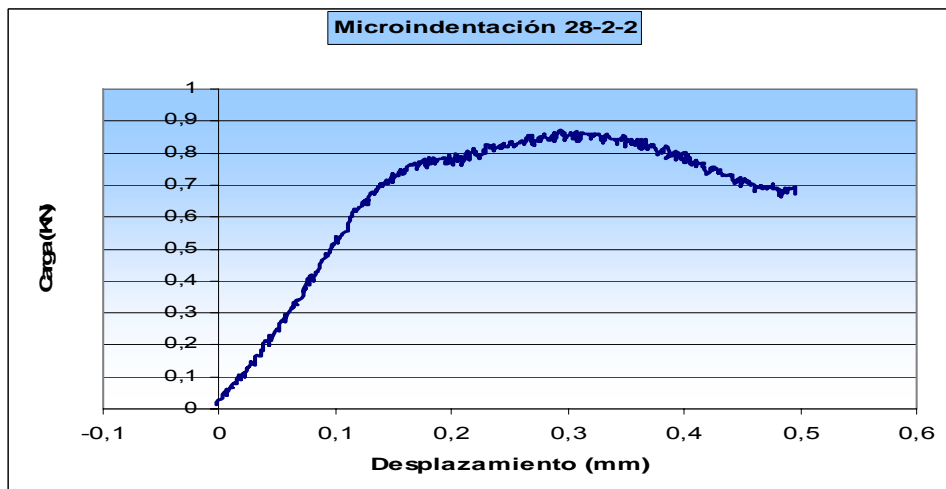
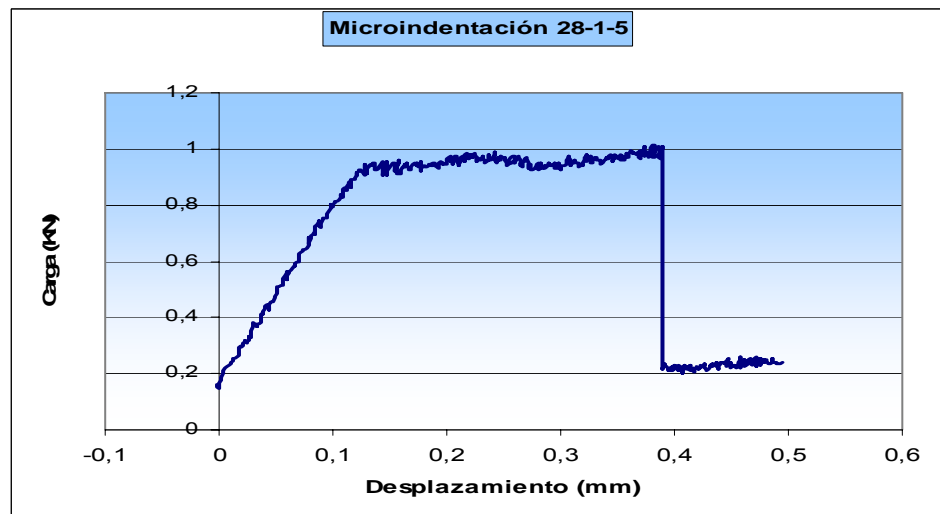
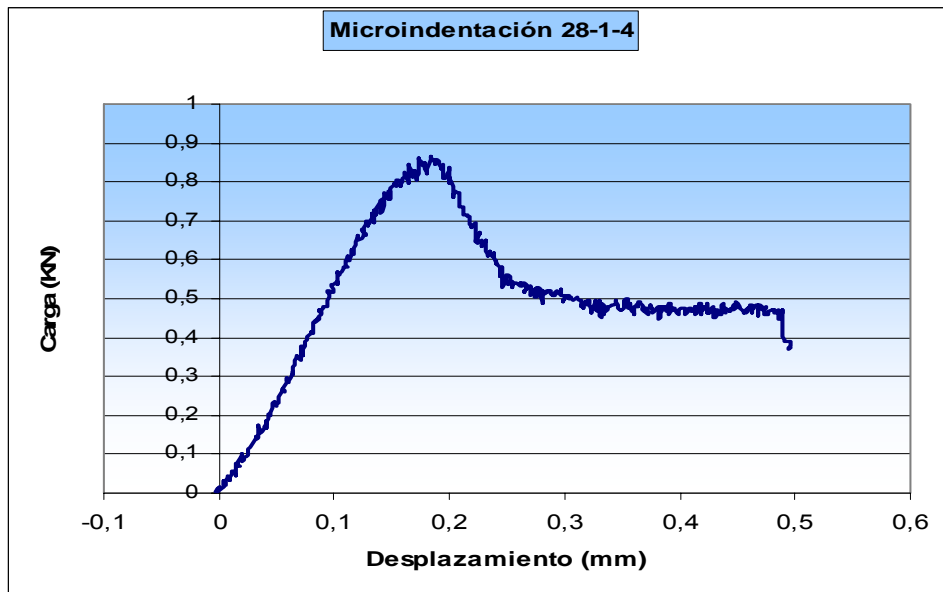


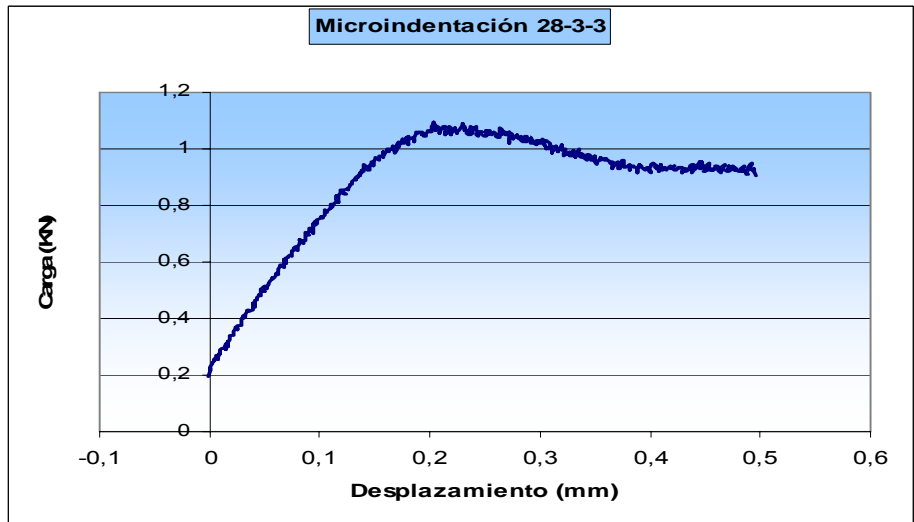
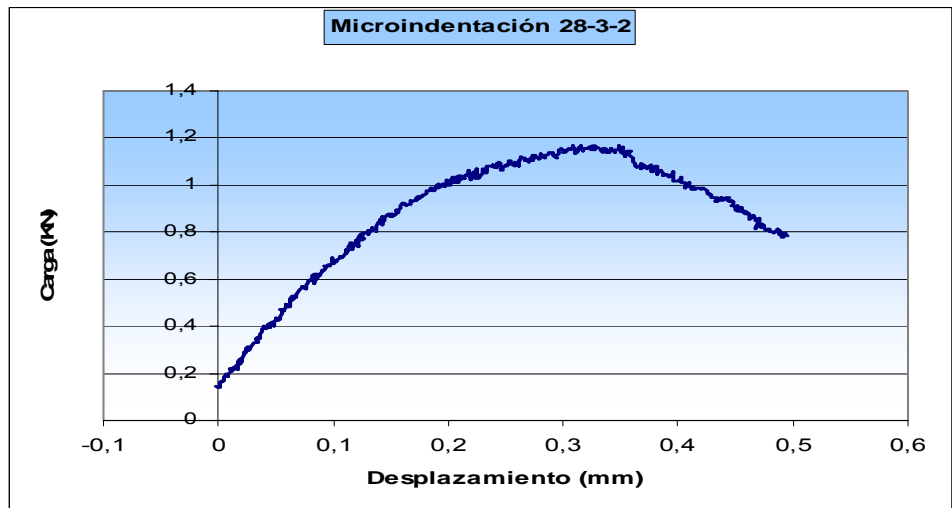
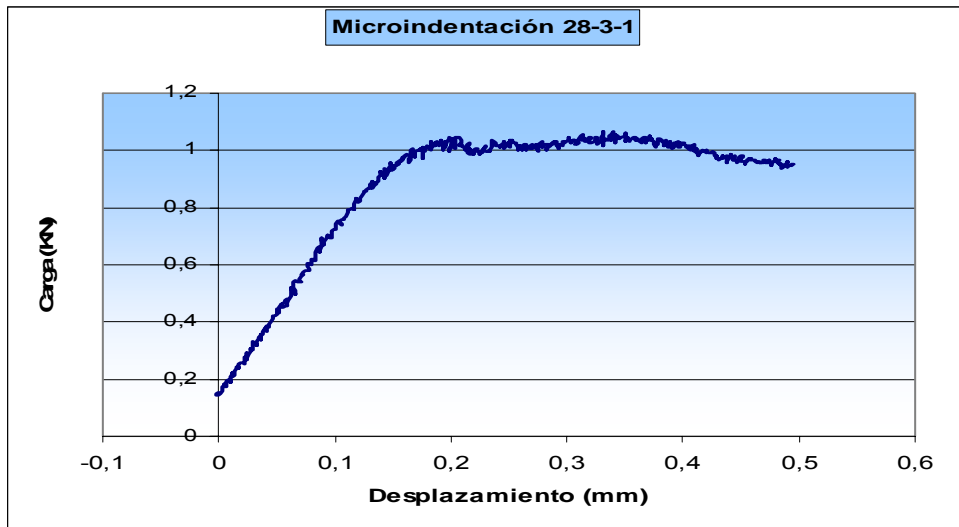


ANEXO 2

Graficas de la prueba de Microindentación Muestra Tambor 28

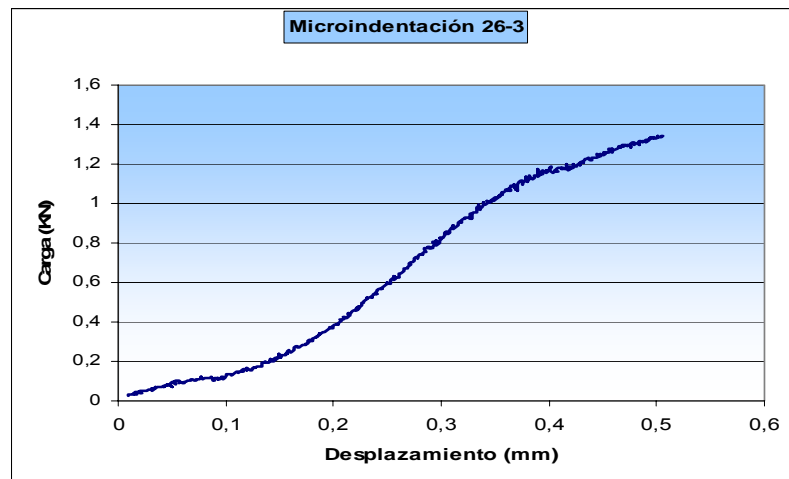
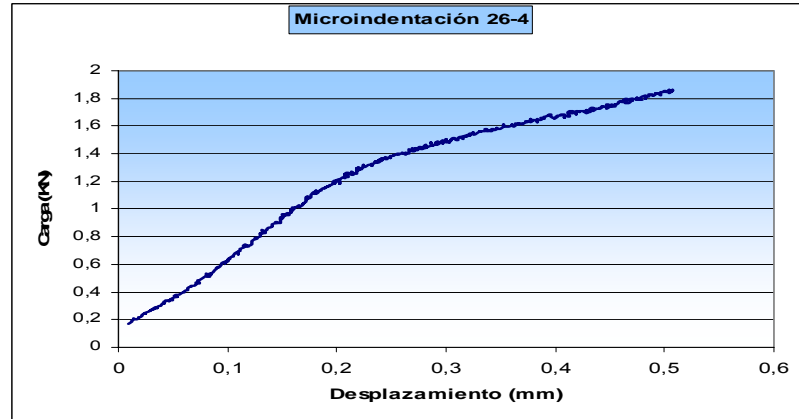
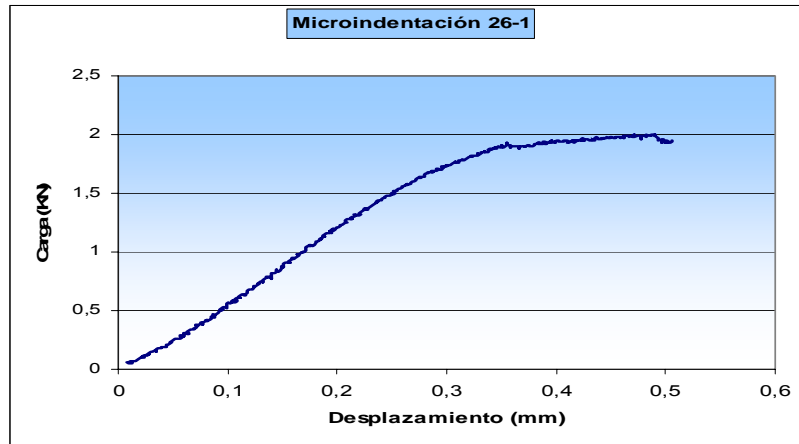


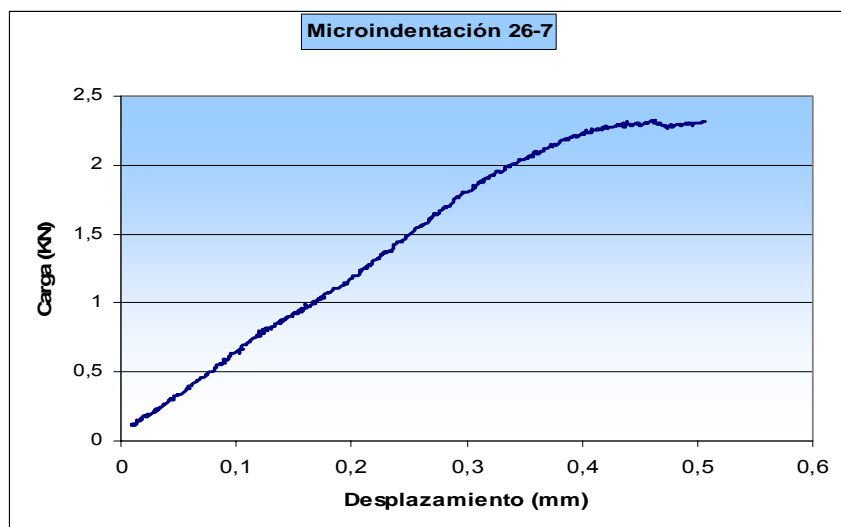
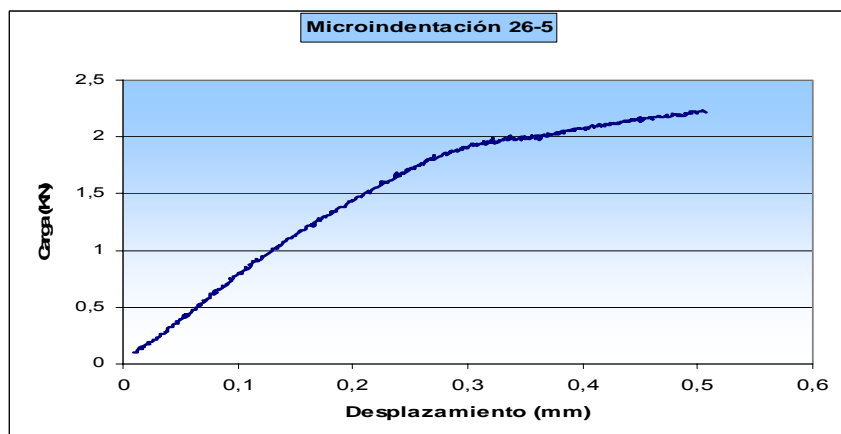
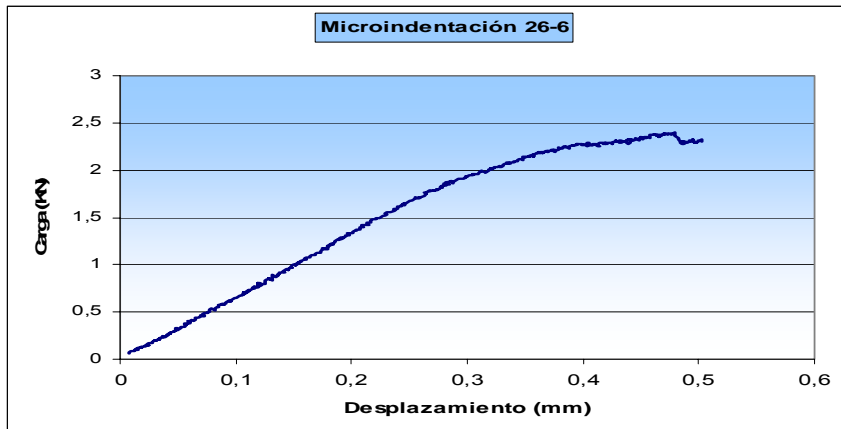


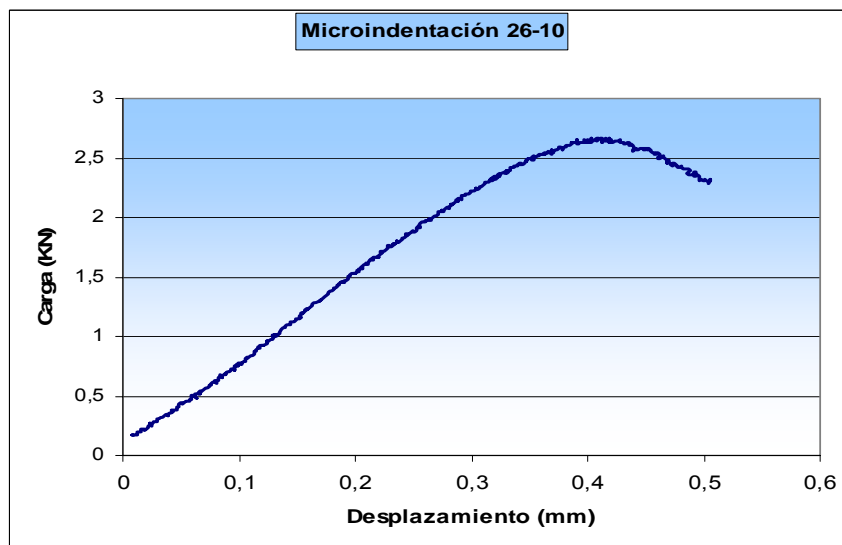
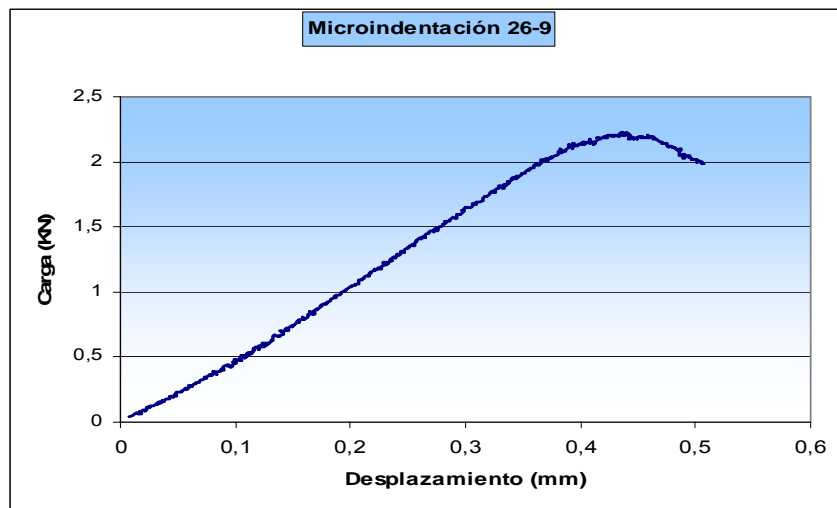
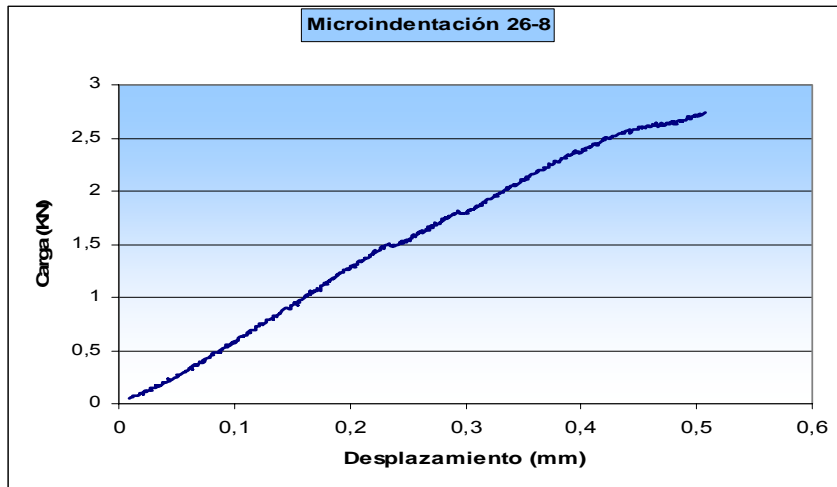


ANEXO 3

Graficas de la prueba de Microindentación Muestra Tambor 26

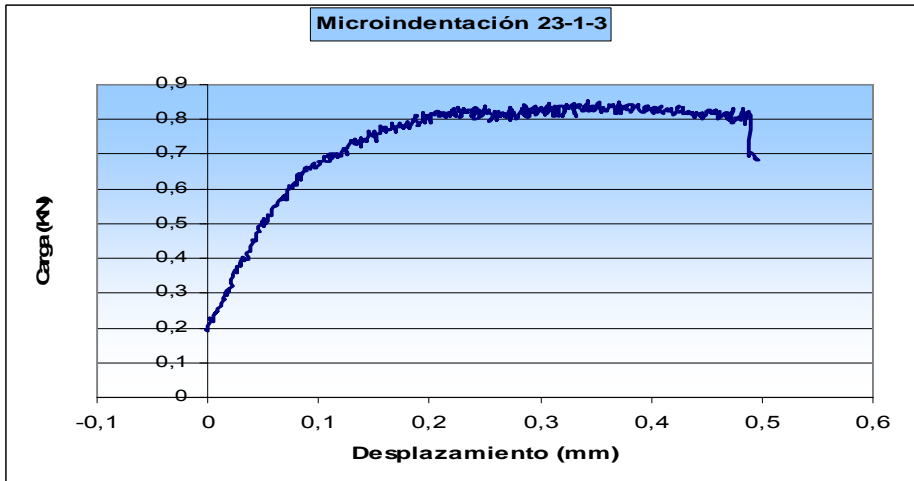
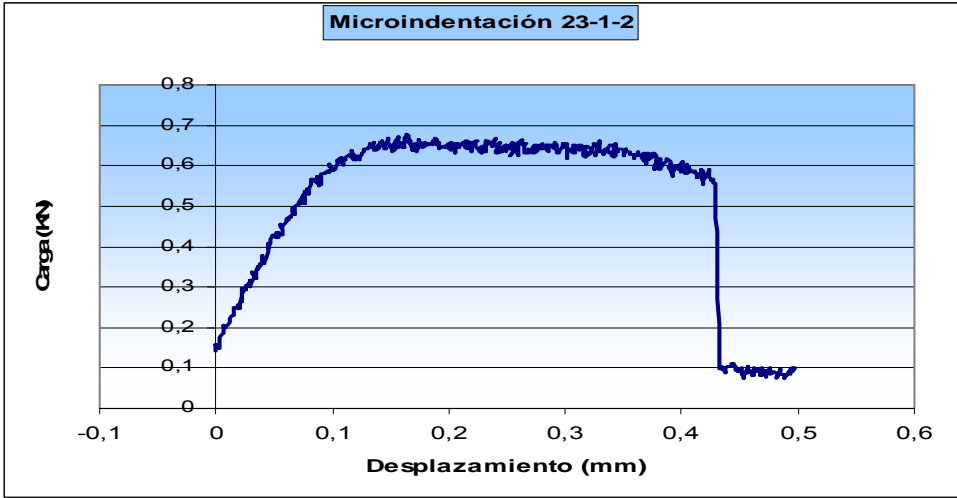
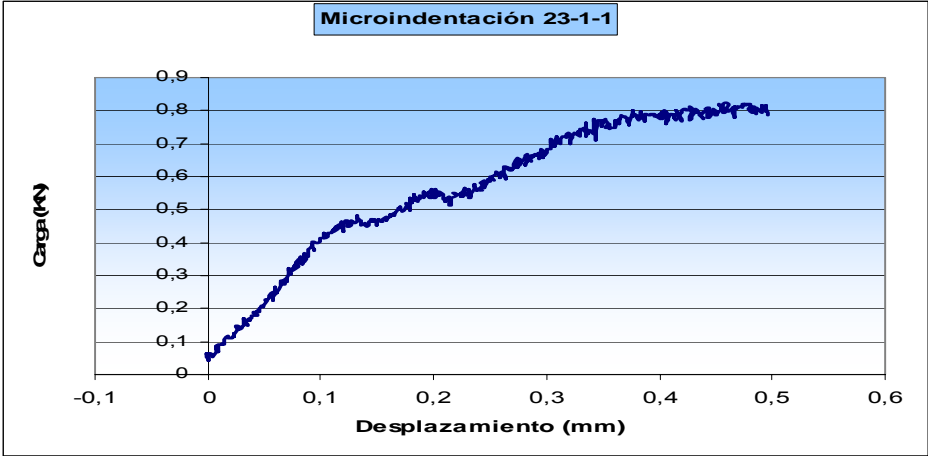


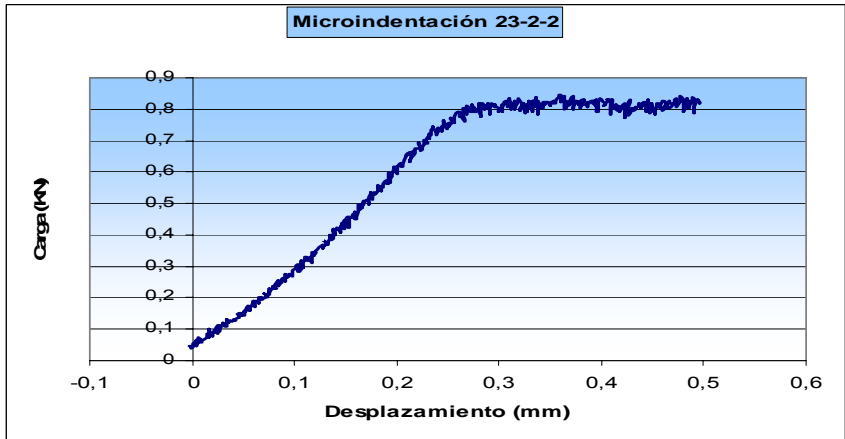
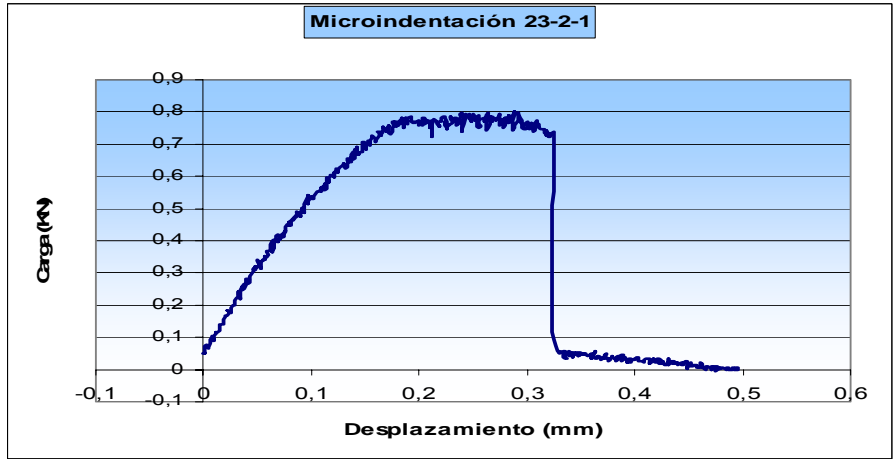
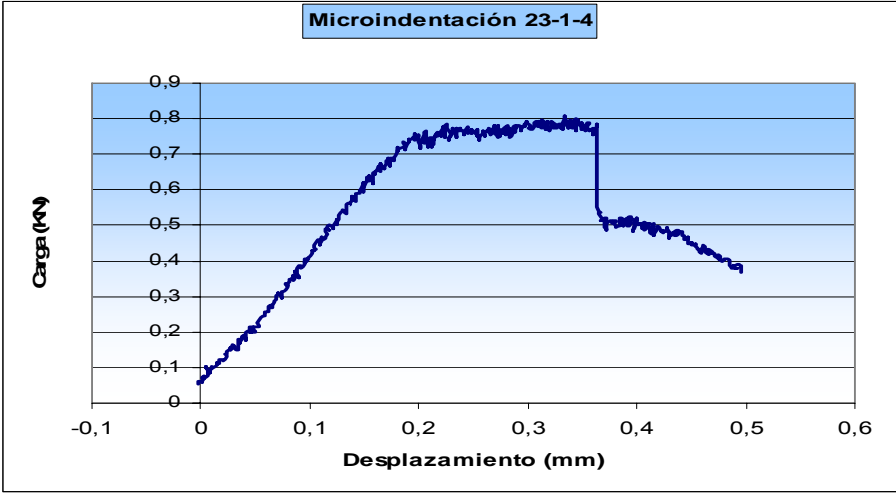


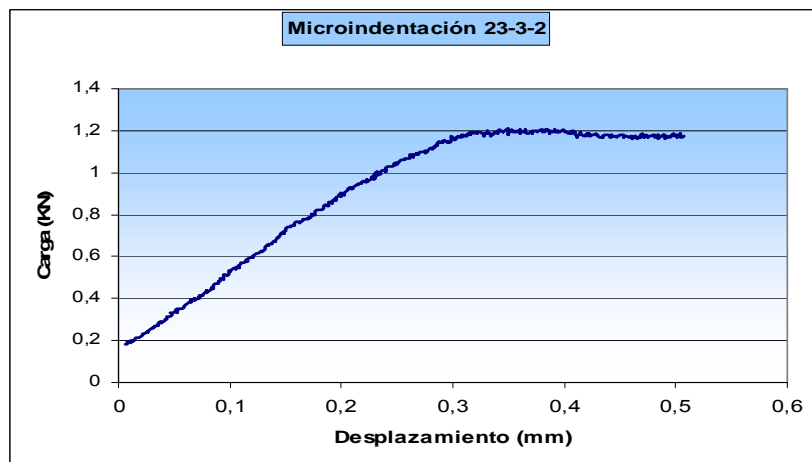
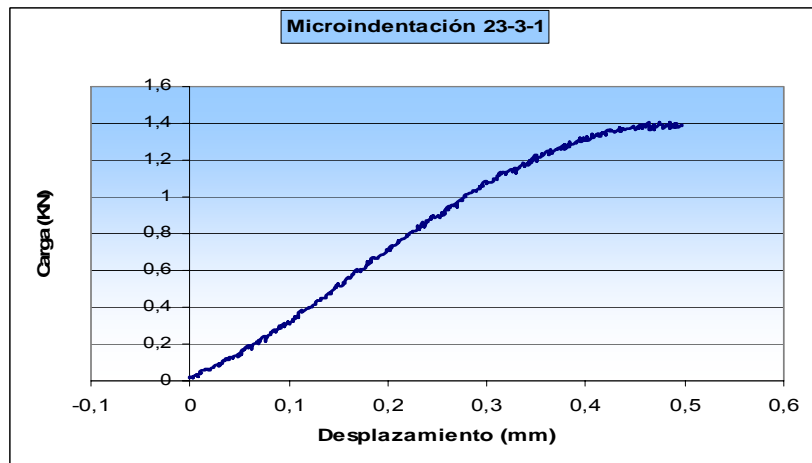
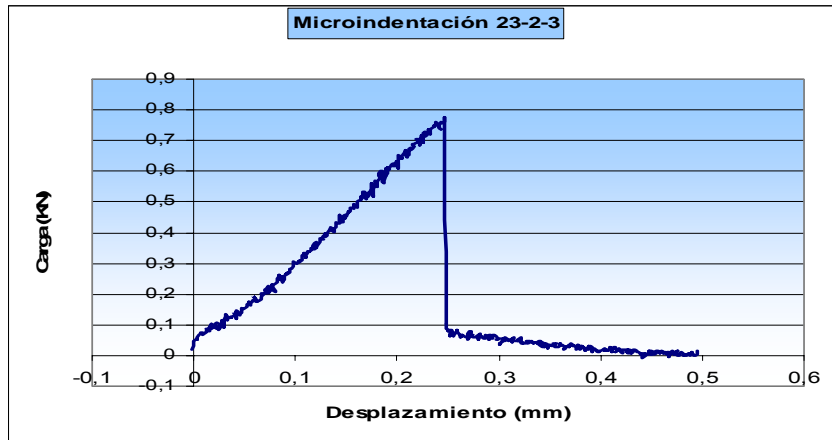


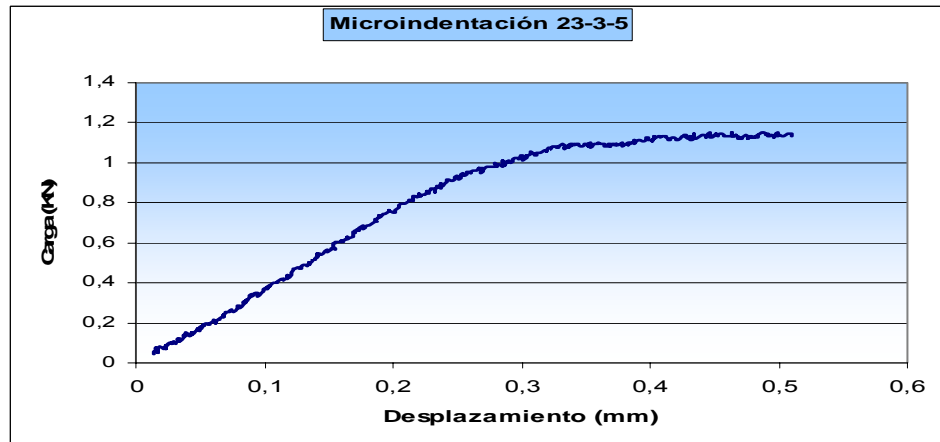
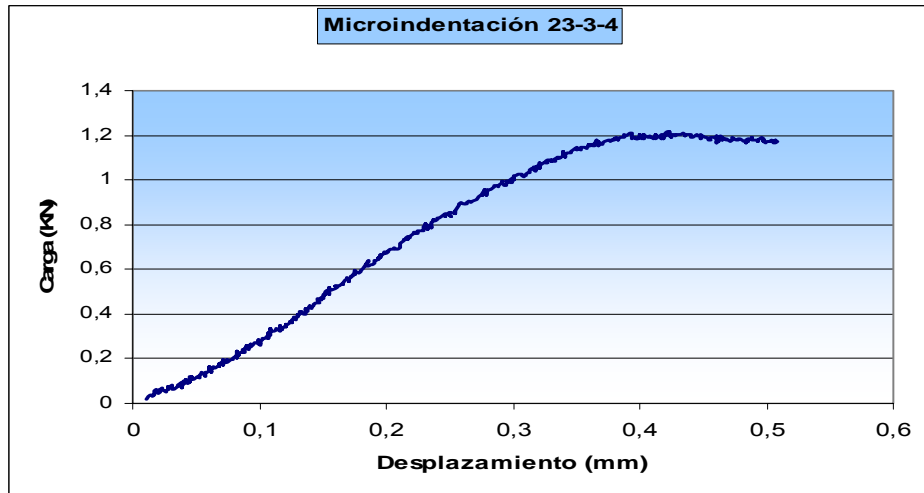
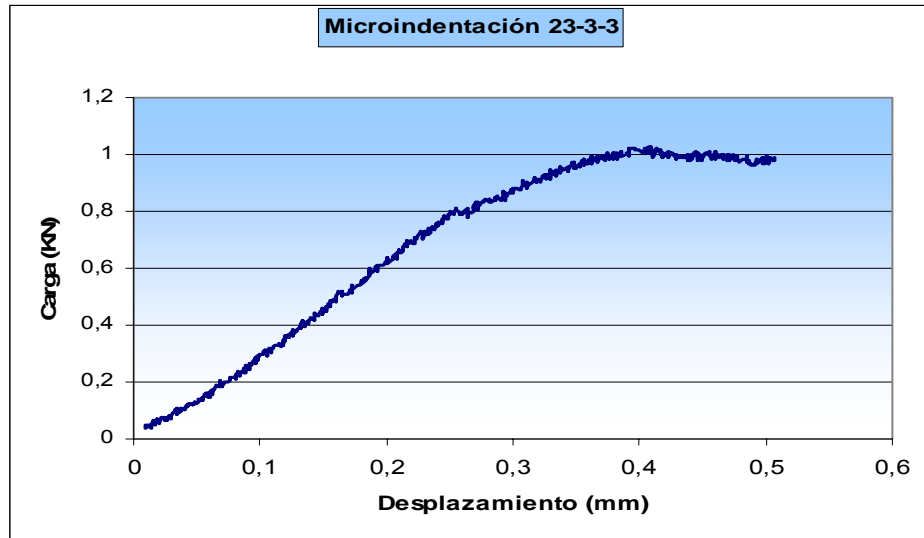
ANEXO 4

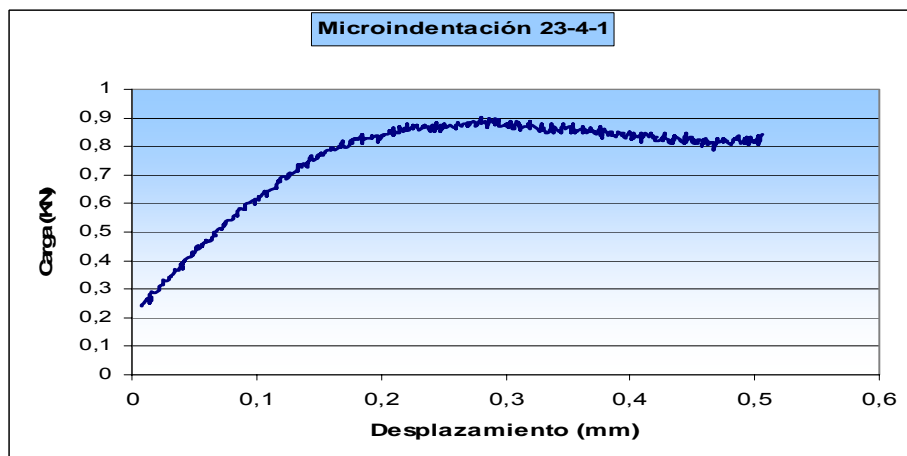
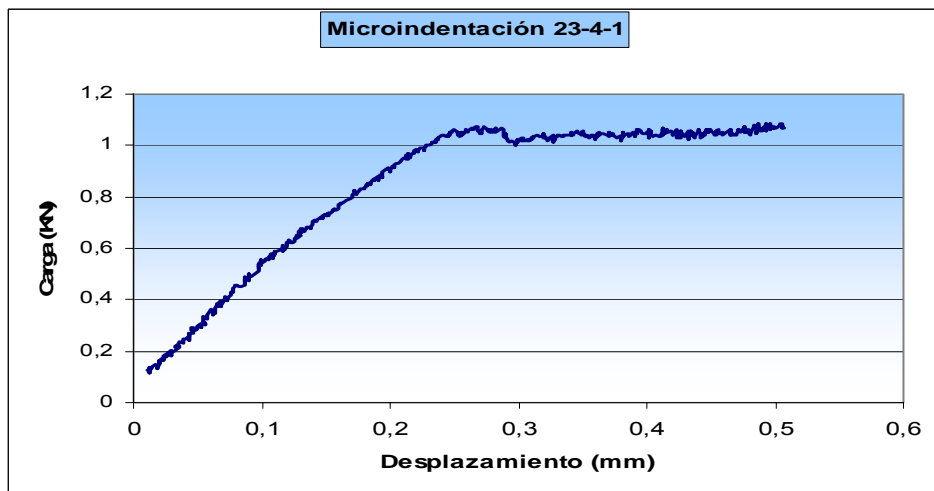
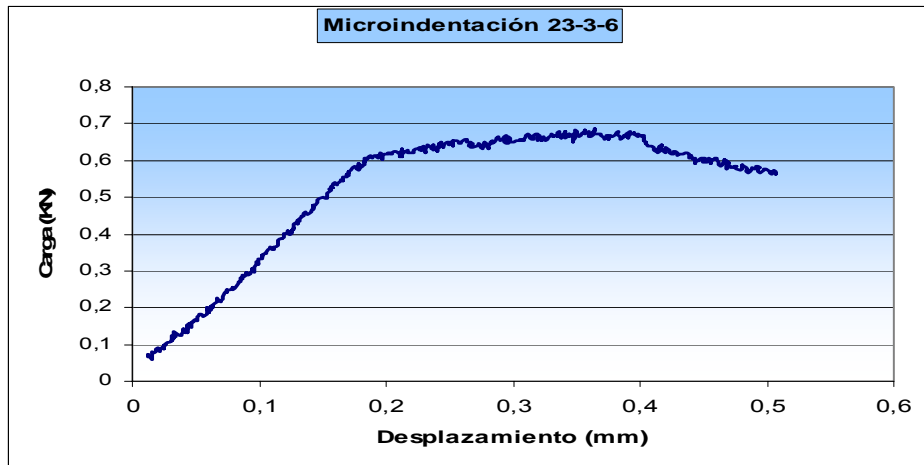
Graficas de la prueba de Microindentación Muestra Tambor 23

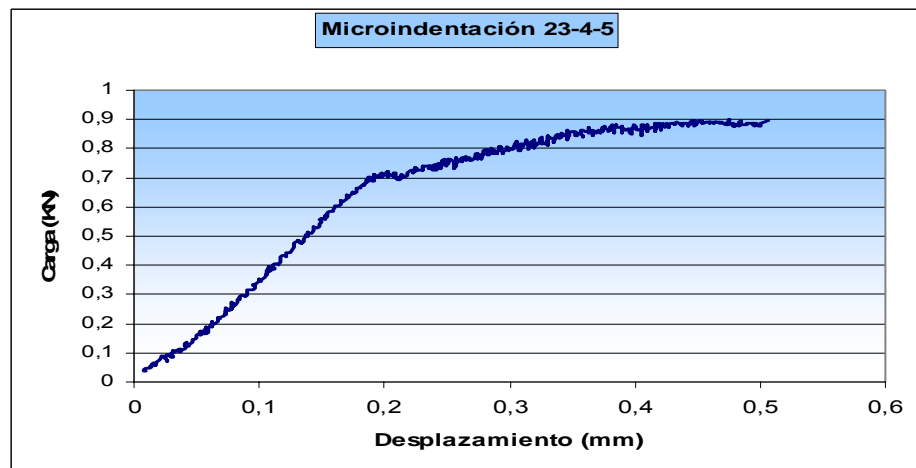
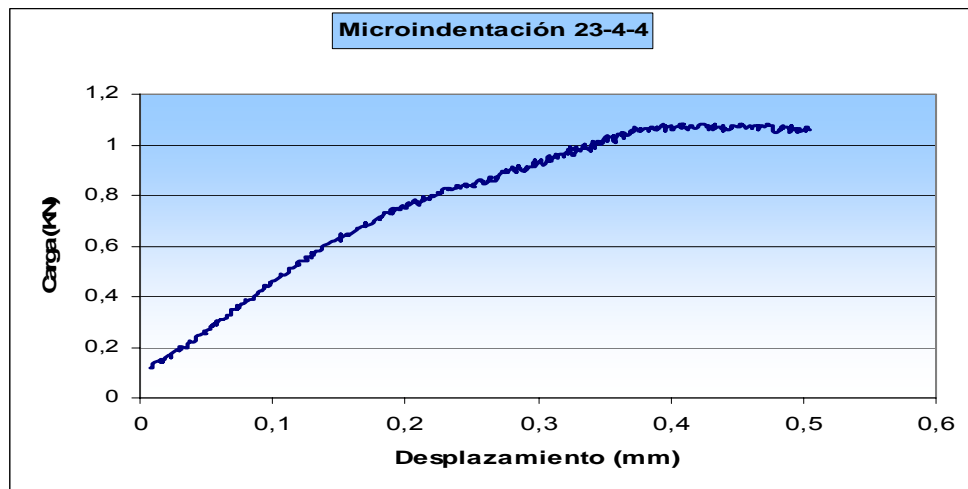
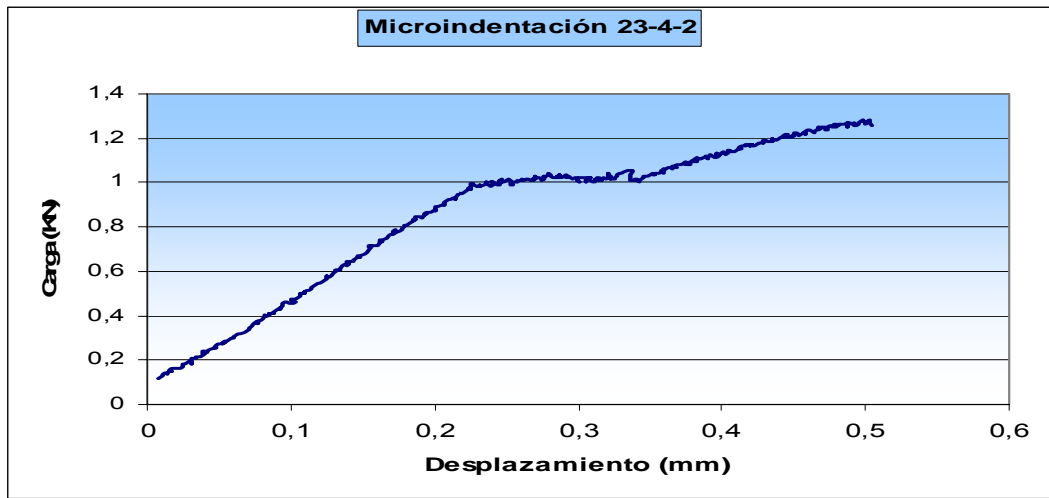


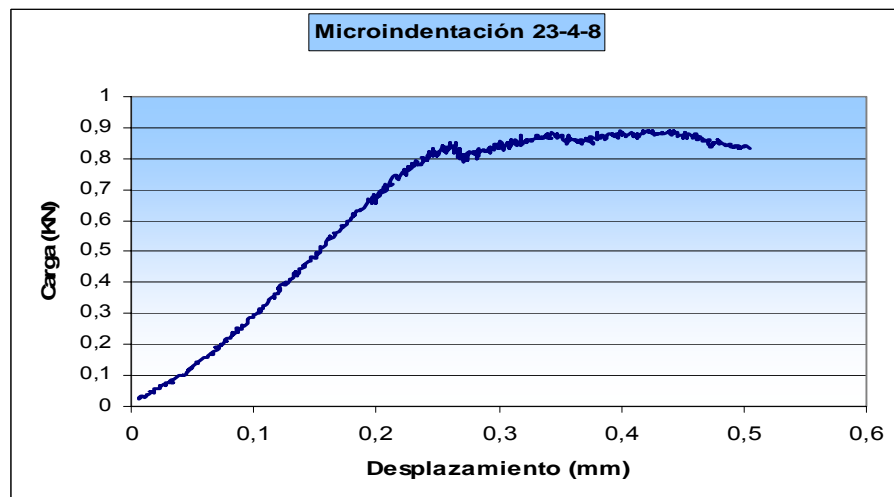
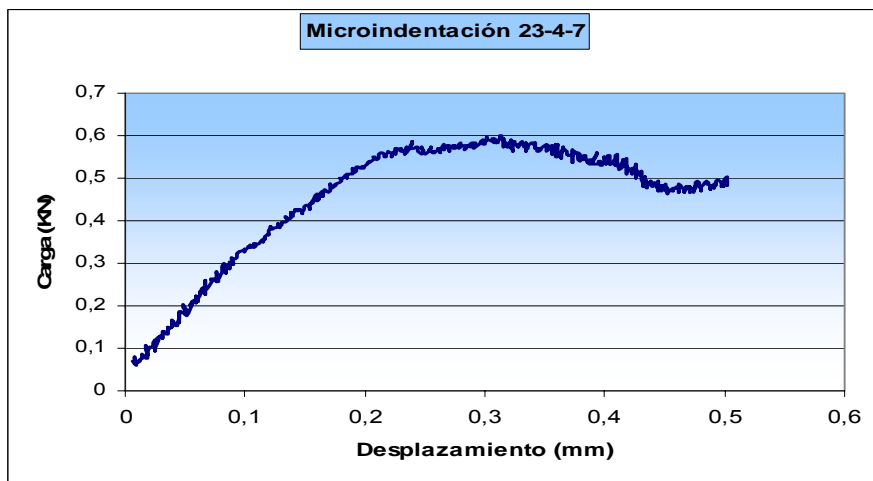
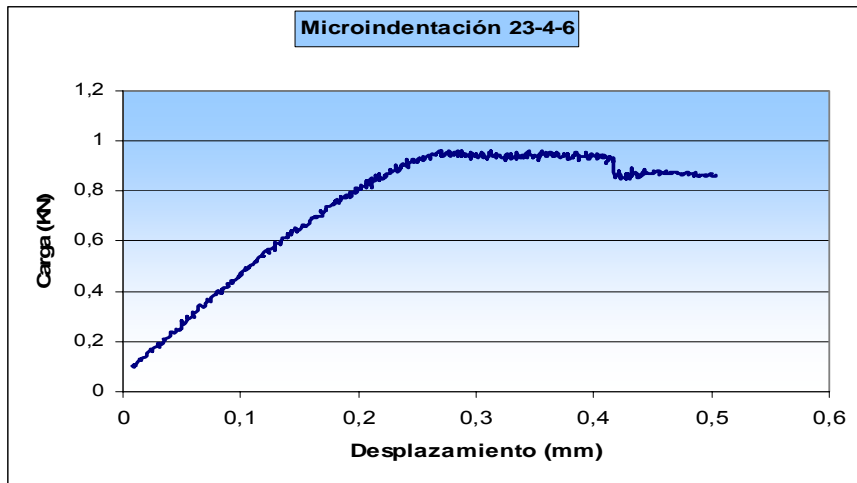






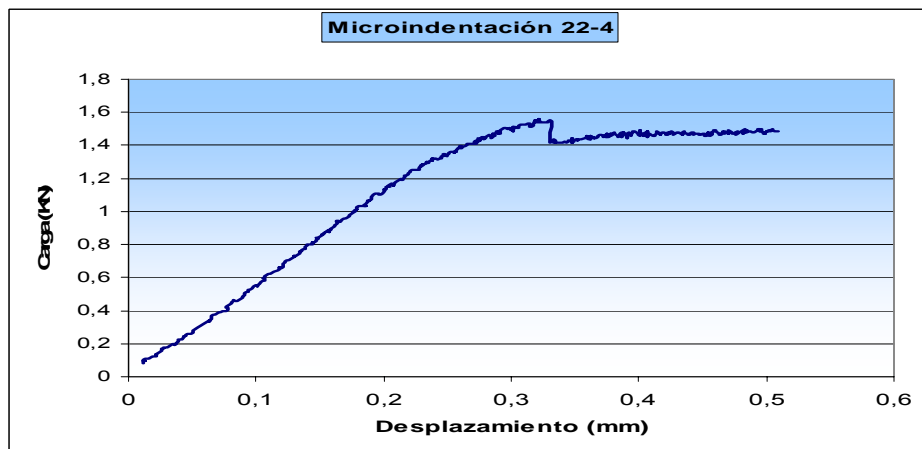
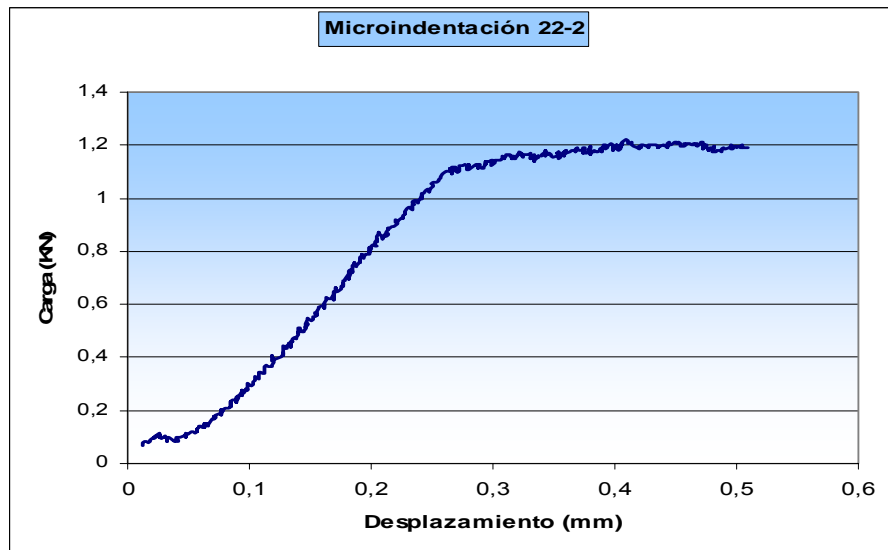
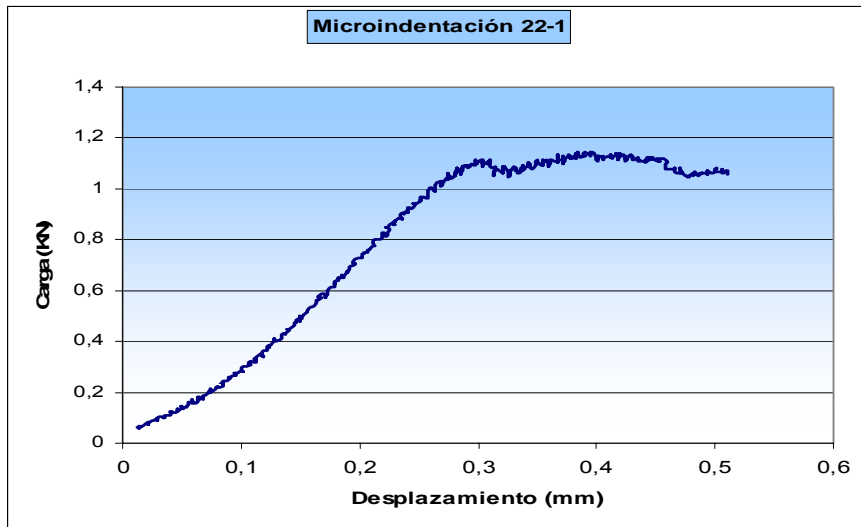


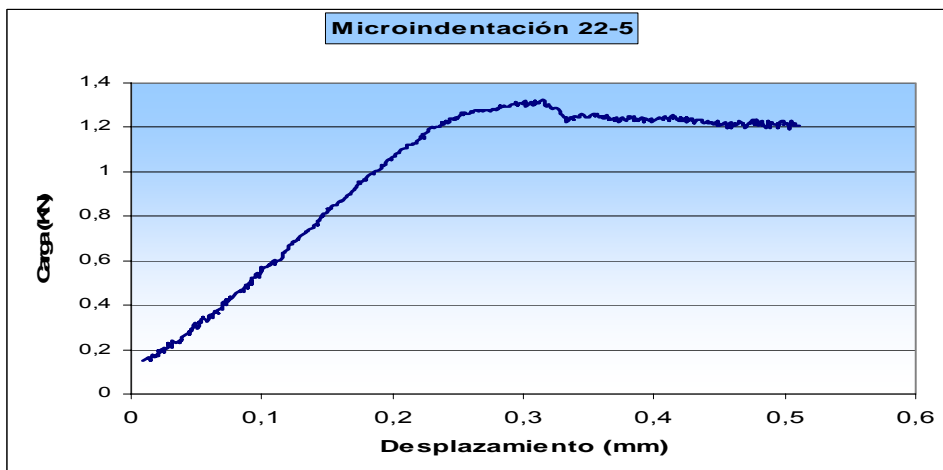
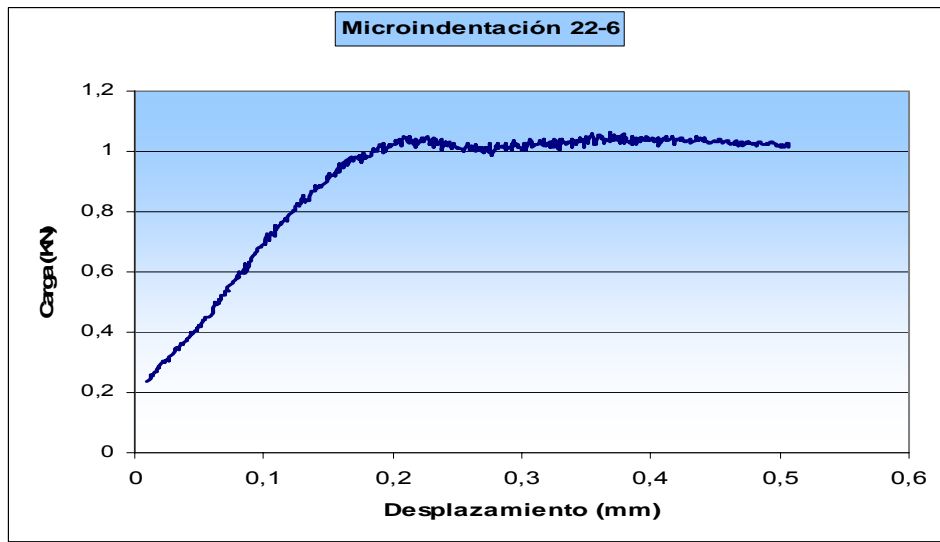
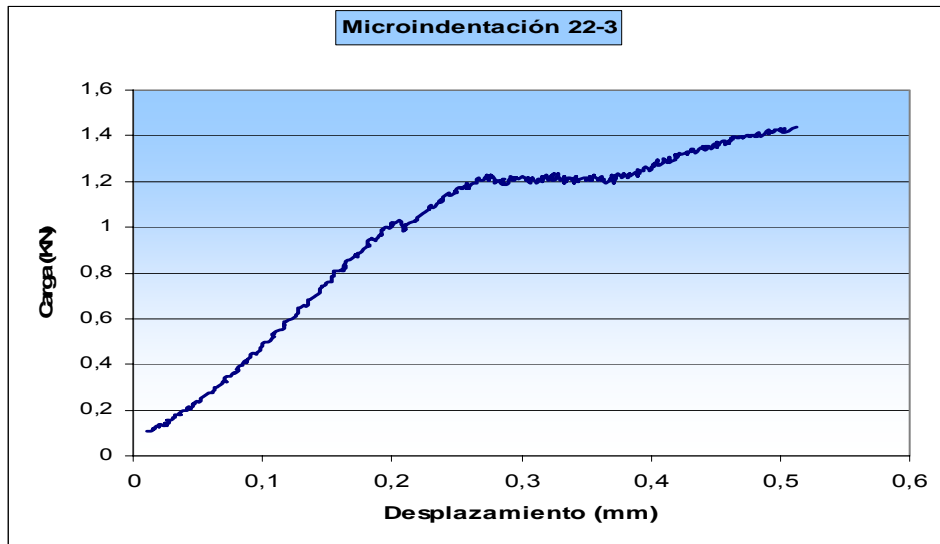


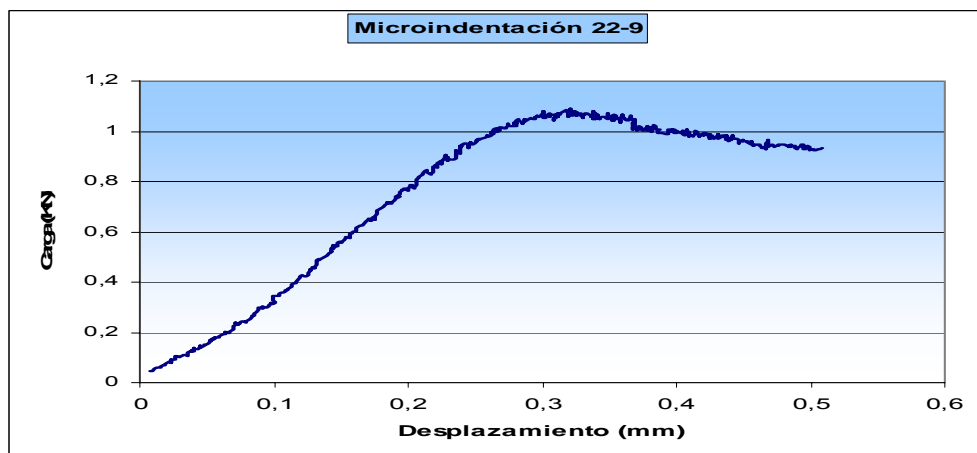
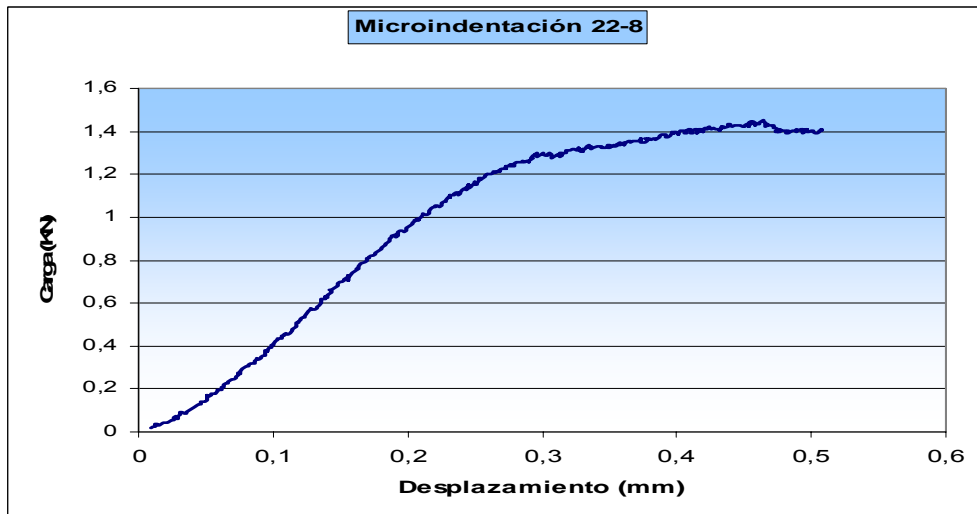
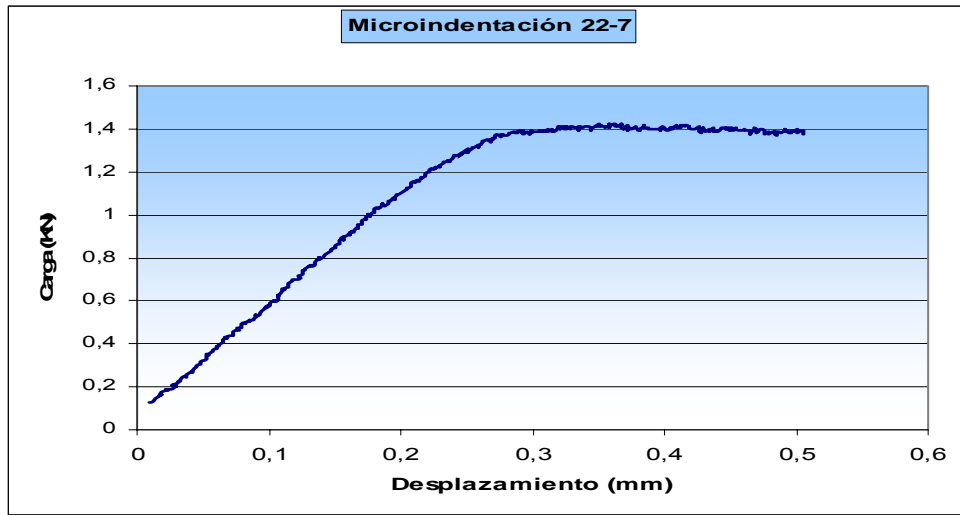


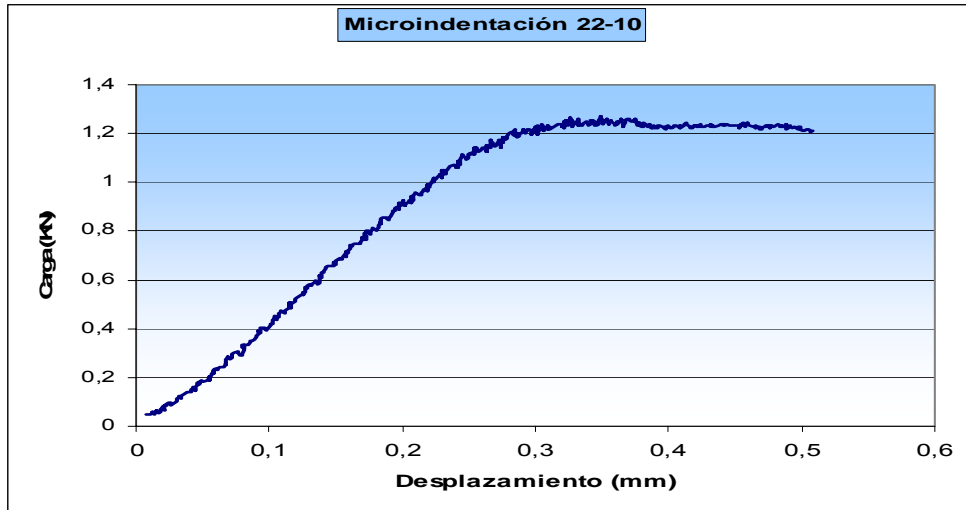
ANEXO 5

Graficas de la prueba de Microindentación Muestra Tambor 22



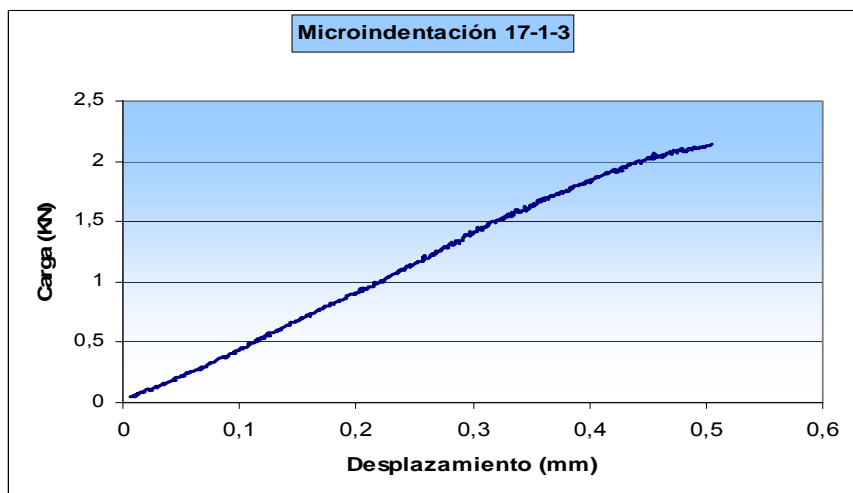
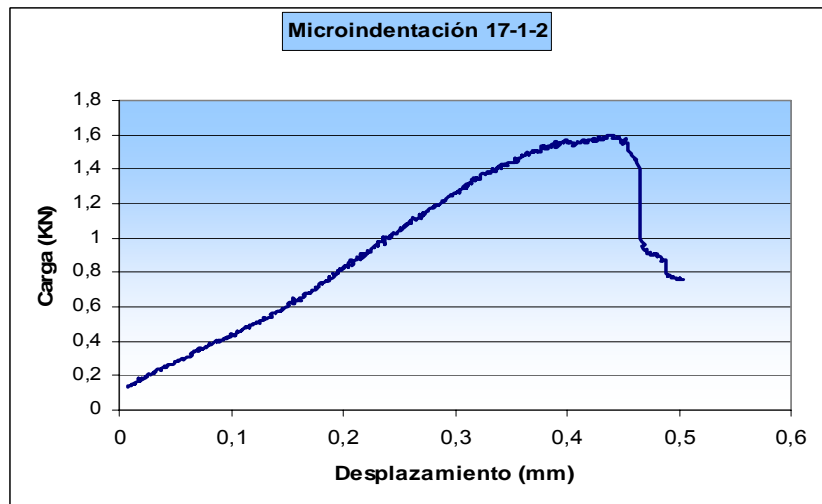
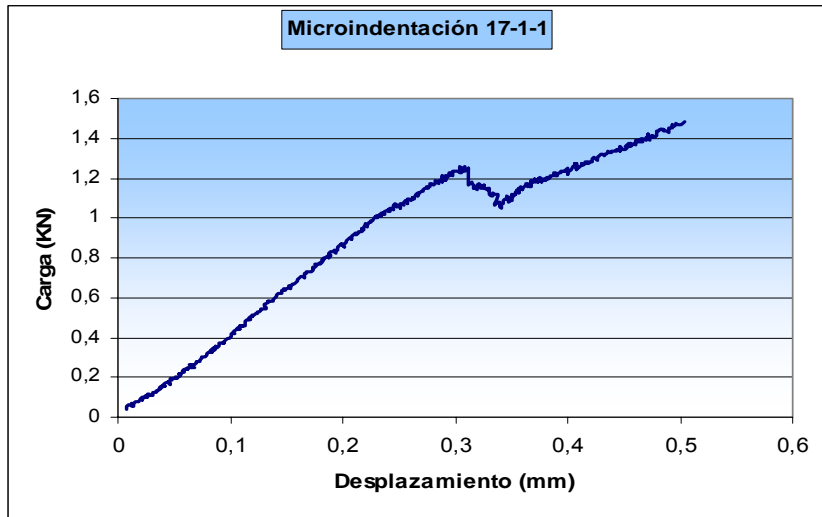


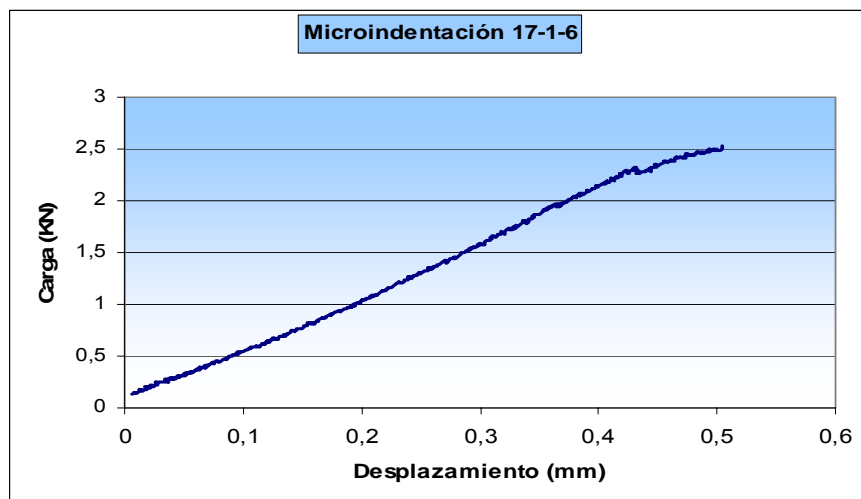
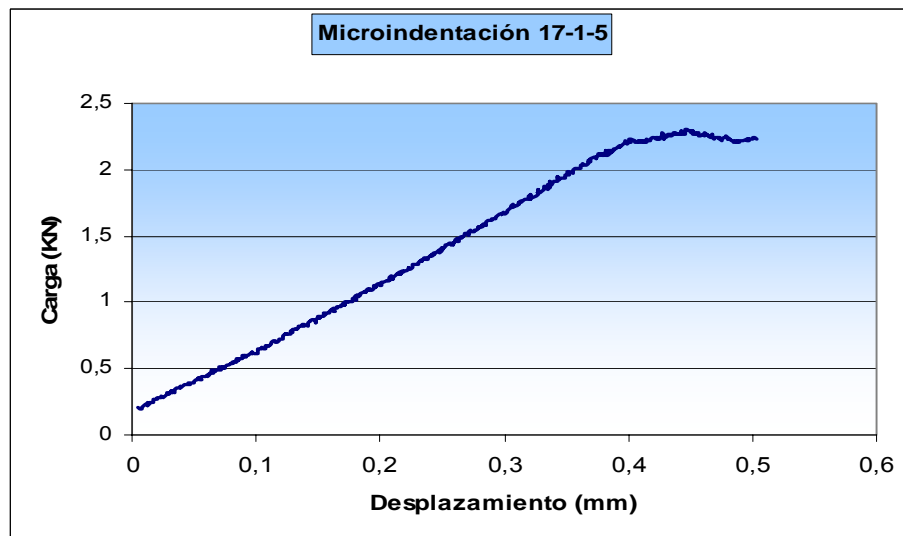
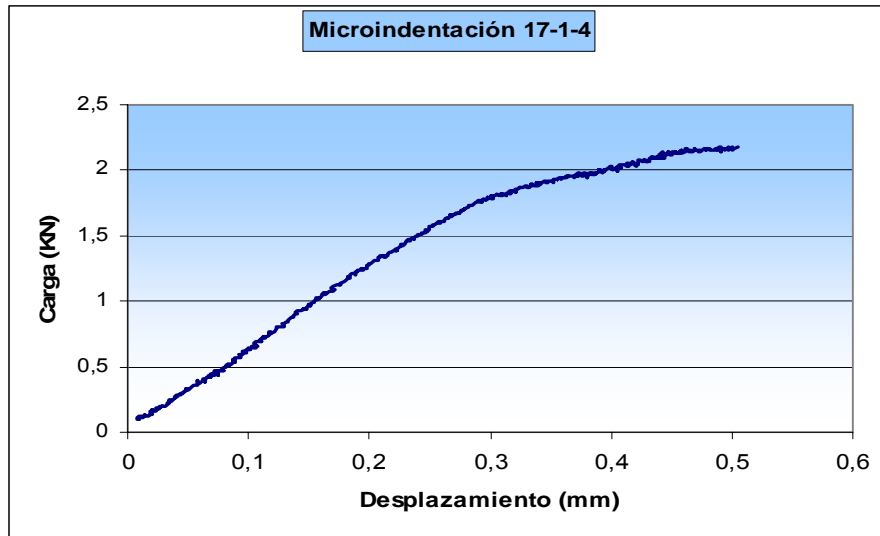


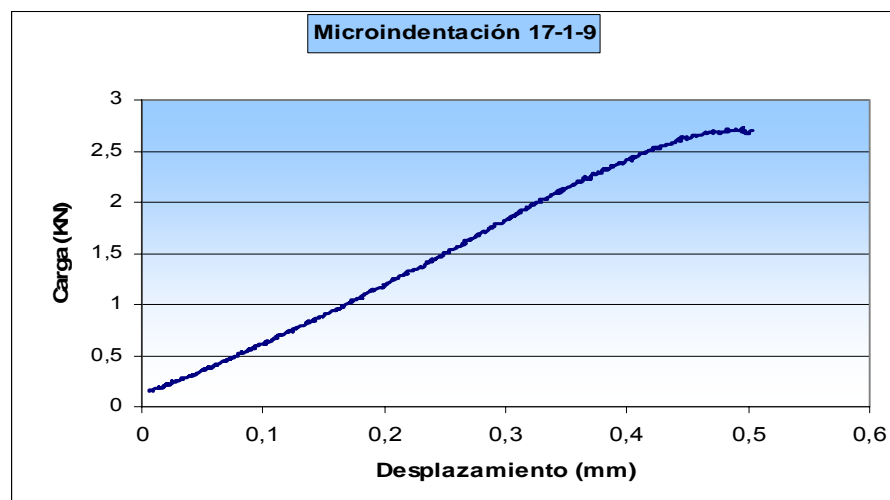
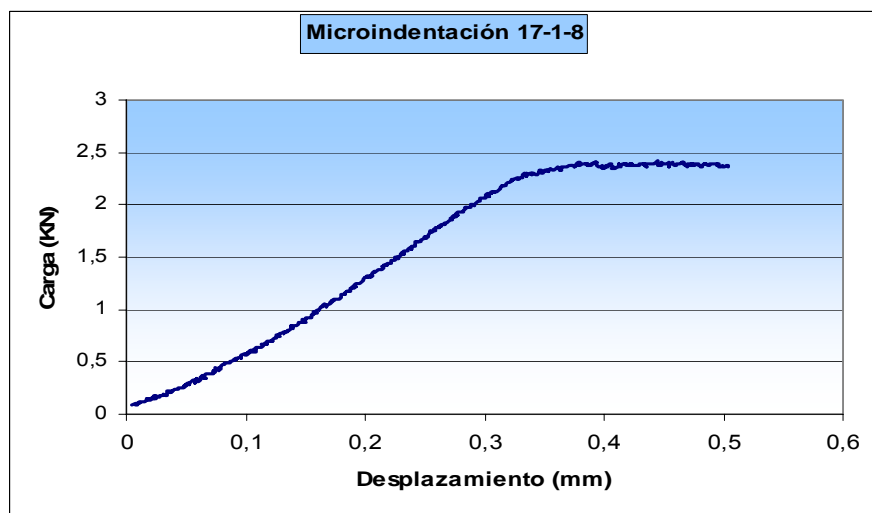
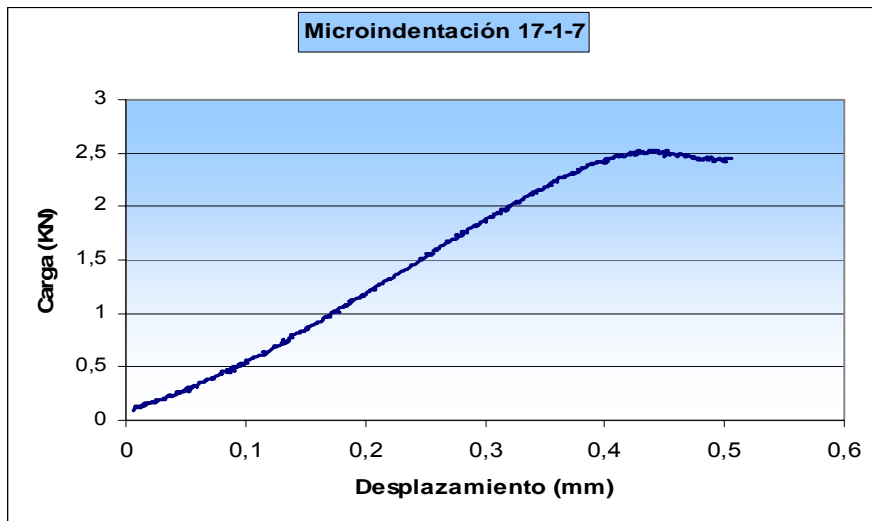


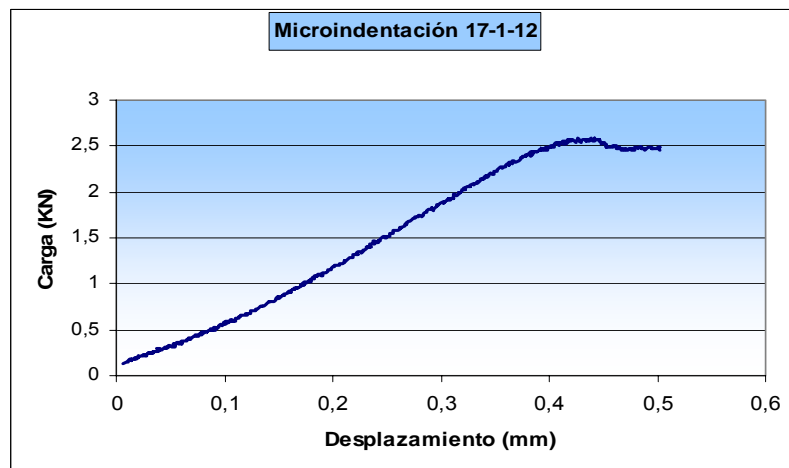
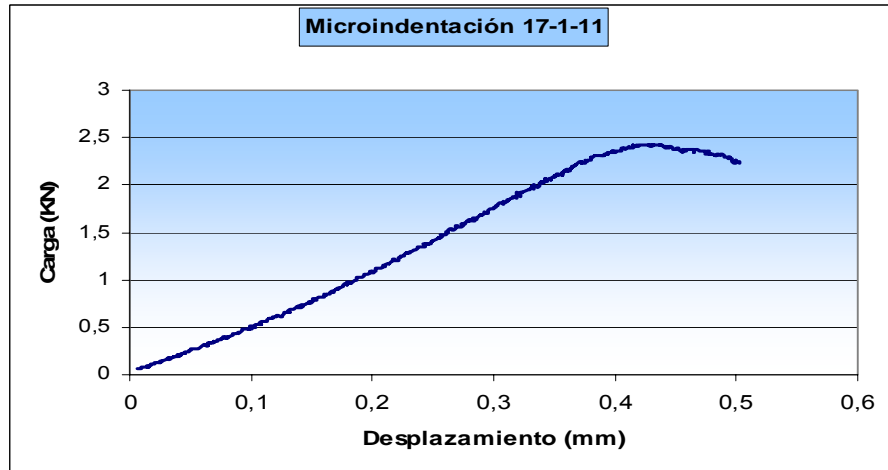
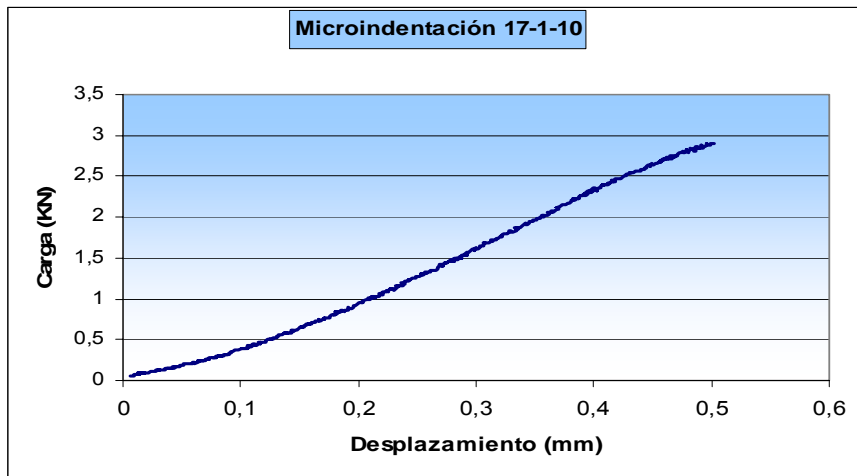
ANEXO 6

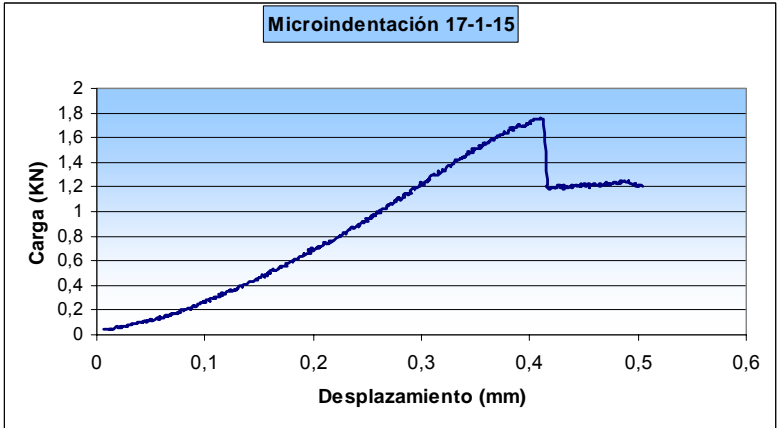
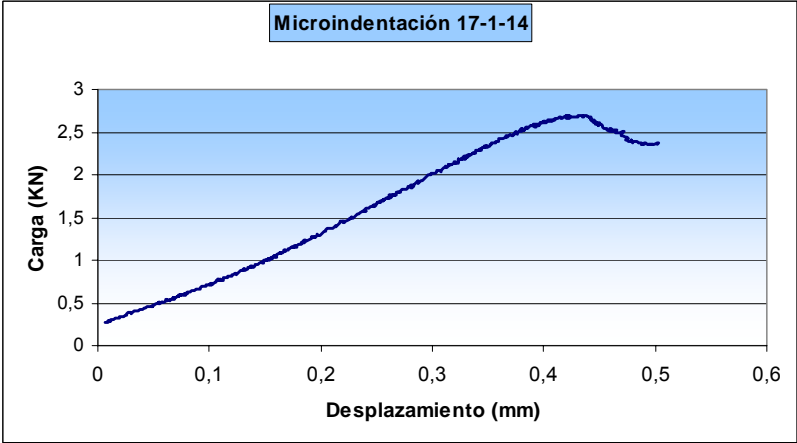
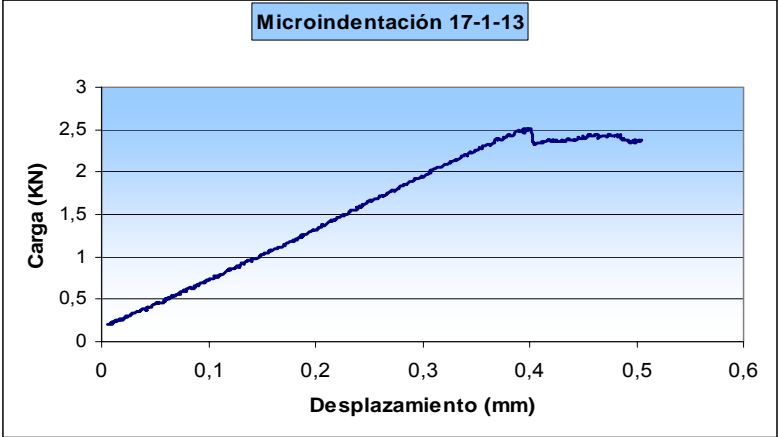
Graficas de la prueba de Microindentación Muestra Tambor 17





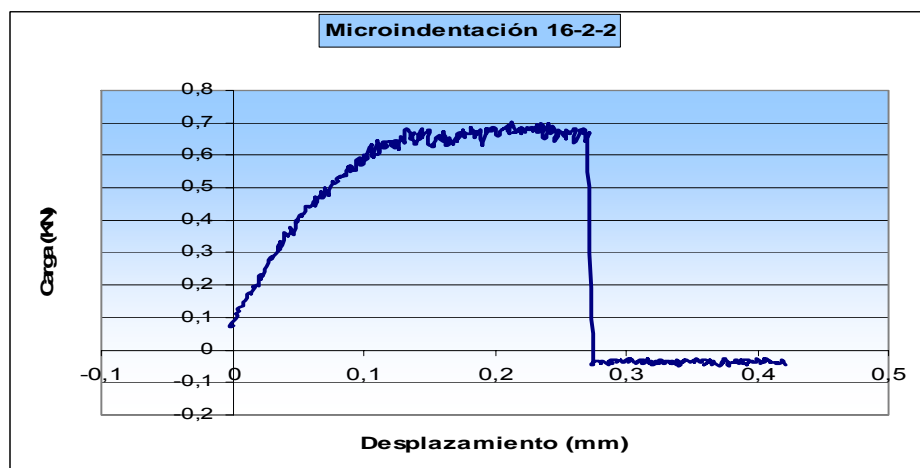
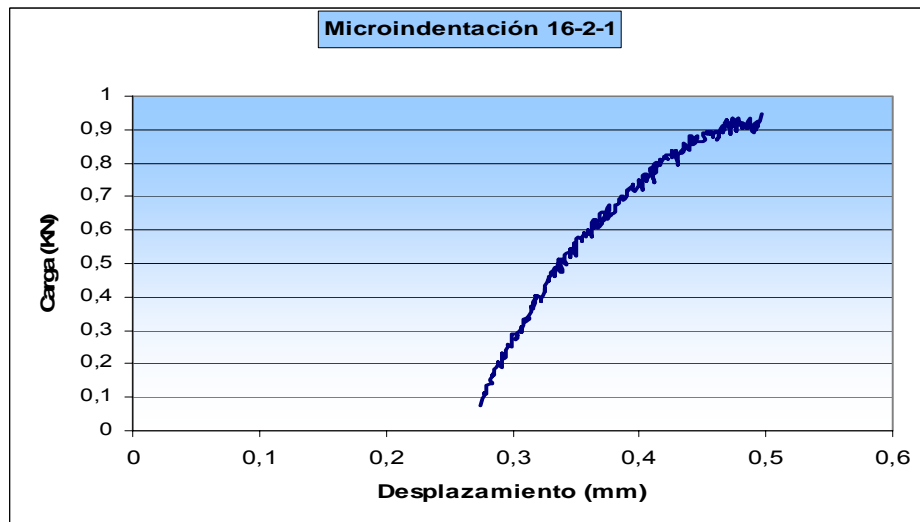
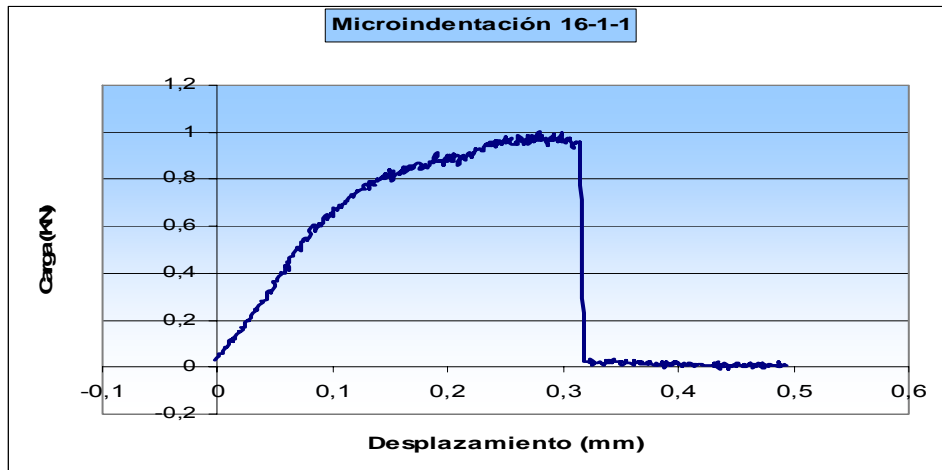






ANEXO 7

Graficas de la prueba de Microindentación Muestra Tambor 16



Microindentación 16-3-1

