

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LAS ROCAS DE LA CANTERA PERTENECIENTE A LA CORPORACIÓN DE CEMENTO ANDINO C.A. UBICADA EN EL MUNICIPIO CANDELARIA, ESTADO TRUJILLO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Pietro De Marco

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Agustín Gutiérrez

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero en Minas.  
Por el Br. Fuenmayor G. Oswaldo E.

Caracas, Agosto del 2001.

INDICE

	Páginas
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
CAPITULO I.....	7
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>7</b>
1. Objetivos .....	7
2. Justificación.....	8
3. Alcance .....	9
4. Antecedentes .....	9
5. La Empresa.....	10
CAPÍTULO II.....	14
<b>CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO.....</b>	<b>14</b>
1. Clima .....	14
2. Precipitación.....	15
3. Temperatura.....	15
4. Vientos .....	15
5. Geomorfología .....	16
6. Hidrografía y drenaje.....	17
CAPITULO III.....	20
<b>GEOLOGÍA.....</b>	<b>20</b>
1. Geología Regional .....	20
2. Geología Local .....	29
CAPÍTULO IV .....	34
<b>BASAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>34</b>
1. Roca Caliza.....	34
2. Cemento.....	37
3. Mecánica de Rocas.....	40
4. Clasificaciones Geomecánicas .....	45
CAPÍTULO V .....	64
<b>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>64</b>
1. Muestreo .....	64
2. Preparación de las muestras .....	67
3. Ensayos de Laboratorio .....	67
CAPÍTULO VI .....	127

<b>Resultados Experimentales.....</b>	<b>127</b>
1. Ensayo de Carga Puntual .....	128
2. Ensayo de Compresión Uniaxial .....	130
3. Ensayo de Rebote con Martillo de Schmidt .....	149
4. Ensayo de Tracción Indirecta.....	150
5. Ensayo de Corte Directo.....	152
6. Determinación de la Densidad .....	162
7. Resumen de Resultados .....	164
 CAPÍTULO VII .....	 165
<b>Análisis de Resultados .....</b>	<b>165</b>
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	 174
1. CONCLUSIONES .....	174
2. RECOMENDACIONES .....	175
 BIBLIOGRAFÍA.....	 177
 Anexo A: MAPA GEOLÓGICO .....	 179
 Anexo B : CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE REMOCION .....	 180
 Anexo C: TABLAS BIENIAWSKI, RMR, SI. CRITERIO DE HOEK-BROWN .....	 191
 Anexo D: DIMENSIONES DE MUESTRAS A ENSAYAR .....	 198
 Anexo E: MARTILLO DE SCHMIDT .....	 201
 Anexo F: COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS Y RQD .....	 203
 Anexo G: RESULTADOS DE ENSAYOS .....	 204

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Páginas
Fig. 1 Localización regional del desarrollo minero (Fuente: www.eureka.com.ve).....	11
Fig. 2 Red Hidrográfica del área ( Fuente: INGENIERÍA CAURA, S.A., 2000).....	19
Fig. 3 Proceso de Elaboración de Cemento. Planta Corporación de Cemento Andino. (Fuente: Elaboración propia).....	41
Fig. 4 Principales ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas de las rocas (DE MARCO, 1995).....	46
Fig. 5 Excavación Convencional (Fuente: SALCEDO, 1988).....	47
Fig. 6 Excavación con uso de escarificador (Fuente: SALCEDO, 1988).....	48
Fig. 7 Remoción mediante explosivos (Fuente: SALCEDO, 1988).....	48
Fig. 8 Avance de excavación perpendicular al rumbo de la discontinuidad (Fuente: SALCEDO, 1988).....	53
Fig. 9 Avance de excavación paralela al rumbo de la discontinuidad (Fuente: SALCEDO, 1988).....	53
Fig. 10 Avance de excavación perpendicular al rumbo de la discontinuidad y en el mismo sentido de su Buzamiento (SALCEDO, 1988).....	54
Fig. 11 Avance de excavación Perpendicular al rumbo de la discontinuidad y en sentido contrario a su buzamiento (SALCEDO, 1988).....	54
Fig. 12 Procedimiento para la medición y calculo del RQD ( Deere, 1989, en HOEK, 2000).....	56
Fig. 13 Requerimientos geométricos para el ensayo de Carga Puntual: A.-Diametral, B.- Axial, C.- Bloque (Fuente: DE MARCO, 1995).....	69
Fig. 14 Requerimientos geométricos para el ensayo de Carga Puntual: Bloque Irregular (Fuente: DE MARCO, 1995).....	70
Fig. 15 Equipo para la realización del ensayo de Carga Puntual.....	71
Fig. 16 Esquema del equipo de Carga Puntual. (Fuente: DE MARCO, 1995).....	71
Fig. 17 Equipo de Carga Puntual, Detalle de las placas de carga cónicas.(Fuente: DE MARCO, 1995).....	72
Fig. 18 Ubicación de la muestra en equipo para ensayo de Carga Puntual Diametral.....	74
Fig. 19 Ubicación de la muestra en equipo para ensayo de Carga Puntual Axial.....	75
Fig. 20 Modos de falla típicos: A.- Ensayos diametrales, B.- Ensayos Axiales, C Ensayos en bloques.....	76
Fig. 21 Direcciones de carga para ensayos en muestras de rocas anisotrópicas.....	79
Fig. 22 Prensas para ensayo de Compresión Uniaxial.....	83
Fig. 23 Disposición de la muestra en el ensayo de compresión uniaxial.....	84
Fig. 24 Ejemplos de fracturas en muestras de roca (Castillejo, 1993).....	89
Fig. 25 Formato para la presentación gráfica de la curva esfuerzo-deformación axial y diametral. (Fuente: ISRM, 1981).....	99
Fig. 26 Métodos para calcular el módulo de Young para la curva esfuerzo-deformación. (Fuente: ISRM, 1981).....	100
Fig. 27 Fractura Típica de Ensayo de Tracción Indirecta.....	104
Fig. 28 Esquema del equipo de Corte Directo, SBEL, RM-101. (Fuente: DE MARCO, 1995).....	107
Fig. 29 Equipo de Corte Directo, SBEL, RM-102. Laboratorio de Mecánica de Rocas, U.C.V. ....	107
Fig. 30 Posición de la muestra en la Caja de Corte (Fuente; DEMARCO, 1995).....	109
Fig. 31 Montaje de la muestra en el material encapsulante.....	110
Fig. 32 Curva típica esfuerzo de corte-desplazamiento, en planos de foliación de esquistos cuarzo-micáceo-calcáreo de la Formación Las Mercedes, Caracas ( DE MARCO, 1995).....	114
Fig. 33 Representación del ensayo de corte directo para varios ensayos realizados a través de planos de foliación de esquistos cuarzo-micáceo-calcáreo de la formación Las Mercedes, Caracas. (DE MARCO, 1995).....	115
Fig. 34 Bases para la ubicación de muestras. (Fuente: ISRM, 1981).....	118

Fig. 35. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M10U4P50 y Fotografía de la fractura (Fuente: Elaboración Propia).....	135
Fig. 36. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M12U4P50 y Fotografía de la fractura .....	136
Fig. 37. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M12U4P51 y Fotografía de la fractura .....	137
Fig. 38. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M13U4P51 y Fotografía de la fractura .....	138
Fig. 39. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M5U4P50 y Fotografía de la fractura .....	139
Fig. 40. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M8U4P51 y Fotografía de la fractura .....	140
Fig. 41. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra MAU7D (sin fotografía de la fractura, la muestra se destruyó completamente).....	141
Fig. 42. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M2U9P48B y Fotografía de la fractura .....	142
Fig. 43. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M11U9 y Fotografía de la fractura.....	143
Fig. 44. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M3U9 y Fotografía de la fractura.....	144
Fig. 45. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M8U9 y Fotografía de la fractura.....	145
Fig. 46. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M9U9.2 y Fotografía de la fractura.....	146
Fig. 47. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M16U9 y Fotografía de la fractura.....	147
Fig. 48. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra MEU7 y Fotografía de la fractura .....	148
Fig. 49. Ubicación de Muestra para Ensayo de Tracción Indirecta. Prensa Hidráulica perteneciente al IMME-UCV .....	151
Fig. 50. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M1U9, y rugosidad .....	154
Fig. 51. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M3U9, y rugosidad .....	155
Fig. 52. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M3U9P48, y rugosidad.....	156
Fig. 53. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M2U4, y rugosidad .....	157
Fig. 54. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M7U4P50, y rugosidad .....	158
Fig. 55. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M6U4P51, y rugosidad.....	159
Fig. 56. Representación del ensayo de Corte Directo para varios ensayos realizados a través de planos de discontinuidad de la Unidad 4 .....	160
Fig. 57. Representación del ensayo de Corte Directo para varios ensayos realizados a través de planos de discontinuidad de las Unidades 7 y 9 .....	161
Fig. 58. Intercalación de estériles (Capas Oscuras) Unidad 9 .....	163
Fig. 59. Frente de Excavación Unidad 4.....	166
Fig. 60. Unidad 3. Sinclinal .....	167
Fig. 61. Detalle Unidad 9 .....	169
Fig. 62. Detalle Unidad 7 .....	169
Fig. 63. Detalle Unidad 4 .....	169
Fig. B.1. Casos de Remoción 1, 2, 3 y 4 (Fuente: SALCEDO, 1988) .....	183
Fig. B.2. Casos de Remoción 5, 6, 7 y 8 (Fuente: SALCEDO, 1988) .....	184
Fig. B.3. Casos de Remoción 9 (Fuente: SALCEDO, 1988) .....	185
Fig. C.1. Envoltorio de Rotura por cizallamiento en roca intacta (Fuente: UCAR, Sin Fecha) .....	196
Fig. E.1. Gráfico de correlación entre el martillo Schmidt Tipo M y Tipo L.....	201
Fig. E.2. Gráfico de correlación para el martillo de Schmidt (L). Relación entre la densidad de la roca, la resistencia a compresión y el número de rebote (BROWN, 1965) .....	202

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación con RQD (Fuente, DE MARCO, 1990).....	57
Tabla 2. Descripción y Ubicación de Perforaciones realizadas.....	64
Tabla 3. Clasificación de la roca en función de su resistencia a la compresión uniaxial.....	92
Tabla 4. Resultados Ensayo de Carga Puntual para la Unidad 4 .....	130
Tabla 5. Resultados Ensayo de Carga Puntual para Unidades 7 y 9.....	130
Tabla 6. Resultados Ensayo de Compresión Uniaxial.....	134
Tabla 7. Resultados Ensayo de Rebote de Schmidt .....	150
Tabla 8. Resultados Ensayo de Tracción Indirecta .....	153
Tabla 9. Resumen de Resultados Obtenidos .....	164
Tabla B.1. Clasificación del tipo de remoción. (Fuente: Salcedo, 1988) .....	189
Tabla B.2. Tabla Comparativa de Tractores (Bulldozers). (Fuente: Salcedo, 1988) .....	190
Tabla C.1. Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989) (Fuente: TRUZMAN, 2000) .....	191
Tabla C.2. Pautas para la Excavación y el soporte de Túneles con espaciamiento de 10 m, de acuerdo con el Sistema RMR. Necesidades de Sostenimiento Aplicable a túneles con 5 a 12 m de luz; tensiones verticales inferiores a 300 Kp/cm <sup>2</sup> construcción tradicional.(Después de Bieniawski, 1989) (Fuente: HOEK, 2000).....	192
Tabla C.3. Estimación del GSI, basado en descripciones geológicas (Fuente: TRUZMAN, 2000) .....	193
Tabla C.4 Valores de mi (Fuente: Hoek, 2000) .....	197
Tabla D.1. Clasificación preliminar de Muestras (Núcleos).....	198
Tabla D.2. Clasificación preliminar de Muestras para ensayo de Corte Directo .....	199
Tabla D.3. Clasificación preliminar de Muestras de mano (Cúbicas).....	200
Tabla G.1 Resultados de Ensayo de Carga Puntual Para La Unidad 4 .....	204

Tabla G.2 Resultados de Ensayo de Carga Puntual Para las Unidades 7 y 9.....	205
Tabla G.3 Resultados de Ensayo de Rebote de Schmidt Para La Unidad 4 .....	206
Tabla G.4 Resultados de Ensayo de Rebote de Schmidt Para La Unidad 7 y 9.....	207
Tabla G.5. Resultados de Densidad en Unidades 4, 7 y 9.....	208
Tabla G.6. Resultados de Densidad en muestras de estériles (Unidad 3 e intercalaciones de estériles Unidad 9). Uso de Parafina .....	209
Tabla G.7. Resultados de Densidad Unidad 8 (sin uso de parafina).....	210

Fuenmayor G. Oswaldo E.

**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LAS ROCAS DE LA  
CANTERA PERTENECIENTE A LA CORPORACIÓN DE CEMENTO  
ANDINO C.A. UBICADA EN EL MUNICIPIO CANDELARIA, ESTADO  
TRUJILLO**

**Tutor Académico: Prof. Pietro De Marco. Tutor Industrial: Geol.  
Agustín Gutiérrez. Tesis Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería.  
Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Especialidad: Minas. Año  
2001, N° de Pág. 217**

**Palabras Claves:** Caracterización Geomecánica, Corporación de Cemento Andino C.A., Densidad, Macizo Rocosos, Mecánica de Rocas

En el presente trabajo, se realiza la Caracterización Geomecánica de un Yacimiento de Roca Caliza, que pertenece a La Corporación de Cemento Andino C.A. Básicamente se caracterizan las unidades litológicas pertenecientes a las formaciones Luna y Maraca (Unidades 4, 7 y 9) en el Cerro Los Cedros Estado Trujillo.

Para esto, se realizan los diferentes ensayos de Mecánica de rocas a fin de obtener los parámetros que permitan la Clasificación Geomecánica del Macizo Rocosos

en cuestión y además de esto se determina la Densidad de la Roca Caliza (Unidades 4, 7 y 9) y de los Estériles ( Unidad 3, 8 e intercalaciones de la Unidad 9)

Se clasifica Geomecánicamente el Macizo, Utilizando diferentes criterios que permiten definir parámetros en cuanto a Escarificación, dureza y condición de la roca.

Se obtiene como Resultados finales, que las rocas de la Unidad 4 es Medianamente Resistente (Clasificación de Franklin), del Tipo III con una calidad Media (Clasificación de Bieniawski), y no necesita de Explosivos para ser arrancada (Escarificación difícil) (Clasificación de Salcedo)

Mientras que las Unidades 7 y 9, son Resistentes (Clasificación de Franklin), del Tipo II con una calidad Buena (Clasificación de Bieniawski), y se recomienda utilizar un tipo de remoción que combine voladora con escarificación (Clasificación de Salcedo)

## DEDICATORIA

*Cada uno tiene un sueño y lo interesante de la vida está en luchar por hacerlos realidad...*

*Ya que para llegar hasta el final, debemos superar muchos obstáculos y al llegar a ese último escalón, viendo hacia atrás, nos damos cuenta que esos obstáculos por más tontos que sean, nos hicieron crecer... Si fueron circunstancias, ya sabemos que hacer en caso de que se repitan... Si fueron personas, simplemente somos superiores, porque fuimos fuertes, y no sucumbimos nunca ante su ignorancia, más bien los comprendimos y aprendimos de ellos...*

*Es por esto, que dedico este trabajo, a todos los que sueñan y no se dan por vencidos...*

*Especialmente a...*

*Mi mamá, porque soñaste en que llegara hasta aquí y aquí estoy y espero que sigas soñando, porque quiero ir más lejos...*

## **AGRADECIMIENTOS**

***A Dios, a Santa Bárbara por acompañarme durante este difícil trayecto***

***A mi mamá y mi hermana por haberme ayudado incondicionalmente y por creer en mí...***

***A Pastora, por siempre estar allí cuando uno la necesita...***

***A mi "Printeta" Naty, por haber aparecido en el momento oportuno y por todas las cosas que hemos vivido juntos. Te Amo...***

***A mi "Printetita" Ariadna... Tabes???, bueno... Yo... Te quiero mucho, hasta el Chelo... Es cielto, es cielto! Pol tupuesto que sí!***

***A mis chamos Cristian, Gabriel, Gilbert, Guilmer y Gabriela...porque gracias a ustedes aprendí, aprendo y seguiré aprendiendo que la vida no es sólo gris, sino que tiene un montón de colores para vivirla...***

***A mis dos papás, Nerley y Gilberto por ser unas de las mejores personas que han entrado en mi vida. Gracias por adoptarme....***

***A mis tutores Ing. Pietro De Marco y Geol. Agustín Gutiérrez, por su apoyo durante la realización de este trabajo.***

***A mis amigos, Ana, Dityubet, Oswaldo, Javier, Johan, Los José Luises y Pedro, por una amistad por siempre.***

***A Verónica Labrador, Carlos Aguilar y Armando Fonseca por hacerme divertida mi estancia por esos lares, además de la valiosa ayuda que me prestaron...***

***A todas las personas que colaboraron en el desarrollo de este trabajo...Al equipo de Topografía, a los perforadores, al departamento de Recursos Humanos, al Equipo de Ingeniería Mecánica, y a todos los que me brindaron su apoyo durante la realización de este trabajo.***

***Al Ing. Sergio Rodríguez del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales de la UCV. Al Ing. Daniel Salcedo INGEOTEC***

***A quienes me formaron, no sólo como profesional, sino como persona... Crismar, Rosella Pezzuti, Ricardo Alezones, Alba Castillo, Pietro De Marco (otra vez...), Gianfranco Perri, Ladislao Pregitzer, Maritza Rivas, Mónica Martiz, Plinio Gamboa, Eleazar Colina, José Luis De Abreu por su objetividad y su profesionalismo al momento de enseñar. Están haciendo un buen trabajo, por favor No cambien....***

***A Todos, Infinitas Gracias!!!***

## INTRODUCCIÓN

Es importante para todo desarrollo minero, el conocimiento de las características del mineral a producir, ya que de esta forma se pueden definir parámetros específicos para los procesos mineros en cuestión. De una u otra forma estos parámetros influyen en elementos claves para optimizar la producción, tales como estabilidad de taludes, altura óptima de bancos, densidad del material (influye en el procesamiento del mismo y la determinación de su peso), grado de fragmentación del mineral, optimización del uso de equipos y tecnologías apropiadas para el arranque. También se debe tomar en cuenta que el muestreo realizado, puede apoyar en un futuro, al control y definición de áreas claves para el aprovechamiento del cuerpo mineral a explotar.

Debido a la necesidad existente en La Corporación de Cemento Andino C.A., de optimizar los procesos involucrados en la explotación minera que se llevan a cabo en el Distrito Candalaria, Estado Trujillo, se ha realizado la caracterización geomecánica de su yacimiento de roca caliza, con el fin de definir los datos que permitan obtener elementos claves para el diseño adecuado de los fundamentos inherentes a los procesos de extracción de mineral, elementos que al ser controlados mediante una adecuada planificación, pueden disminuir los costos y aumentar los niveles de producción de la empresa.

Se presentarán aquí, las teorías y conceptos que fueron utilizados en el desarrollo del proyecto, junto a la metodología aplicada y el análisis de los resultados

correspondientes a cada una de las etapas de la investigación, además de las conclusiones y recomendaciones inherentes al trabajo realizado.

# CAPITULO I

## GENERALIDADES

### 1. Objetivos

#### 1.1. *Objetivo General*

Caracterizar geomecánicamente las rocas ubicadas en el yacimiento explotado por la Corporación de Cemento Andino C.A.

#### 1.2. *Objetivos Específicos*

Determinar las características físicas y mineralógicas del macizo rocoso a estudiar (discontinuidades, espesores de capas, grado de meteorización)

Establecer el patrón de muestreo adecuado, según características físicas, mineralógicas y mecánicas del yacimiento, con el fin de garantizar la representatividad de las muestras a ensayar.

Determinar los parámetros de caracterización geomecánica de la roca (cohesión, ángulo de fricción, resistencia a la a compresión uniaxial, resistencia a la tracción indirecta, resistencia al corte, modulo de elasticidad, densidad)

## 2. Justificación

La Corporación de Cemento Andino C.A. necesita conocer las características geomecánicas de su yacimiento, con el fin de mejorar las condiciones del mismo y desarrollar de forma adecuada la explotación de la caliza, ya que igualmente las características del material, permitirán diseñar mejor los patrones de voladura, para el arranque de mineral, bancos con alturas adecuadas, así como también en los procesos de trituración del mineral, para los que es necesario conocer las características del material a procesar.

Existen varios factores que afectan los procesos operativos durante la explotación de un yacimiento mineral. Los equipos de minería no pueden ser operados en bancos estrechos, deben moverse por vías de acarreo con pendientes adecuadas que mantengan una óptima operación, lo que quiere decir que los taludes deben tener una pendiente poco pronunciada y el diseño del banqueo estará determinado por las condiciones propias del desarrollo. Deben seleccionarse los equipos más adecuados a la operación a realizar (Buldozgers, retroexcavadoras, etc.), a fin de remover el mineral rico y los volúmenes de estéril de la manera más beneficiosa para la producción, evitando el sobretrabajo de los equipos de arranque. Igualmente los equipos de trituración se ven afectados si no se respetan las especificaciones para el material que van a procesar; conociendo las características del mismo, se aprovecharía de una manera sistemática las funciones del equipo

Estas razones hacen importante para La Corporación de Cemento Andino C.A. la caracterización de su yacimiento, siendo este un apoyo en los controles de rendimiento y la vida útil del yacimiento.

### **3. Alcance**

La Investigación se limitará a resolver el problema de la caracterización geomecánica de las rocas de las formaciones Luna y Maraca en el Cerro Los Cedros, yacimiento de roca caliza, de la Corporación de Cemento Andino. Por lo cual queda fuera de los límites de esta investigación la aplicabilidad de los resultados obtenidos en la planificación y diseño de la cantera.

### **4. Antecedentes**

En la Universidad Central de Venezuela, se han realizado varios Trabajos relacionados a la caracterización geomecánica de yacimientos minerales, y sobre tópicos relacionados a esto, tales como: muestreo, equipos, ensayos, etc. Así mismo en la empresa objeto de este estudio, fue realizado un proyecto de explotación para 6 años por el Ing. Roberto Ucar Navarro, en el cuál se describen las características de la roca caliza, según ensayos realizados en el Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes.

En este "Proyecto de explotación (1991-1996) Cemento Andino S.A.", se realizan los cálculos de las diferentes características de la roca, así como también se aplican

estos resultados a las diferentes etapas del desarrollo minero, en las que son involucradas las características físicas y químicas de la roca, a saber: Descripción de los sistemas de explotación del yacimiento y características de los equipos (diseño de taludes, nuevo diseño de los frentes de explotación, altura máxima de la excavación, excavación del material) y perforación y voladura ( Perforación de los barrenos, cálculo del retiro, donde se involucra la densidad del material a volar).

La SME (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.), igualmente ha publicado algunos papers en su “Annual Meeting”, con información relacionada al tema de estudio.

## **5. La Empresa**

Cemento Andino S.A. (C.A.S.A.), fue creada a mediados de los años 70 para cubrir el déficit de cemento que existía para ese entonces en la región andina, con un capital mixto donde el estado venezolano aportó el 39 % y accionistas privados, el restante 61 %.

Desde su creación se contrató los servicios de la empresa Suiza Cementia Engineering Consulting L.T.D. para el estudio de factibilidad, construcción y puesta en marcha de la fábrica; en febrero de 1980 se inicia la construcción de tecnología Polysius, y en octubre de 1982 inicia operaciones con una capacidad de producción de 540000 TM clinker por año.



## **5.2. Ubicación Geográfica del Área**

El área de la explotación tiene una extensión de 500 ha, ubicadas entre las siguientes coordenadas:

<b>LATITUD NORTE</b>	<b>LONGITUD OESTE</b>
<b>70°23'00''</b>	<b>09°38'08''</b>
<b>70°25'00''</b>	<b>09°36'35''</b>

Desde el punto de vista político territorial, el desarrollo se ubica en el Cerro Los Cedros, sector Llanadas de Monay del Municipio Candelaria del Estado Trujillo.

## **5.3. Reservas Probadas y contenido de Carbonato**

El yacimiento perteneciente a la Corporación de Cemento Andino, C.A., cuenta con las siguientes reservas para el año 2000 de material rico y estéril<sup>1</sup>:

Unidad 7 y 9: Sector Maraca, 2000000 ton. Con un contenido de carbonato > 85 %

Estéril a remover, intercalaciones y unidad 6 y 8, 1000000 ton

---

<sup>1</sup> Las unidades aquí definidas, se especifican en el capítulo III, Geología Local

Unidad 4: En el sector Luna se reporta el contenido de carbonato de la siguiente manera:

CaCO <sub>3</sub>	80-90 %	7561208 ton
CaCO <sub>3</sub>	75-80 %	3607051 ton
CaCO <sub>3</sub>	70-75 %	2971861 ton
CaCO <sub>3</sub>	60-70 %	4106803 ton
CaCO <sub>3</sub>	> 60 %	753077 ton <sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Fuente: (FONSECA, 2000)

## CAPÍTULO II

### CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO

Según el estudio de impacto ambiental realizado por la empresa Ingeniería Caura, S.A., se define la siguiente caracterización:

#### 1. Clima

“En el área de los Llanos de Monay el régimen pluviométrico presenta condiciones especiales y distintas, debido a las características orográficas de su geografía; la orografía meridiana se abre brevemente a la depresión lacustre por la brecha de Agua Viva; al este de la Serranía de Torococo se extiende entre fallas un corredor que se inicia en las sabanas de Monay y prosigue hacia el Norte; cuando el interior de esta depresión se calienta más que la amplia superficie lacustre vecina, las bajas presiones que se forman detrás de la Serranía atraen masas de aire húmedo situadas sobre el Lago, las cuales se deshacen a menudo en lluvia al ponerse en contacto con las corrientes frías provenientes de Los Andes, donde da como resultado, un régimen pluviométrico cuatripartito, diferente al resto del área circunvecina”.

## **2. Precipitación**

“En general se presentan dos picos máximos en la distribución anual de las lluvias, uno de marzo a mayo, y otro de agosto a noviembre, siendo octubre el mes de mayor precipitación, con un promedio de 177.7 mm”.

## **3. Temperatura**

“El área se encuentra a una altura entre los 250 y 400 m sobre el nivel del mar, por lo que la temperatura tiende a mantenerse uniforme durante todo el año; el rango de las temperaturas medias mensuales varía entre los 26.1 °C y los 27.7 °C, siendo la media anual de 27.1 °C”.

## **4. Vientos**

Se determinó un grado BEAUFOR de 2, tipo brisa tenue, con velocidad entre 6 y 11 km/h, observándose pocos efectos de agitación de árboles. Para determinar esto se utilizó la escala BEAUFOR DE VIENTO (norma COVENIN 2.112), la cuál sirve para determinar según los efectos observados, el tipo de viento en un área específica.

En un trabajo de muestreo de calidad del aire, realizado por la empresa ENVIROMMENTAL ASSESSMENTS ACASI, C.A., se obtuvo como resultado que la

dirección predominante del viento es en sentido suroeste con una velocidad máxima de 3.6 m/s.

## **5. Geomorfología**

“Los llanos de Monay se encuentran ubicados en la cuenca media del río Motatán. El área es una depresión rodeada de montañas por el norte con formaciones montañosas de origen terciario, al sur las estribaciones montañosas de la cordillera de Trujillo y al este la prolongación de la misma cordillera”.(INGENIERIA CAURA, S.A., 2000)

En el área de la explotación, “...se presenta un paisaje de planicie, la cual se encuentra encerrada, conformada por deposiciones de varios ríos, en su mayoría cuaternarias, y en ella se encuentran suelos con diferente potencial de desarrollo, originados como producto de la dinámica de esos ríos y que se encuentran en forma de asociaciones de terrazas de diferentes edades.

También se encuentra el paisaje de piedemonte, posición intermedia entre la montaña y la planicie, conformado por asociaciones de terrazas y colinas; los distintos niveles de terraza son indicativo de que en el pasado hubo períodos de sedimentación y disección sucesivos, producto de distintos períodos climáticos y de progresivos alzamientos orográficos.

Estos niveles de terrazas están relacionados con el grado de desarrollo pedogenético, ocupando las posiciones más elevadas aquellas que cronológicamente son más antiguas, hasta llegar a los suelos de menor grado de desarrollo que son los que ocupan las estrechas fajas de deposiciones actuales de los distintos ríos.

Por último se encuentra un sistema de montañas, que son medios morfodinámicamente activos, donde se presenta un proceso de erosión hídrica debido a la topografía inclinada del medio.

En las depresiones de los ríos Botey, Timiache y Carache predominan sedimentaciones calcáreas provenientes de las formaciones del cretáceo; los sedimentos de las quebradas La Catalina, La Betico y del río Monaycito son de origen metamórfico.” (INGENIERÍA CAURA, S.A., 2000)

## **6. Hidrografía y drenaje**

“El área de los Llanos de Monay se ubica en la cuenca media del río Motatán, donde diferentes cursos de agua drenan el área de los llanos de Monay. El principal curso de agua que atraviesa el área es el río Carache, el cual corre de este a oeste estableciendo una asociación de terrazas de deposición; este río recoge las aguas de la quebrada Timiache, Jajó y otras.

Al sur se encuentra el río Monaycito el cual recoge las aguas de las quebradas La Betico, Guamas, Los Monjes, El Limón y El Naranjal, ambos ríos descargan sus aguas a la represa de Agua Viva.

En la Figura 2 se observa la red hidrográfica del área.

**Fig. 2 Red Hidrográfica del área ( Fuente: INGENIERÍA CAURA, S.A., 2000)**

## CAPITULO III

### GEOLOGÍA

#### 1. Geología Regional

Tectónicamente, la zona es muy compleja. Como estructuras principales en el área de cantera se tiene un sinclinal y un anticlinal con dirección preferencial N35E afectados por fallas normales semi-paralelas a los ejes. Las unidades 9, 8, 7, 6 y 5 Formación Maraca ( unidades definidas por la empresa para un control interno de material rico y estéril, detalladas en la geología regional) hacen parte del flanco occidental del sinclinal con inclinación de las capas de 30° en contra de la pendiente, lo que hace difícil y antieconómico su explotación a cielo abierto en la parte central y sur de la cantera. En la parte norte, área de la cantera “Maraca” las unidades 9, 8 y 7 afloran con relación al descapote favorable y es donde se desarrolla la actividad minera. (GUTIERREZ, A, 1999).

##### 1.1. *Formación La Luna*

**“Localidad tipo:** Quebrada La Luna, unos 200 m al oeste de la Hacienda La Luna, 16 km al oeste de Villa del Rosario, distrito Machiques, estado Zulia, sierra de Perijá. La ubicación y el acceso fueron ilustrados por Schweighauser y Boomer (1960), la columna estratigráfica fue ilustrada por Rod y Maync (1954), y descrita por Jordán y Scherer (1982).

**Descripción litológica:** La Formación La Luna consiste típicamente de calizas y lutitas calcáreas fértidas, con abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa, delgadamente estratificadas y laminadas, densas, de color gris oscuro a negro; la ftanita negra es frecuente en forma de vetas, nódulos y capas delgadas; las concreciones elipsoidales a discoidales de 10 a 80 cms de diámetro, son características típicas de la formación, que permiten reconocerla en cualquier afloramiento. Muchas de las concreciones tienen amonites y otros macrofósiles en su interior. Las capas de caliza varían en espesor de 1 - 2 cms hasta unos 50 cms, con estratificación uniforme y monótona. Fracturas frescas de las calizas tienen olor característico y fuerte a bitumen. Detalles de secciones finas se encuentran en Hedberg (1931) y Ford y Houbolt (1963).

En la región de Trujillo-Lara, la unidad ha sido subdividida en tres miembros (O. Renz, 1959) denominados La Aguada, Chejendé y Timbetes, en orden ascendente. En la región de Táchira-Barinas, Renz nombró la Lutita de La Morita, considerada por autores posteriores como miembro local de las formaciones La Luna y Navay. Otra unidad que algunos consideran como miembro de la Formación La Luna es el Chert (Ftanita) de Táchira. En general, la litología descrita caracteriza a la Formación La Luna. Una excepción es el Miembro Machiques de la Formación Apón, apreciablemente más antiguo, cuya similitud con las calizas de la Formación La Luna ocasionó confusión e identificaciones erróneas en algunas de las primeras publicaciones.

**Espesor:** Los espesores en la cuenca de Maracaibo varían entre 100 y 300 metros, con tendencia a aumentar de sur a norte. En la localidad tipo Jordán y Scherer

(1982) midieron 129 m en una sección fallada, Hedberg y Sass (1937) estimaron casi 300 m para la misma sección. A lo largo del frente oriental de la sierra de Perijá la formación tiene espesores que no superan los 183 m. En el valle del río Carache tiene 315 m y en el río Buena Vista en Trujillo tiene 70 - 100 m. El espesor se reduce sobre el arco de Mérida. En la concesión Barco (Colombia) varía entre 43 a 86 m. Savian (1993) presenta un mapa isópaco de la Fm La Luna.

***Extensión geográfica:*** La unidad se presenta en toda la extensión de la cuenca del lago de Maracaibo, estado Zulia, como también en los estados Falcón, Lara, Trujillo, Mérida, Táchira, Barinas y la península de La Goajira, Colombia.

***Expresión sísmica:*** la Formación La Luna infrayace a las lutitas de la Formación Colón en gran parte de la cuenca de Maracaibo; tiene tres (3) grupos de reflectores fuertes, contrastantes y continuos, en la mayoría de las secciones sísmicas. Estos reflectores se encuentran debajo del reflector "caliza de Socuy", usado tradicionalmente como "tope del Cretáceo" en las interpretaciones sísmicas.

***Expresión topográfica:*** la formación ocupa una delgada franja de afloramientos en el flanco oeste de la cuenca de Maracaibo, de topografía baja limitada por el este por las colinas prominentes de las formaciones La Sierra y Misoa y por el oeste por la Formación Maraca, también de mayor expresión topográfica.

**Contactos:** En la región del lago de Maracaibo, la Formación La Luna en general suprayace concordantemente a la Formación Maraca, la más alta de las calizas conchíferas del Grupo Cogollo, e infrayace, también concordantemente, a la Formación Colón. Sin embargo, hacia el sur la unidad grada lateralmente a la Formación Capacho y su contacto inferior se define por la variación en sentido descendente a una alternancia de tipos variables de lutita y caliza. En el contacto La Luna-Colón, por debajo de las lutitas características de la Formación Colón, se presenta una extensa zona glauconítica (Miembro Tres Esquinas), que localmente infrayace a una caliza fosilífera (Miembro Socuy). Los primeros autores abrigaron dudas en cuanto a la formación incluyente de estas dos subunidades. Actualmente se considera a la caliza de Socuy como miembro de la Formación Colón, y al Miembro Tres Esquinas como límite superior e incluido en la Formación La Luna, Boesi et al (1988), Romero y Galea (1995).

**Fósiles:** La Formación La Luna aparentemente se depositó en una sucesión euxínica y contiene pocos fósiles bentónicos; abundan los foraminíferos planctónicos (*Rotalipora*, *Globotruncana*, *Guembelina*) y los restos de peces. Los ammonites (*Coilopoceras*, *Barroisiceras*, *Hoplitoides*, *Neoptychites?*, *Peroniceras*, *Texanites*) son localmente comunes Renz (1959). El Turoniense está bien establecido por la presencia del lamelibranquio de concha tenue *Inoceramus labiatus* SCHLOTHEIM, y numerosas especies de ammonites (Sutton, 1946; Liddle, 1946; Renz, 1959) entre las cuales Ford y Houbolt (1963) consideran que dos especies, *Texanites texanum* ROEMER y *Parelasticeras sieversi* GERDHART son índices del Santoniense. Renz (1982) reportó una fauna de ammonites caracterizada por los géneros *Acanthoceras*,

*Protacanthoceras*, *Fagesia*, *Nannovascoceras*, *Vascoceras*, *Paramammites*, *Pseudoneoptychites*, *Neoptychites*, *Mammites*, *Watinoceras*, *Kamerunoceras*, *Mitonia*, *Pseudaspidoceras*, *Lenticeras*, *Hourcquia*, *Ankinatsytes*, *Subprionotropis*, *Hauericeras*, *Paralenticeras*, *Eulophoceras*, *Forresteria*, *Prionocycloceras*, *Harleites* y *Gauthiericeras*. Romero y Galea (1995) mencionan *Bolivinooides culverensis* y *Bolivinooides sirticus* del Campaniense, recolectados del Miembro Tres Esquinas en el tope de la formación, donde además destacan las abundantes bioturbaciones producidas por *Planolites* y *Thalassinoides*, indicando que el diámetro de los icnofósiles aumenta hacia el tope de la sección.

**Edad:** Cretáceo: Cenomaniense a Campaniense.

**Correlación:** La parte inferior de la Formación La Luna se correlaciona por transición lateral directa con la Formación Capacho, más variable, en la región de los Andes, y con la Formación Escandalosa, arenosa, en la cuenca de Barinas. En su conjunto se correlaciona con la Formación Querecual, litológicamente similar, de Venezuela oriental.

**Paleoambientes:** La formación La Luna aparentemente se depositó en un ambiente euxínico de aguas cuya profundidad ha sido objeto de mucha controversia. Boesi et al (1988) indica profundidades que van de 100 m en el Turoniense hasta aproximadamente 800 m en el Campaniense, y mencionan condiciones euxínicas del

Turonense hasta el Santoniense. Romero y Galea (1995) mencionan ambientes disaeróbicos para el Miembro Tres Esquinas del Campaniense.

**Geoquímica:** La Formación La Luna es considerada la principal roca generadora de hidrocarburos de la cuenca de Maracaibo. Garner (1926) aparentemente fue el primero en postular la generación de hidrocarburos de las calizas negras, finamente laminadas de la formación La Luna. Hedberg (1931) identificó las características generadoras de la formación mediante el análisis geoquímico de 9 muestras provenientes del flanco occidental de la cuenca de Maracaibo. Vierma (1984), Cabrera (1985) y Andara (1990) han demostrado, mediante diversas técnicas geoquímicas modernas, la correlación crudo-roca madre de muchos de los crudos producidos en la parte norte y central de la cuenca de Maracaibo con las calizas bituminosas de la Formación La Luna en el área de Machiques-Villa del Rosario.

Jordán y Scherer (1982) hacen una descripción detallada y estudian la petrografía orgánica y maduración de la sección tipo en el estado Zulia, la cual fue analizada con isótopos estables de Carbono por Vierma (1984), demostrando que los crudos de los campos Urdaneta, Mara y Boscán se originan a partir de rocas generadoras de la Formación La Luna.

Baptista (1994) comparó mediante geoquímica y petrografía detallada las secciones tipo de la Formación La Luna en los edos. Zulia y Trujillo. Cromatogramas

seleccionados de la quebrada La Luna y de la sección de Chejendé también se presentaron en este trabajo.

**Sinonimia:** La Formación Urumales de Liddle (1946, p. 250) es equivalente a la facies más arenosa de la Formación La Luna en el norte del Táchira. La Formación Táchira de Hedberg y Sass (1937, p. 81) es, de acuerdo a Sutton (1946), equivalente a la Formación La Luna". (LÉXICO ESTRATIGRÁFICO, 1997)

## **1.2. Formación Maraca**

**“Localidad tipo:** Rod y Maync (*op. cit.*) dan como sección tipo, el caño Maraca, un tributario del río Yasa, al suroeste de Machiques, distrito Perijá, estado Zulia. El tope de la formación está 1.300 m al oeste de la hacienda "Maraca".

**Descripción litológica:** Consiste en pocas areniscas glauconíticas y calcáreas hacia la base, en transición con la Formación Lisure infrayacente, pero el carácter más distintivo lo constituyen las calizas bioclásticas coquinoideas macizas, formadas predominantemente por *Ostreas* y *Trigonia*, con algunas, intercalaciones de capas delgadas de margas y lutitas de color gris y ocre claros. También puede presentar ooides y granos cubiertos, y algunos granos angulares de cuarzo, fosfato y pirita. Las calizas se asemejan a la de los miembros Piché, y Tibú de la Formación Apón.

Bartok *et al.* (1981) para el subsuelo de la cuenca de Maracaibo, definen la secuencia en la base con areniscas cuarcíticas, capas de carbón y packstone con depósitos de interbarra con abundantes oncolitos, algunas oolitas, pellets, granos compuestos que terminan en un biostromo de pelecípodos, que gradúa hacia las calizas bituminosas de la Formación La Luna suprayacente.

León (1975) en el campo Urdaneta Noreste, define la formación como calcarenitas bioclásticas de parasidad entre 3-5%, a veces con cavidades de disolución y fracturas.

**Espesor:** En el caño Maraca, Rod y Maync (*op. cit.*) midieron 40 m, e igual espesor en la quebrada Santa Rosita. En el campo Cusare, 120 m; río Yasa, 85 m; en el río Apón, 60-65 y 80 m en el río Negro.

En el subsuelo del lago de Maracaibo, en el campo Urdaneta Noreste, León (*op. cit.*) reconoce 13,7 m (45') y en el campo Alpuf, Quijada y Caldera (1985) dan valores entre 19-29 m. En los andes se adelgaza y en Táchira, Renz (1959) reporta 10-15 m, y entre 20-25 m en las áreas de Chejendé y Barbacoas.

**Extensión geográfica:** Se reconoce por la sierra de Perijá hasta el río de Oro, pero no se ha reportado en la Concesión Barco al suroeste. Hacia los andes no es reconocida por autores como Ramírez y Campos (1972), en Táchira-Tarra, y Useche y

Fierro (1972), en Pregonero. Renz (1959) delinea la Formación La Puya (hoy considerada como equivalente de Maraca) en el camino La Grita-Seboruco y al norte de los estados Trujillo y Lara. Hacia el sur se vuelve arenosa y forma parte de la Formación Aguardiente. En la subcuenca Lara-Trujillo, García Jarpa *et al.* (1980) la incluyen en el tope de la Formación Peñas Altas, por ellos definida.

**Contactos:** La base es transicional con la Formación Lisure, colocándose en el primer paquete de calizas no glauconíticas. El contacto superior coincide con la primera aparición de calizas bituminosas negras y laminadas, de la Formación La Luna, en una transición rápida, que según León (1975), pudiera pensarse en un diastema, aunque la Formación Maraca siempre se ha encontrado presente.

**Fósiles:** Renz (1977), presenta una lista de la fauna encontrada en los andes: *Exogira boussingaulti*, *Ostrea scyfax*, localmente *Terebratula* y rudistas. En el tope de la formación, amonites de los géneros y subgéneros *Oxitropicoceras* (venezoliceras), *Hysterocheras*, *Mortoniceras*, *Parengonoceras*, *Knemiceras*, *Neophlycticeras*, *Desmoceras*, *Anapuzosis* y *Bihamites*, dentro de la zona *Hysterocheras*. En Perijá son muy abundantes *Trigonia* sp. y *Ostrea*, pero no se han encontrado amonites.

**Edad:** Según Renz (1977)?, los amonites citados de los andes proporcionan una excelente documentación para asignarle una edad Albiense tardío inferior. Dentro de la subcuenca de Machiques, por su posición estratigráfica, el mismo autor sugiere una

edad Cenomaniense, por estar bien datada la Formación Lisure infrayacente, con amonites del Albiense tardío y por la edad Turoniense temprano de la Formación La Luna suprayacente.

**Correlación:** La Formación Maraca es correlativa cronológicamente con la base de la Formación Capacho de la subcuenca de Uribante, la base de la Formación La Luna de Lara-Trujillo y la base de la Formación Escandalosa de Barinas, pero por correlación litoestratigráfica, corresponde al tope de la Formación Aguardiente y la Caliza La Puya de Renz (1959), de las subcuencas de Uribante y Lara-Trujillo respectivamente, y a la unidad "A" de Bartok *et al.* (1981).

**Paleoambientes:** León (1975) considera que la formación representa una facies de aguas llanas, cercana a la costa, Bartok *et al.* (*Op. cit.*) interpretan ambientes lagunales a intramarea en la base, que pasa a marino llano hacia el tope". (LÉXICO ESTRATIGRÁFICO, 1997)

## 2. Geología Local

“Los yacimientos de Los Cedros comprenden una formación variada de arcilita, caliza arcillosa, caliza y caliza masiva con arenisca y materias gruesas entremezclados. Litológicamente, los distintos tipos de rocas son bastante diferentes y, al respecto

fueron agrupados a 9 unidades (Ver mapa [anexo A](#)), representadas en orden descendiente como sigue:

**Unidad 1:** Es una formación arenosa conteniendo arenisca de color rojo y anaranjado-café de grano medio hasta grueso y arenisca no estratificada (gritstone) con menores capas de arcilita. Se da en los flancos orientales y meridionales de Los Cedros y tiene un espesor de hasta 30 m

**Unidad 2:** Comprende arcilita fisible con capas menores de arenisca. La arcilita es de color predominantemente negro pero a la intemperie, adquiere tonalidades rojas, anaranjadas y café. Los yacimientos locales son ferruginosos y calcáreos. Las existencias quedan limitadas a los límites de la Silla de Los Cedros y la unidad varía entre 25 y 35 m de espesor.

**Unidad 3:** Es el miembro superior de la formación La Luna y aflora en la cumbre occidental y oriental de la colina. En el este, la unidad tiene un espesor aparente de más de 80 m, pero el espesor real será probablemente del orden de 55 a 60 m

Litológicamente, la unidad comprende mayormente arcilita negra con capas delgadas de carbón, no calcáreas, con capas entremezcladas de arcilita calcárea y caliza, de un espesor de 10 m, en intervalos regulares por toda la secuencia. La secuencia entera se caracteriza por la presencia de pirita, bien en forma repartida o bien en concentraciones locales.

En los niveles superiores, sin embargo, normalmente entre 15 ó 20 m debajo de las capas de superficie, la pirita está ampliamente oxidada por la acción de la intemperie.

**Unidad 4:** Es el miembro local de la formación La Luna y se extiende a lo largo de la cresta central y del flanco occidental de la colina. La unidad general es de un espesor de 70 m y comprende formaciones de calizas micríticas grises oscuras a negras, duras, en capas de hasta 0.5 m, intercaladas con capas de limolita calcárea, arcillolita y lutita. Igual a la formación de arcilita colocada arriba, la unidad 4 se caracteriza por una cantidad variable de materiales de pirita y de carbón; y además, contiene una cantidad de capas delgadas, que eleva los contenidos locales relativamente altas de fosfato. Los niveles más altos están en la parte superior de la formación.

**Unidad 5:** Se encuentra debajo de la formación La Luna y se da en la parte occidental y septentrional de Los Cedros. El espesor es generalmente de 50 m y se caracteriza esta unidad por la presencia de caliza de una calidad total inferior; son areniscas de grano fino con matriz limo arcillosa de color café, con capas de caliza y calcarenitas gris, duras, y niveles de lutita y lodolitas.

**Unidad 6:** Es predominantemente arenisca de grano fino a medio, cuarzosa, de color amarillo rojizo por la presencia de óxido de hierro. En la parte norte de la colina hay amplias existencias de la arenisca y según perforaciones realizadas, tiene un espesor de 30 m

**Unidad 7:** Se da a lo largo de la longitud entera del flanco occidental de la colina, y forma la cresta de la cumbre en el extremo septentrional. El espesor es de aproximadamente 15 m y la unidad consiste principalmente de caliza masiva gris, dura, de alta calidad, compacta, con caliza arenosa formando, los metros más bajos y venas de calcita. Un reducido horizonte de arcilita(horizonte lutítico) existe localmente en la parte superior de la formación. La unidad se caracteriza por la presencia de un horizonte de fósiles distinguibles, la capa "Actaeonella"-

Se considera que la unidad 7 es explotable en el extremo norte de la colina, donde únicamente predomina la arenisca de la unidad 6.

**Unidad 8:** Es un horizonte de arenisca de grano medio cuarzosa, muy abrasiva, color gris claro a blanco de un espesor de 8 a 10 m. Existe en el flanco occidental de la colina, en la parte central y septentrional del yacimiento.

**Unidad 9:** Es la más gruesa de las formaciones de caliza. Gris clara, masiva, compacta en bancos de hasta 3 m. Su espesor es de 35 m a 45 m. La unidad contiene capas intercaladas de areniscas de grano fino de color amarillo claro y limolitas que existen en toda el área y que en total, comprenden el 21-25% del espesor total de la formación. Las areniscas se caracterizan por su espesor de aproximadamente 3 m y se considera que se pueden arrancar independientemente de los horizontes de caliza.

Los cuatro horizontes de caliza de la Unidad 9 tienen un espesor de aproximadamente 39 m. Consisten de caliza de alta calidad (90% CaCO<sub>3</sub>), muchas veces de granulometría fina, cada capa va siendo arenosa en dirección a la base, y

tiene normalmente un contacto más o menos transitorio con el horizonte de arenisca situado debajo. Las dos capas superiores son generalmente de un grado total inferior al de los dos horizontes inferiores.

La unidad 9 existe a lo largo de la extensión entera del flanco occidental de la colina, pero, debido a sus pendientes relativamente accidentadas, se considera explotable, únicamente el extremo septentrional de la colina.” (CEMENTIA ENGINEERING AND CONSULTING LTD, 1977)

Las unidades se encuentran ubicadas en las formaciones La Luna y Maraca, en la forma siguiente:

#### **FORMACIÓN LA LUNA**

Unidad 1

Unidad 2

Unidad 3

Unidad 4

#### **FORMACIÓN MARACA**

Unidad 5

Unidad 6

Unidad 7

Unidad 8

Unidad 9

## CAPÍTULO IV

### BASAMENTOS TEÓRICOS

#### 1. Roca Caliza

Según (PDVSA-INTEVEP, 1997), en su Museo Geológico Virtual se definen las siguientes características de la roca Caliza, la cuál constituye la materia prima para la realización del Cemento.

##### 1.1. *Etimología*

Del latín calcarius.

##### 1.2. *Descripción*

Es una roca sedimentaria formada por al menos un 50% de Calcita, muy abundante en la naturaleza, pudiendo estar acompañada de algo de Dolomita, aragonito y siderita. Las calizas tienen poca dureza (se rayan con un cuchillo), y en frío dan efervescencia (desprendimiento burbujeante del CO<sub>2</sub>). Contienen frecuentemente fósiles, por lo que son de importancia en estratigrafía.

### **1.3. Origen**

Tanto por su origen como por su estructura pueden diferenciarse varios tipos: la de origen orgánico formada por acumulaciones de restos calizos de seres vivos (conchas de moluscos, caparazones de foraminíferos, esqueletos de corales, etc.); de origen detrítico, resultado de la acumulación y compactación de barros calizos, y de origen químico, formada por la precipitación de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ )

### **1.4. Localización**

Con la excepción del Escudo de Guayana, Venezuela posee importantes depósitos de calizas ubicadas a lo largo de su geografía, los cuales se asocian con las extensas cuencas que cubrieron a Venezuela desde el Cretáceo Medio hasta el Pleistoceno.

Muchas de las secuencias estratigráficas han sufrido un intenso metamorfismo como sucede en la Cordillera de la Costa, transformando las calizas originales en mármoles. Otras secuencias, como las ubicadas en Falcón, se presentan como extensas capas asociadas con depósitos comerciales de fosfatos, dolomita y arcillas. Los depósitos venezolanos de calizas sustentan importantísimas industrias tales como: construcción, fertilizantes, alimentos para animales, marmolería, cal, siderurgia, pintura, fibras sintéticas, caucho y papel, tanto en el centro como en las zonas orientales y andinas, de hecho, Venezuela es uno de los países con mayor producción y consumo de caliza.

Los depósitos de calizas de nuestro país se asocian con diferentes niveles estratigráficos, pero fue en el Cretáceo y el Mioceno cuando la depositación se hizo intensa. Esto se evidencia con los enormes depósitos comerciales asociados con el Grupo Cogollo en el occidente y la Formación El Cantil en el oriente del país.

Ambas formaciones tipifican al cretáceo y quizás poseen las reservas más importantes de Venezuela, tanto por su extensión como por su calidad.

Con relación al Mioceno, enormes depósitos de calizas de óptima calidad afloran extensamente a lo largo de Falcón septentrional y oriental, constituyendo la materia prima de varias fábricas de la construcción.

En la región Central, Distrito Federal, Estado Miranda, Carabobo, desde Petare hasta Valencia, existen grandes yacimientos de calizas cristalinas, pertenecientes a las Formaciones Antímano, Las Mercedes, Las Brisas (Grupo Caracas), encontrándose en explotación en las zonas de Baruta, El Encantado, Macaracuay, La Vega, Carayaca, Cagua, Bárbula, La Victoria, Los Guayos, Valencia y Taguayguay, a fin de suministrar material a la industria de la construcción.

En el Estado Aragua existen depósitos de los denominados Morros que van desde Villa de Cura hasta Ocumare del Tuy, siendo los principales: Morros de San Juan, Morros de San Sebastián.

### **1.5. Aplicación**

En la industria de la construcción se utiliza como materia prima básica para la obtención de cemento, también en la fabricación de cal y depósitos de agua e hidrocarburos.

### **1.6. Asociaciones**

Básicamente Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ )

### **1.7. Estadísticas y mercado**

Es uno de los minerales industriales no metálicos más abundantes y explotados en nuestro país desde tiempos muy remotos. Ha tenido considerables altas y bajas en su producción, en gran parte por la caída en el consumo en la industria de la construcción, sin embargo para 1999 debió alcanzar un nivel superior a 18 millones de toneladas métricas.

## **2. Cemento**

Una de las principales importancias de la caliza es que ésta es la materia prima para la elaboración del cemento, el cual es un material básico para el mundo actual, ya

que sería impensable el estilo de vida actual si no se contara con tan importante material de construcción.

La característica esencial del cemento es que es un material calcinado que se endurece en reacción con el agua cuando es mezclado como una pasta. El conocimiento del cemento ha sido explotado desde la antigüedad, se tiene conocimiento de que durante la construcción de las pirámides en el antiguo Egipto, ya era utilizado el cemento en dichas construcciones, inclusive los Romanos y los Griegos utilizaban cemento que era producto de la mezcla de cenizas volcánicas y cal, mezcla que todavía se emplea en la formulación del cemento pozzolanico.

El tipo de cemento más ampliamente usado es el cemento Portland, que fue patentado en Inglaterra en 1824 por Joseph Aspdin, quién lo produjo mediante la calcinación de las calizas impuras. El nombre del cemento Portland proviene de la similitud en apariencia del concreto hecho con éste cemento con la roca Portland. El cemento tipo Portland es más resistente que el cemento pozzolanico y tiene mejores características de fraguado.

El cemento Portland está compuesto esencialmente por tres componentes la cal (CaO), la sílice (SiO<sub>2</sub>) y la Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). El cemento Portland actualmente se realiza mediante combinaciones estrictas de arcillas y calizas, según sean los contenidos presentes de éstos componentes. Además de los componentes antes mencionados, se requiere de cierta cantidad de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) lo que sirve para catalizar las reacciones de formación del clinker y mejorar sus características. Así como la adición de hierro resulta beneficiosa para la formación del clinker el óxido de magnesio (MgO) es nocivo

para este proceso, el porcentaje de óxido de magnesio debe estar por debajo del 2% en peso.

En la Corporación de Cemento Andino CA, se utiliza roca caliza como materia prima de carbonato de calcio, estas calizas provienen de las formaciones La Luna y Maraca, estableciéndose una clasificación de acuerdo al porcentaje presente de carbonato de calcio en Caliza Rica a aquella que posee  $\text{CaCO}_3$  Mayor al 90 % y La Luna a aquella que proviene de dicha formación y cuyo carbonato de calcio oscila entre 80% y 85%.

Las rocas calizas empleadas por la Corporación de Cemento Andino CA en la elaboración del cemento presenta las siguientes características físicas.

Peso Específico (banco):  $\gamma_b = 2.400 \text{ Kg/m}^3$

Peso Específico (aparente):  $\gamma_a = 1.500 \text{ Kg/m}^3$

Porcentaje de Esponjamiento:  $E = 60\%$

Ángulo de Fricción Interna:  $\phi_i = 35^\circ$

Cohesión:  $C = 35 \text{ T/m}^2$

Las rocas calizas siempre contendrán cierta cantidad de alúmina y sílice que reaccionará con parte de la cal presente. A manera de compensar el exceso de cal proveniente de la roca caliza se utilizan materiales ricos en sílice como las areniscas, esquistos y lodolitas; así como materiales ricos en alúmina como lodolitas, arcillas y

limolitas. A parte de las fuentes naturales de sílice y alúmina también se pueden emplear desechos como escorias, cenizas, lodos rojos provenientes del procesamiento de la bauxita, colas de procesos de molienda o lavado, en general puede ser usada casi cualquier fuente de sílice y alúmina proveniente de un desecho industrial siempre y cuando sea fácil de calcinar y no contenga elementos nocivos para el fraguado o la resistencia del cemento. A excepción de la manufactura del cemento blanco, es imprescindible la adición de hierro como una de las materias primas, generalmente se emplean lateritas ferruginosas aunque también se puede emplear una amplia gama de desechos ferrosos.

Puede apreciarse en la figura 3, el diagrama de flujo de la Producción de Cemento en La Planta de La Corporación de Cemento Andino.

### **3. Mecánica de Rocas**

Debido a la ejecución de obras de ingeniería en macizos rocosos, es necesario elaborar modelos geomecánicos que sirvan de base para realizar análisis de estabilidad de taludes, diseño de fundaciones o diseño del sostenimiento para excavaciones, estos materiales son sometidos a diferentes tipos de esfuerzos: compresión, tracción, corte, flexión o combinación de ellos, por lo que es necesario conocer la resistencia que ofrecen a cada uno de estos estados de sollicitación

Según De Marco (1995), los principales ensayos sugeridos para la determinación de estas características son los siguientes:

Fig. 3 Proceso de Elaboración de Cemento. Planta Corporación de Cemento Andino. (Fuente: Elaboración propia)

- Ensayo de compresión Uniaxial
  
- Ensayo de carga puntual
  
- Ensayo Esclerométrico (Martillo de Schmidt)
  
- Ensayo de tracción indirecta (Ensayo Brasilerero)
  
- Ensayo de corte directo

“El objetivo de los ensayos es tratar de reproducir sobre una muestra de roca, en el laboratorio, los posibles niveles de esfuerzos a que serán sometidos los materiales en sitio y determinar de esta forma sus características de resistencia mecánica”. (DE MARCO, 1995).

En la Figura 4, se muestran los principales ensayos de laboratorio y los diferentes esfuerzos aplicados en cada uno.

### **3.1. *Ensayo de carga puntual***

#### **Alcance**

Determinar un índice de resistencia en muestras de rocas de geometría irregular o cilíndrica (sin preparaciones especiales), las cuales son sometidas a carga entre dos piezas cónicas de punta redondeada.

Los resultados son utilizados para clasificación y caracterización geotécnica de la roca intacta. Igualmente, pueden establecerse correlaciones con la resistencia a la compresión y a la tensión uniaxial.

El ensayo mide el Índice de Resistencia a Carga Puntual,  $I_s$  (50) y el Índice de Anisotropía,  $I_a$  (50).

### **3.2. *Ensayo de resistencia a la Compresión Uniaxial***

#### **Alcance**

Determinar la resistencia a la compresión inconfiada de una muestra de roca de geometría regular, generalmente cilíndrica. Los resultados son utilizados para la clasificación y caracterización geotécnica de la roca intacta. Si se miden las deformaciones, pueden calcularse el módulo de Young y la relación de Poisson.

### **3.3. *Determinación de la deformación de materiales rocosos en Compresión Uniaxial***

#### **Alcance**

Determinar curvas de esfuerzo-deformación, Módulo de Young y relación de Poisson en Compresión Uniaxial de una muestra de roca de geometría regular.

Los resultados son utilizados para clasificación y caracterización geotécnica de la roca intacta.

### **3.4. *Ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta (Ensayo Brasileiro)***

#### **Alcance**

Determinar en forma indirecta, la resistencia a la tracción uniaxial en muestras de roca especialmente preparadas, utilizando el ensayo Brasileiro. La justificación del ensayo se basa en el hecho experimental de que la mayoría de las rocas en un campo de esfuerzos biaxial, fallan por tensión a su resistencia a la tensión uniaxial, cuando uno de los esfuerzos principales es tensional y el otro esfuerzo principal finito es compresivo con una magnitud que no excede tres veces el esfuerzo principal tensional.

Los resultados son utilizados para clasificación y caracterización geotécnica de la roca intacta.

### **3.5. *Ensayo de Corte Directo en Discontinuidades***

#### **Alcance**

Determinar la resistencia al corte pico y residual a través de discontinuidades contenidas en bloques o núcleos de roca, en función de la carga normal aplicada sobre el plano.

Los resultados se utilizan en los análisis de equilibrio límite para resolver problemas de estabilidad de taludes y estabilidad de fundaciones.

### **3.6. *Determinación de la dureza mediante el rebote de Schmidt***

#### **Alcance**

Determinar la dureza de la Roca mediante el uso del martillo de impacto Schmidt. Es un método de uso limitado sobre rocas muy suaves o muy duras.

## **4. Clasificaciones Geomecánicas**

### **4.1. *Clasificación para predecir el tipo de remoción en banqueos y excavaciones para obras viales (SALCEDO, 1988)***

Esta clasificación propuesta por Salcedo (1988), en el Boletín # 56, de la Sociedad Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones se fundamenta en la de Weaver (1975), "...introduciendo modificaciones en descripciones y valores asignados a diversos factores, ampliando conceptos e incorporando bloques diagramáticos complementarios para definir la influencia de la orientación de discontinuidades presentes en la masa rocosa...

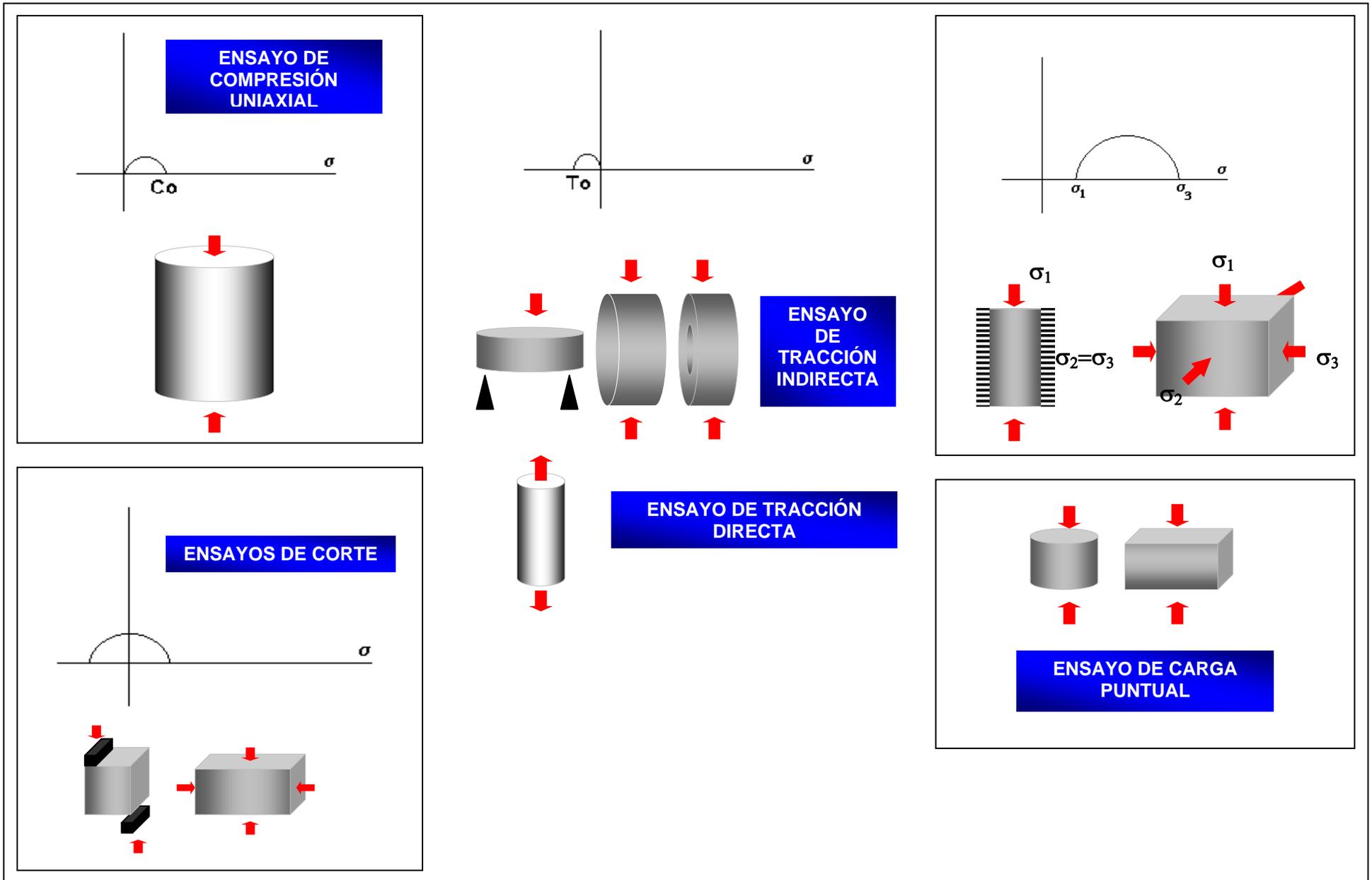
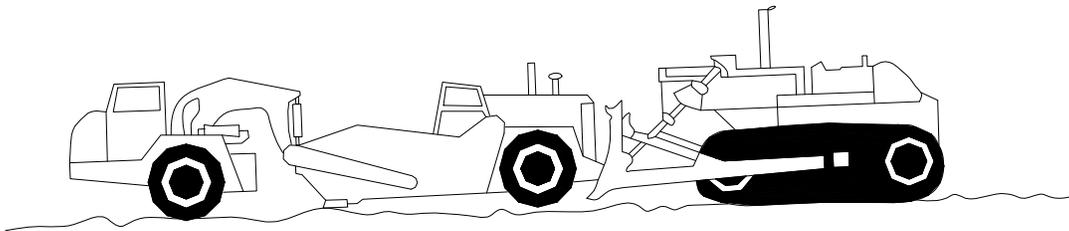


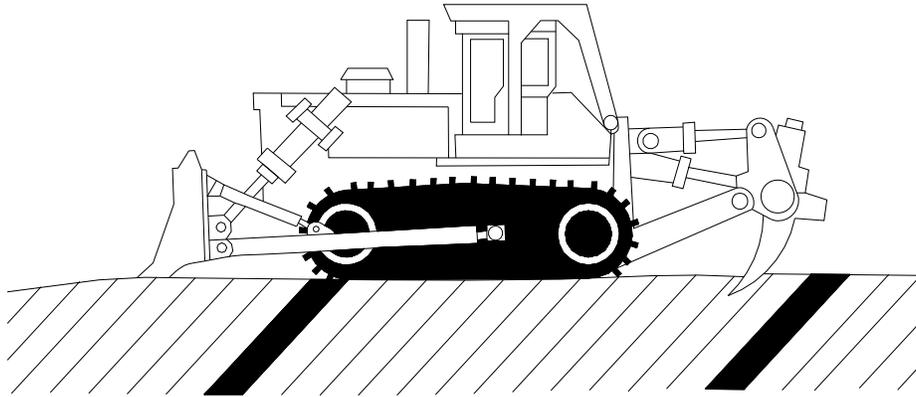
Fig. 4 Principales ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas de las rocas (DE MARCO, 1995)

En vista de que no todos los factores tienen la misma influencia en la resistencia global de la masa rocosa, es necesario asignar valores ponderados a cada uno, siendo la calidad final de la masa rocosa determinada por la sumatoria de los valores asignados individuales.

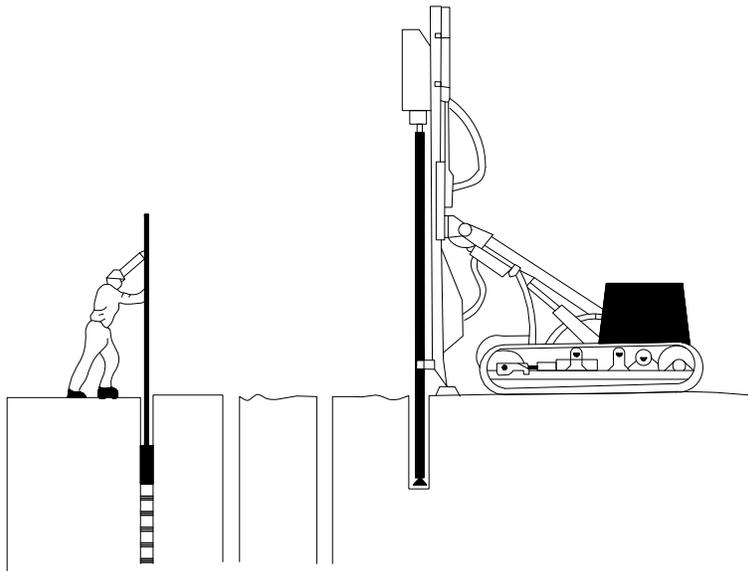
La clasificación se subdivide en cinco tipos, los cuales comprenden excavación convencional (Figura 5), dos niveles de escarificación previa según la dificultad y rendimiento (Figura 6), banqueo combinado que requiere voladura y escarificador, y remoción total mediante explosivos (Figura 7).



**Fig. 5 Excavación Convencional (Fuente: SALCEDO, 1988)**



**Fig. 6 Excavación con uso de escarificador (Fuente: SALCEDO, 1988)**



**Fig. 7 Remoción mediante explosivos (Fuente: SALCEDO, 1988)**

Los factores que se consideran de mayor importancia en esta clasificación son el espaciamiento entre diaclasas, la velocidad de propagación de onda sísmica y la

orientación de discontinuidades. Al final de la Tabla B.1: Clasificación del Tipo de Remoción (Véase [Anexo B](#)), se relaciona la sumatoria de los valores asignados con el tipo de remoción y se indica, para cada caso, el rango de caballos de fuerza (HP) de los tractores más utilizados en movimientos de tierras. En una tabla adicional se presenta la equivalencia entre los distintos tipos de tractores fabricados por cuatro de las más grandes empresas en el ramo, con sus correspondientes caballos de fuerza. (Véase Tabla B.2 [Anexo B](#): Tabla Comparativa de Tractores (Bulldozers)). La clasificación se acompaña de una serie de notas complementarias, las cuales sirven de apoyo para tomar decisiones en casos de situaciones específicas que pueden presentarse en la práctica. (Véase [Anexo B](#))

### **Velocidad de Onda Sísmica**

Este es el primer factor que considera la clasificación propuesta y ha sido correlacionado con el tipo de remoción para diferentes tipos de materiales. Caterpillar Tractor Company (1982). La velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo se relaciona en cierta forma con el tipo de suelo o roca, densidad y/o consistencia, grado de meteorización y espaciamiento de fracturas. La obtención de velocidades de onda mediante sísmica de refracción es un procedimiento poco costoso y requiere muy poco tiempo, sin embargo, su uso exclusivo para determinar el tipo de remoción puede, bajo ciertas condiciones, conducir a errores. En este sentido se prefiere tomar en cuenta, adicionalmente, otros factores de la masa rocosa que pueden ser obtenidos en afloramientos durante el estudio geológico de superficie y de la información proveniente de los núcleos obtenidos de perforaciones.

## **Dureza de la roca**

La dureza, función de la resistencia de la roca, se puede determinar clasificándola según las descripciones presentadas en la Tabla B.1 ([Anexo B](#)), de acuerdo a observaciones visuales y simples pruebas físicas de campo. A fin de que sirvan de ayuda para una clasificación más precisa, se incluyen en el recuadro correspondiente a cada valor asignado, los siguientes datos:

En el borde superior izquierdo se presentan los valores más típicos de rebote con el Martillo de Schmidt Tipo “L”.

En el borde superior derecho se indican los valores más típicos de rebote con el Martillo Tipo “N”.

En el borde inferior izquierdo se presentan los valores que se obtienen de ensayos de carga puntual “Is”, en Megapascales. (1 MPa  $\approx$  10 kg/cm<sup>2</sup>)

En el borde inferior derecho se indican los valores más típicos de resistencia a la compresión sin confinar “ $\sigma_c$ ”, en Megapascales. (1 MPa  $\approx$  10 kg/cm<sup>2</sup>)

## **Meteorización**

Este factor es de suma importancia en países tropicales y varía con la profundidad. La clasificación puede realizarse de acuerdo a las descripciones indicadas

en la Tabla B.1 ([Anexo B](#)). Si se dispone de tiempo de investigación y se quiere cuantificar la meteorización en forma más precisa, se pueden tomar muestras y determinar índices de meteorización, tales como los propuestos por Hamrol (1961), Lumb (1962), Ege (1968) y Aires (1970). De estos índices el que se considera más fácil y rápido de determinar es el de Hamrol (1961), el cual realmente es una determinación de la absorción del material en inmersión rápida de agua. Se ha encontrado que este índice tiene buenas correlaciones con otras propiedades de la masa rocosa.

### **Espaciamiento de diaclasas**

Controla el tamaño de bloques individuales de roca intacta y se mide perpendicular al plano de la diaclasa. Debido a que puede variar, se recomienda preferiblemente el uso del valor de espaciamiento modal. El espaciamiento es el inverso de la frecuencia y mientras menor es su valor, más fácil será su remoción.

### **Persistencia**

La persistencia es una medida de la extensión o el tamaño de la diaclasa. Puede ser estimada observando las longitudes de las trazas en la superficie expuesta. Mientras mayor sea la persistencia de las discontinuidades de una masa rocosa, más fácil resulta su remoción.

## **Abertura y relleno de diaclasas**

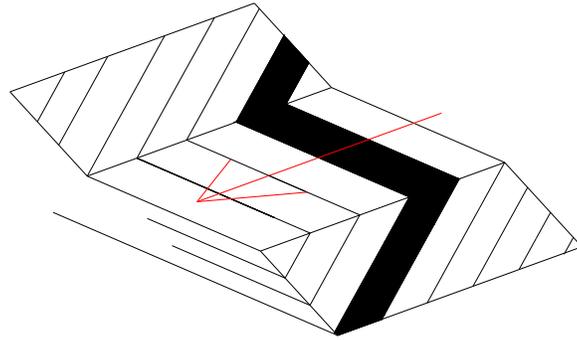
La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de una discontinuidad abierta. En caso de estar rellena por minerales duros tales como cuarzo o calcita, se recomienda aumentar el valor asignado correspondiente a la siguiente escala. Si el material de relleno es blando se considera simplemente abierta y se le asigna su valor correspondiente.

## **Rumbo y Buzamiento**

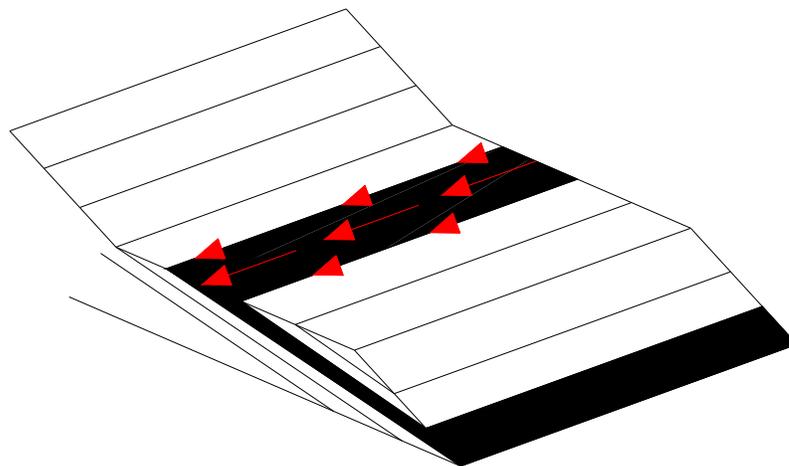
La orientación de las discontinuidades es uno de los factores más importantes que influyen en el tipo de remoción. Las clasificaciones publicadas hasta la fecha hablan de términos como “favorable” o “desfavorable”, sin especificar razones convincentes al respecto. En vista de esto, el autor (Salcedo (1988)), ha decidido incorporar a esta clasificación unos bloques diagramáticos que permitan visualizar para cada caso específico la orientación de las discontinuidades con respecto a la dirección y sentido de la excavación.” (SALCEDO,1988)

Los bloques diagramáticos incorporados a la clasificación, realizados por el Ingeniero Daniel Salcedo (1988), están basados en la experiencia acumulada en campo, además de entrevistas con ingenieros y operadores de varias empresas. En función de esto se pueden mencionar las conclusiones más importantes de las pruebas de campo:

“...La remoción del material es más fácil y efectiva cuando el avance es perpendicular al rumbo de la discontinuidad más prominente que cuando es paralelo a éste. Ver Figuras 8 y 9

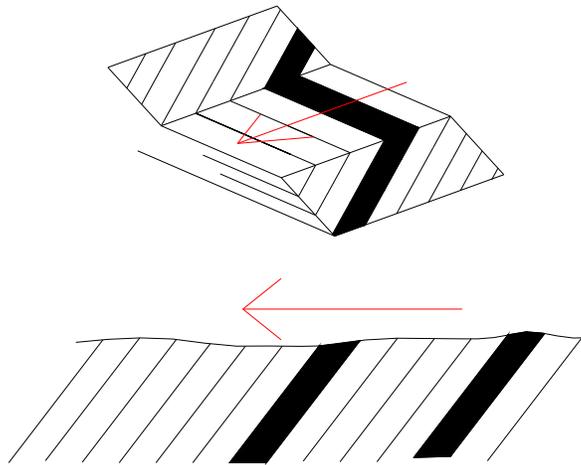


**Fig. 8 Avance de excavación perpendicular al rumbo de la discontinuidad (Fuente: SALCEDO, 1988)**

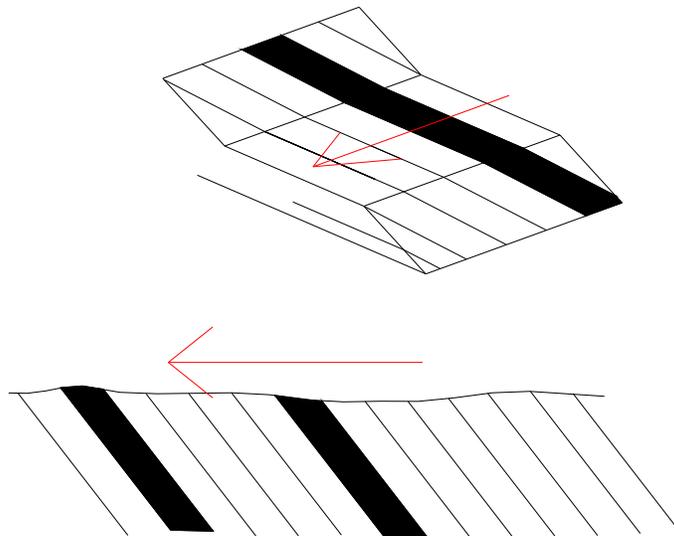


**Fig. 9 Avance de excavación paralela al rumbo de la discontinuidad (Fuente: SALCEDO, 1988)**

Para el caso específico de rumbo de avance de excavación perpendicular al rumbo de la discontinuidad más prominente, la remoción del material es más fácil y efectiva si el avance se realiza en el mismo sentido del buzamiento de dicha discontinuidad. Asimismo, la remoción se facilita para ángulos de buzamiento entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ . Ver figuras 10 y 11



**Fig. 10 Avance de excavación perpendicular al rumbo de la discontinuidad y en el mismo sentido de su Buzamiento (SALCEDO, 1988)**



**Fig. 11 Avance de excavación Perpendicular al rumbo de la discontinuidad y en sentido contrario a su buzamiento (SALCEDO, 1988)**

En el [Anexo B](#), como un complemento a la clasificación propuesta, se observan una serie de bloques diagramáticos, que apoyan al escogencia de valores en la misma. Ver (Casos de Remoción).

#### **4.2. Índice RQD (Rock Quality Designation) (HOEK, 2000)**

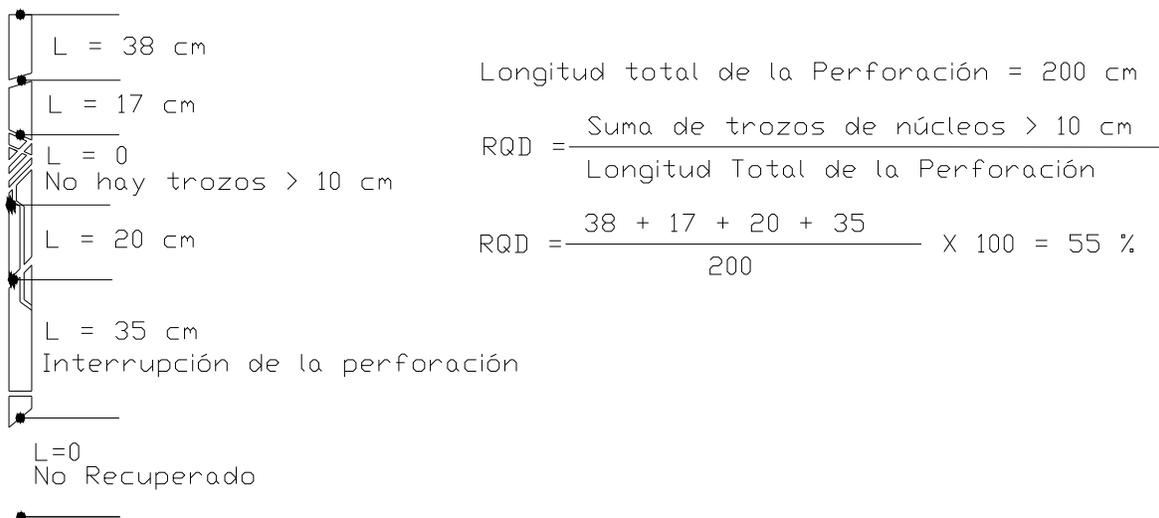
...El índice de Designación de la Calidad de la Roca (RQD, por sus siglas en Inglés), fue desarrollado por Deere (Deere et al 1967) para proporcionar una estimación cuantitativa de la calidad del macizo rocoso a partir de núcleos de perforación. El RQD es definido como el porcentaje de núcleos intactos mayores de 100 mm ( 4 pulgadas) de largo, medido en el eje central. El núcleo debe tener un diámetro mínimo NW ( 54.7 mm ó 2.15 pulgadas de diámetro) y debe ser obtenido con perforadora utilizando un muestreador o porta-testigos tipo tubo doble. En la figura 12 se resume el procedimiento correcto para medir la longitud de los núcleos y el cálculo del RQD.

Palmström (1982) sugirió que, cuando el núcleo no es disponible, pero son visibles las trazas de las discontinuidades en la superficie expuesta, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen. La relación sugerida para macizos rocosos libres de rellenos arcillosos en sus discontinuidades es:

$$\%RQD=115-(3.3*J_v) \quad [1]$$

Para  $J_v > 4.5$ ,

Para  $J_v \leq 4.5$ , RQD = 100%



**Fig. 12 Procedimiento para la medición y calculo del RQD ( Deere, 1989, en HOEK, 2000)**

donde  $J_v$  es la suma del número de diaclasas por unidad de longitud para todas las diaclasas (discontinuidades) contenidas en el conteo volumétrico de diaclasas.

El RQD es un parámetro de dependencia direccional y su magnitud puede cambiar de manera significativa, dependiendo de la orientación del pozo. El uso del conteo volumétrico de diaclasas puede ser confiable al reducir esta dependencia direccional.

El RQD está propuesto para representar la calidad de la masa rocosa in situ. Cuando se usa una perforadora con broca de diamante, debe tenerse mucho cuidado para asegurar que las fracturas, producidas por el manejo de los núcleos o el proceso de perforación, sean identificadas e ignoradas al momento de determinar el valor del RQD. Cuando se utilice la relación de Palmströms para el cálculo, las fracturas inducidas por voladuras no deben ser incluidas en la estimación del  $J_v$ .

El RQD de Deere había sido el más utilizado, sobre todo en los últimos 25 años. Cording y Deere (1972), Merrit (1972) y Deere & Deere (1988) han probado relacionar el RQD para el factor de carga de Terzaghi y los requerimientos de deslizamientos en túneles. En el contexto de esta discusión el uso mas importante del RQD es como un componente de los valores RMR (Rock Mass Rating, por sus siglas en inglés) y Q (Rock Quality Tunnel Index), que se definirán más adelante...(HOEK, 2000)

De Marco (1990), muestra, en su Trabajo, “Exploración y Caracterización de Rocas Discontinuas mediante el uso de técnicas de Perforación”, una clasificación basado en el valor RQD, clasificación que se puede apreciar en la Tabla 1.

RQD (%)	Clasificación
> 90	Muy Buena
75-90	Buena
50-75	Regular
25-50	Mala
< 25	Muy Mala

**Tabla 1. Clasificación con RQD (Fuente, DE MARCO, 1990)**

### **4.3. Bieniawski**

...Bieniawski (1976) publicó los detalles de una clasificación del macizo rocoso llamada la Clasificación Geomecánica o Sistema de Clasificación del Macizo Rocosos (RMR, por sus siglas en inglés). Al pasar los años, este sistema ha sido refinado

muchas veces y en muchos casos ha sido examinado y el lector debe tomar en cuenta que Bieniawski ha realizado cambios significativos en los valores asignados a los diferentes parámetros...(HOEK, 2000) Estos cambios se presentan en la versión de Bieniawski de 1989 y ambas, 1976 y 1989, serán utilizadas aquí para clasificar el macizo rocoso utilizando el sistema RMR. Los siguientes parámetros son usados para clasificar el macizo rocoso con el sistema RMR:

- Esfuerzo a la Compresión Uniaxial del Material Rcoso.
- Rock Quality Designation (RQD).
- Espaciamiento entre discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Condiciones de Aguas Subterráneas.
- Orientación de las Discontinuidades.

...Al aplicar este sistema de clasificación, el Macizo Rcoso es dividido en un número de regiones estructurales y cada región es clasificada de forma separada. Los límites de las regiones estructurales usualmente coinciden con un rango estructural mayor tal como una falla o un cambio en la litología. En algunos casos, los cambios importantes en el espaciamiento de las discontinuidades o sus características, en el

mismo tipo de roca, pueden necesitar que la división del Macizo Rocosos sea en regiones estructurales más pequeñas.

El sistema RMR es presentado en la tabla C.1, del [Anexo C](#) proporcionando valores para cada uno de los seis parámetros enumerados anteriormente. Estos valores son sumados y dan como resultado un valor de RMR.

Bieniawski (1989) publicó unas pautas para la selección del soporte en túneles en roca para los cuales ha sido determinado el valor del RMR. Estas pautas son reproducidas en la tabla C.2, [Anexo C](#). Nótese que estas pautas han sido publicadas para un túnel en forma de herradura con un ancho de 10 m, construido utilizando métodos de perforación y voladura, en una masa rocosa sometida a un esfuerzo vertical  $< 25$  MPa (equivalente a una profundidad por debajo de la superficie menor a 900 m)

El sistema Bieniawski Rock Mass Rating (RMR) se basó principalmente en casos relacionados con la Ingeniería Civil. En consecuencia, la industria Minera ha considerado la clasificación como algo conservadora y se han propuesto muchas modificaciones a fin de hacer la clasificación más dirigida a las aplicaciones mineras. Una gran cantidad de estas propuestas y modificaciones, fueron recogidas por Bieniawski (1989)...(HOEK, 2000)

#### 4.4. Índice de resistencia Geológico (GSI)

La resistencia de una masa rocosa diaclasada depende de las propiedades de las piezas de roca intacta y también de la libertad que tengan esas piezas de deslizarse y rotar bajo diferentes condiciones de esfuerzo. Esta libertad es controlada por la forma geométrica de los trozos de roca intacta y también por la condición de las superficies que las separan. Trozos angulares de rocas con discontinuidades limpias y rugosas resultarán más fuertes, que una que contenga partículas esféricas a su alrededor compuestas por un material alterado y desgastado.

El Índice de resistencia Geológico (Geological Strength Index o GSI, por sus siglas en inglés), introducido por Hoek (1995) y Hoek, Kaiser y Bawden (1995), proporciona un sistema para estimar la reducción de la resistencia en la masa rocosa para diferentes condiciones geológicas. Este sistema es presentado en la tabla C.3 del [Anexo C](#). La observación directa en campo, es suficiente, para clasificar cada macizo rocoso y estimar el valor GSI correspondiente.

Una vez, que se ha estimado el GSI, pueden calcularse los parámetros que describen las características de resistencia de la masa rocosa, que se utilizan en el criterio de Hoek-BROWN (ver [Anexo C](#)) Para esto, se debe utilizar la siguiente expresión:

$$m_b = m_i * e^{\left(\frac{GSI-100}{28}\right)} \quad [2]$$

Para  $GSI > 25$ , por ejemplo, una masa rocosa con una calidad de buena a razonable, el criterio original de Hoek-Brown es aplicable con:

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9}\right)} \quad [3]$$

y

$$a = 0.5 \quad [4]$$

Para  $GSI < 25$ , por ejemplo una masa rocosa de una calidad muy baja, el criterio modificado de Hoek-Brown se aplica con:

$$s = 0 \quad [5]$$

y

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad [6]$$

La escogencia de un  $GSI = 25$  para la unión entre los sistemas original y modificado es arbitrario. Esto podría ser demostrado ya que un valor de  $GSI = 30$  podría no introducir una diferencia en el valor de  $a$ , pero muchas pruebas han demostrado que la localización exacta de esta unión es, en la práctica, insignificante.

Para macizos rocosos de mejor calidad ( $GSI > 25$ ), el valor de  $GSI$  puede ser estimado directamente de la versión del año 1976 de la Clasificación RMR de Bieniawski, con un valor de Agua Subterránea de 10 (seco) y el Ajuste de la Orientación de las Diaclasas de 0 (muy favorable). Para macizos rocosos de baja calidad es muy difícil estimar el valor del RMR y el balance entre los valores no es mas que una base segura para estimar la resistencia del macizo. En conclusión, la

Clasificación RMR de Bieniawski no debe ser utilizada para estimar el GSI para macizos rocosos de baja calidad.

Si se utiliza la versión de Bieniawski de 1989, se tiene que

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \quad [7]$$

donde  $RMR'_{89}$  tiene un valor de Agua Subterránea de 15 y el Ajuste de la Orientación de las Diaclasas de 0.

Uno de los problemas prácticos que eleva el valor de GSI en campo es el relacionado con el daño por voladura. Existe una diferencia considerable en la apariencia de un frente de roca el cual ha sido excavado por voladura controlada y un frente que ha sido dañado por una voladura de gran magnitud. Donde sea posible, el frente no dañado debe utilizarse para estimar el valor del GSI ya que este determina las propiedades del macizo rocoso no perturbado.

Donde hayan sido dañadas todas los frentes visibles del macizo por voladura, debe intentarse algo para compensar el bajo valor de GSI obtenido para dichas superficies. En frentes volados recientemente, se crearán nuevas superficies de discontinuidad por la voladura y estas darán un GSI que puede estar cuando mucho 10 puntos debajo del que daría la masa rocosa no perturbada. En otras palabras, los daños severos de la voladura pueden ser ubicados en la penúltima columna de la tabla C.3 [Anexo C](#).

Cuando los frentes dañados por voladura han sido expuestos por un número de años, puede ser necesario desplazarse una columna a la izquierda a fin de permitir una superficie resistente, la cual a ocurrido durante esta exposición. De esto sale, por ejemplo, una mala voladura que haya dañado el frente rocoso que tiene la apariencia de una masa rocosa, según la tabla C.3 FRACTURADA / PERTURBADA Y MEDIA (FP/M) puede ser en la actualidad MUY FRACTURADA Y BUENA (MF/B) en su estado in situ resistente y no perturbado.

Para una calidad de roca razonable (  $GSI > 25$ ) la mejor aproximación para estimar el valor de GSI en núcleos de roca, es evaluarlos en términos de la clasificación RMR de Bieniawski y luego, como se describió antes determinar el GSI a partir del RMR. Para macizos rocosos de mala calidad (  $GSI < 25$ ), con recuperaciones de núcleos generalmente menores a 10 cm difícil determinar un valor de RMR. En estas circunstancias, debe utilizarse como base para la determinación del GSI, la apariencia física del material en el núcleo de roca.

## CAPÍTULO V

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 1. Muestreo

Se realizó la toma de muestras a partir de perforación con Taladro LONGYEAR 44 con wireline. Este equipo funciona bajo un sistema rotatorio con agua y broca de diamante. Las brocas utilizadas son de 3 ½ “, permitiendo obtener núcleos de roca de diámetro N.Q. (aproximadamente 63 mm de diámetro). Los pozos se realizaron con una inclinación de 90° y se distribuyeron como se muestra en la tabla # 1:

POZO	UNIDAD	PROFUNDIDAD PERFORADA (m)	UBICACIÓN	
			NORTE	ESTE
50	4	92.11	1063550.00	346529.00
51	4	108.51	1063551.61	346513.05
48	9	36.51	1064462.83	346530.56

**Tabla 2. Descripción y Ubicación de Perforaciones realizadas**

Es importante aclarar que el número de perforaciones realizadas dependió básicamente de la disponibilidad de los equipos de perforación pertenecientes a la empresa. En este sentido se aprovecharon las perforaciones que se estaban realizando para la fecha (Unidad 4), y se seleccionó una nueva perforación ( Maraca N° 48) para ser utilizada en el muestreo de la Unidad 9.

Debido al limitado número de perforaciones, se decidió complementar el muestreo con toma de monolitos cúbicos directamente en los frentes de arranque. Para esto, se procedió a escoger muestras de superficie en las unidades de interés, espaciadas una distancia aproximada de 25 m. Cada una de estas muestras, al igual que las perforaciones, fueron ubicadas topográficamente mediante el uso de un Teodolito y se procedió a medir en varios puntos, también ubicados, las características de las diferentes discontinuidades existentes.

Cada muestra fue guardada en bolsas plásticas e identificada con una nomenclatura, que permitiera ubicarla rápidamente, en planos y columnas, y que además permitiera conocer al momento del ensayo, la procedencia de la misma, este identificador se especifica a continuación, según la procedencia de cada muestra.

- M7U4: Muestra # 7, perteneciente a la Unidad 4 (Muestra de mano, procedente de los frentes de excavación)

- M7U4P51: Muestra # 7, perteneciente a la Unidad 4, tomada del Pozo # 51 (Núcleo de Roca, procedente de una perforación)

También en la toma de muestras, se incluyeron los estériles presentes en el Yacimiento, con el interés de definir solamente la densidad de la roca. A diferencia del caso anterior, algunas estas muestras fueron definidas con una letra E (Estéril) en vez de U, ya que las que fueron provenientes de las perforaciones, conservaron su misma nomenclatura. En el ejemplo siguiente se explica mejor la diferencia:

- M7EU8: Muestra # 7, perteneciente a la Unidad 8 (Muestra de mano estéril procedente de afloramiento)

- M7U8P48: Muestra # 7, perteneciente a la Unidad 8, tomada del Pozo # 48 (Núcleo de Roca procedente de perforación).

- M7EB: Muestra # 7, perteneciente a la capa de estéril B. (Muestra de mano estéril)

De cada perforación obtenida, se realizaron las columnas estratigráficas correspondientes, en donde se muestra una breve descripción Litológica de cada estrato, así como también la profundidad, de cada muestra tomada. Estas columnas, pueden apreciarse en el [Anexo F](#). Resultados. Columnas Estratigráficas y RQD

El número de muestras a tomar, por litología, dependió del requerimiento máximo de muestras especificados en las normas correspondientes a cada ensayo, que se reproducen, en el Capítulo IV. Antes de la preparación de las muestras, se realizó una preclasificación de las mismas según cada ensayo, como se puede observar en el [Anexo D](#),(Tablas D.1, D.2, D.3) esto permitió tener una idea previa de las dimensiones y formas con las que se iba tallar cada muestra.

## **2. Preparación de las muestras**

Luego de la identificación, y descripción litológica de cada uno de los especímenes de ensayo, se procedió a la preparación de estas según el tipo de ensayo a realizar. Para esto fue necesario el uso de un Vernier, para medir las diferentes dimensiones de la muestra, y de Sierras de Diamante para cortar las muestras en las dimensiones adecuadas, además de un esmeril con el que se logró un paralelismo aproximado entre los lados de las muestras que así lo requirieran, apoyándose esto con el uso de Carburo de Silicio a fin de producir el desgaste en la zona de contacto. Debido a que este paralelismo no fue exacto en las muestras cúbicas, y el ensayo de Compresión requiere de esta condición, se tuvo que proceder a colocar capping en la muestra, utilizando Yeso Dental. Este elemento, permite la aplicación uniforme de la carga por toda la superficie correspondiente. Por lo cual deben quedar lo más paralelo posible a la placa de carga. Este paralelismo se garantiza mediante el uso de un Nivel.

Según la Norma, no debe utilizarse capping, cuando este se fracture primero que la muestra, pero por pruebas de laboratorio, puede verificarse que el Yeso Dental, tiene la resistencia suficiente para soportar las presiones aplicadas por la prensa de carga.

## **3. Ensayos de Laboratorio**

A continuación se presentan las características de cada ensayo de mecánica de rocas a saber, de Carga Puntual, Compresión Uniaxial, Tracción Indirecta y Corte Directo en Roca. Estos procedimientos están normalizados por la I.S.R.M.

(INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, por sus siglas en Inglés), y fueron adaptados en el año de 1995 por el Ing. Pietro De Marco, según los equipos pertenecientes al Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Universidad Central de Venezuela.

### **3.1. *Ensayo de Carga Puntual***

#### **Selección de las muestras**

1. Las muestras de roca a ser ensayadas pueden tener forma cilíndrica (núcleos), bloques regulares o muestras de mano irregulares, sin necesidad de someterlas a preparaciones especiales. Las dimensiones mínimas para cada caso se indican en el ítem de procedimientos de ensayos (III).
2. Debe obtenerse un número suficiente de muestras (10 a 20) de la misma litología, que cumplan con los requisitos de tamaño y forma para los diferentes tipos de ensayos, tal como se indica en las figuras 13 y 14.

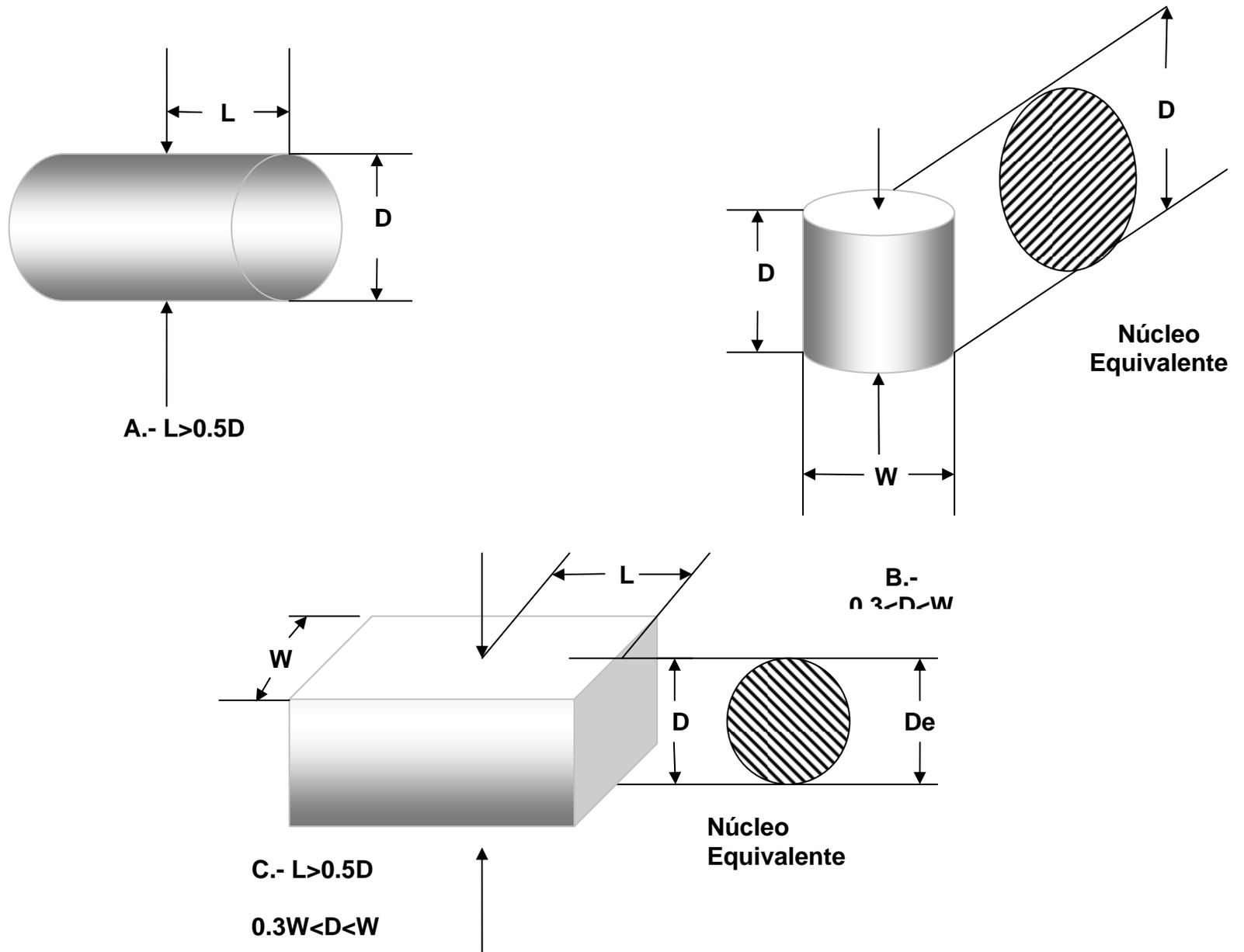
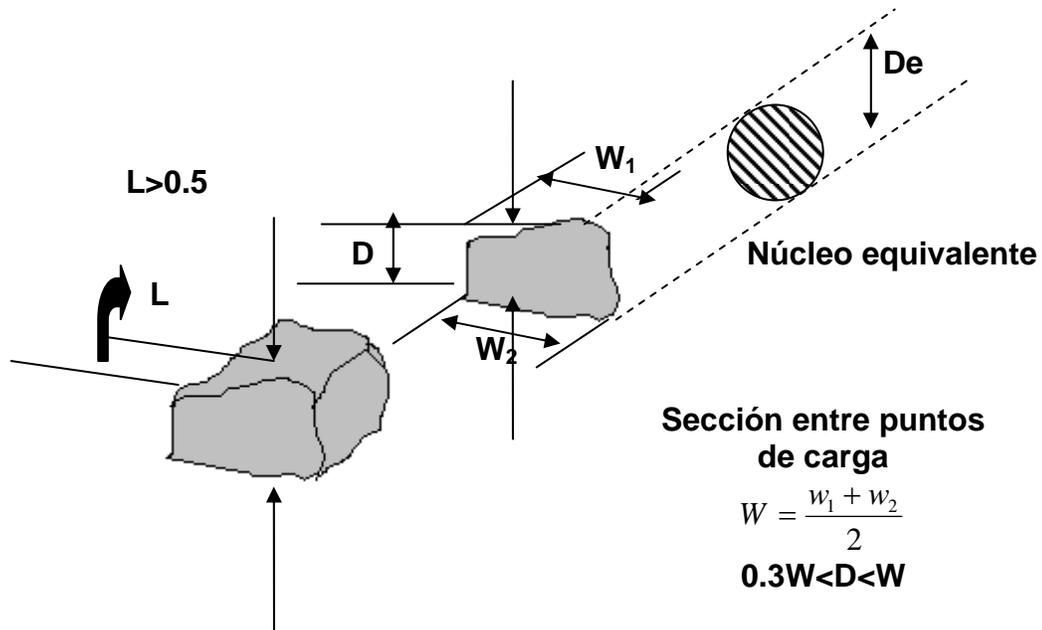


Fig. 13 Requerimientos geométricos para el ensayo de Carga Puntual: A.-Diametral, B.- Axial, C.- Bloque (Fuente: DE MARCO, 1995)



**Fig. 14 Requerimientos geométricos para el ensayo de Carga Puntual: Bloque Irregular (Fuente: DE MARCO, 1995)**

### **Aparatos y equipos necesario**

1. La máquina del ensayo (Figura 15 y 16), consiste en un sistema de carga (placas de carga cónicas, bomba y gatos hidráulicos), un sistema para medir la carga (P) necesaria para romper la muestra y un sistema para medir la distancia (D) entre las puntas de carga, con las siguientes especificaciones:
  - a. El sistema de carga debe poder ajustarse para ensayar muestras de roca con un tamaño entre 25 y 100 mm preferiblemente.

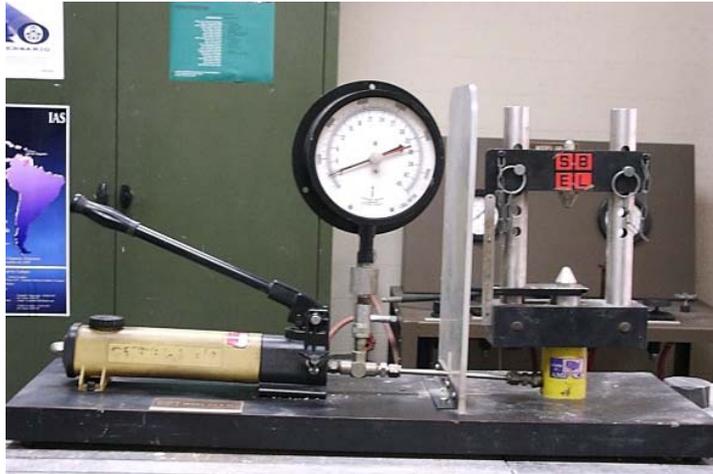


Fig. 15 Equipo para la realización del ensayo de Carga Puntual.

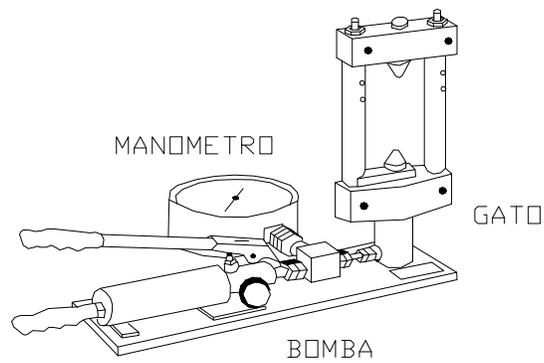
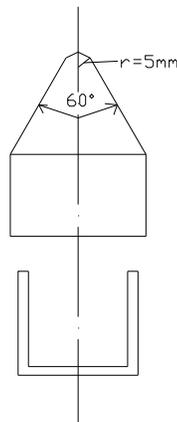


Fig. 16 Esquema del equipo de Carga Puntual. (Fuente: DE MARCO, 1995)

b La capacidad de carga debe ser suficiente para romper las muestras mas grandes y resistente. Una capacidad de 5000 kg es suficiente para las dimensiones indicadas anteriormente.

c La máquina debe ser diseñada y construida de manera que no permita distorsiones durante la aplicación de cargas de fallas sucesivas y que las puntas cónicas se mantengan coaxiales en un rango de  $\pm 0.2$  mm durante el ensayo.

d Las placas de carga deben tener forma cónica ( $60^\circ$ ), truncada esféricamente ( $r=5\text{mm}$ ) según se ilustra en la figura 17. Deben estar construidas de material suficientemente duro (tungsteno o acero), que no se dañe durante el ensayo.



**Fig. 17 Equipo de Carga Puntual, Detalle de las placas de carga cónicas.(Fuente: DE MARCO, 1995)**

e El sistema de medida de carga (manómetro, celda de carga o transductor), debe permitir la determinación de la carga (P) requerida para la rotura de la muestra con una precisión de  $\pm 2 \% P$ . Es esencial que posea un indicador de carga máxima, de manera que la carga de rotura quede registrada y pueda ser leída después de la falla.

f El sistema de medida debe resistir el ariete hidráulico y a las vibraciones, de forma que conserve la precisión de las lecturas durante ensayos sucesivos.

g La distancia (D) entre los puntos de contacto roca-cono se medirá con una precisión de  $\pm 2 \% D$ . El sistema debe permitir verificar el “desplazamiento nulo” cuando las puntas están en contacto y preferiblemente incluir el ajuste a cero.

2. Un vernier o regla metálica, un transportador.

## **Procedimiento**

### ***Ensayo Diametral***

1. Se realiza en núcleos de roca cuya relación longitud / diámetro sea mayor que 1.0. Preparar por lo menos 10 muestras.

2. Insertar el espécimen en la máquina de carga (Fig. 18) y aproximar las puntas cónicas hasta hacer contacto en una línea diametral del núcleo de roca, asegurándose que la distancia (L) entre el punto de contacto y el extremo libre de la muestra, sea por lo menos 0.5 veces el diámetro (D) del núcleo (Figura 13 A, Pág. 69)



**Fig. 18 Ubicación de la muestra en equipo para ensayo de Carga Puntual Diametral**

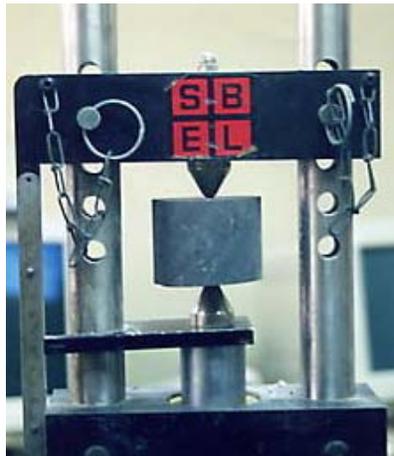
3. Registrar la distancia  $D \pm 2 \%$ , en mm.
4. Aplicar la carga en forma progresiva hasta que ocurra la falla (10 a 60 seg) y registrar la carga (P), en KN.
5. El ensayo debe ser rechazado o invalidado si la fractura no se asemeja a los modelos de la figura 20.

NOTA: En rocas duras el registro de la distancia (D) será suficiente para el cálculo de  $I_s$ . Sin embargo, en muestras débiles, las puntas de carga pueden penetrar

o marcar el espécimen, por lo que deberá registrarse la distancia ( $D'$ ) en el momento de la falla. Esta puede medirse, eventualmente, en las marcas dejadas en la muestra.

### ***Ensayo Axial***

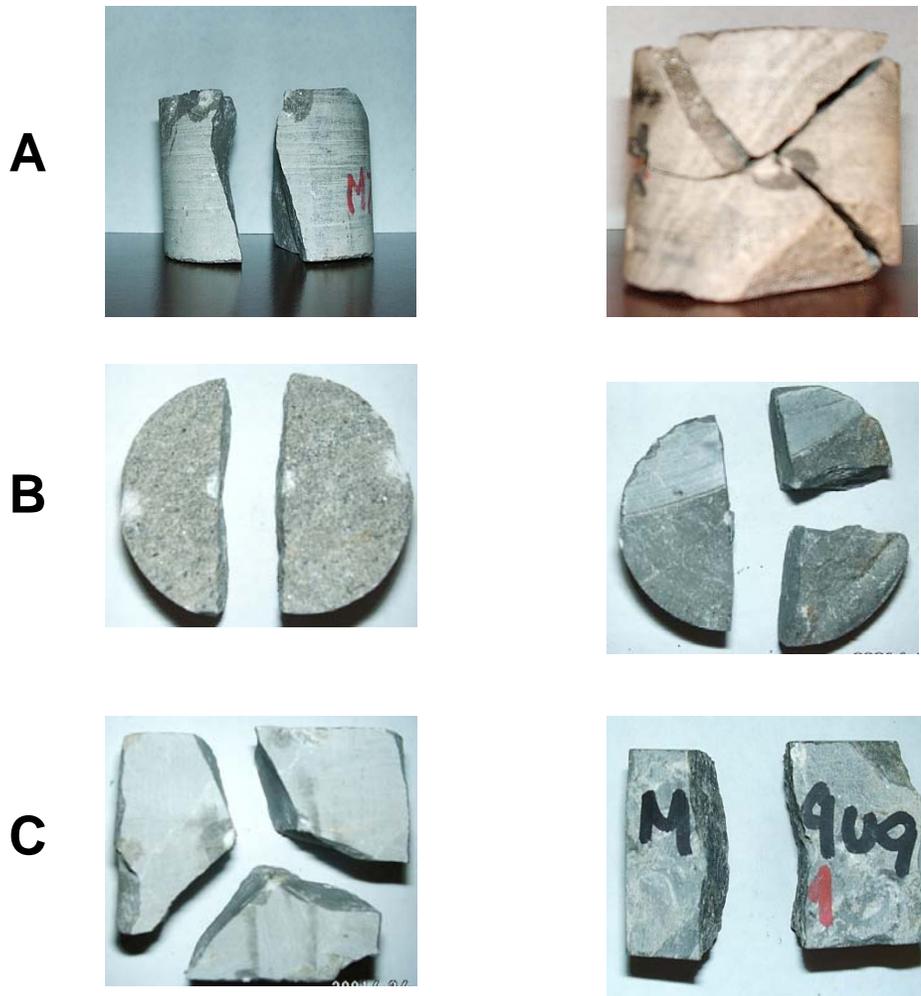
1. Se realiza en núcleos de roca cuya relación longitud / diámetro varíe entre 0.3 y 1.0 (Figura 13B, Pág. 69). Núcleos largos pueden ser ensayados previamente en forma diametral, para obtener las longitudes requeridas para el ensayo axial.
2. Insertar la muestra en la máquina de carga (Fig. 19) y aproximar las puntas cónicas hasta hacer contacto en una línea perpendicular a los extremos de la muestra (puede coincidir con el eje o el plano axial del núcleo (Figuras 13B, Pág. 69, Fig. 21 Pág. 79 y el aparte Rocas Anisotrópicas)



**Fig. 19 Ubicación de la muestra en equipo para ensayo de Carga Puntual Axial**

3. Registrar la distancia ( $D \pm 2\%$ ) y el ancho ( $W \pm 5\%$ ) perpendicular a la dirección de carga, en mm.

4. Aplicar la carga en forma progresiva hasta que ocurra la falla (entre 10 y 60 seg) y registrar la carga (P) en KN.
5. El ensayo debe ser rechazado o invalidado si la fractura no se asemeja a los modelos de la figura 20.



**Fig. 20 Modos de falla típicos: A.- Ensayos diametrales, B.- Ensayos Axiales, C Ensayos en bloques**

NOTA: En rocas duras el registro de la distancia (D) será suficiente para el cálculo de  $I_s$ . Sin embargo, en muestras débiles, las puntas de carga pueden penetrar

o marcar el espécimen, por lo que deberá registrarse la distancia ( $D'$ ) en el momento de la falla. Algunos investigadores recomiendan tomar la medida ( $W$ ) como la mínima dimensión de la superficie de rotura después del ensayo o la falla.

### ***Ensayo de bloques y muestras irregulares.***

1. Se realiza en bloques o trozos de roca de  $50 \pm 35$  mm de tamaño y con la forma ilustrada en las figuras 16C y 17 Págs. 71 y 72, respectivamente. La relación  $W/D$  debe estar ente 0.3 y 1.0; preferiblemente cerca de 1.0. La distancia ( $L$ ) debe ser por lo menos  $0.5 W$ .
2. Insertar el espécimen en la máquina de carga y aproximar las puntas cónicas hasta hacer contacto en una línea que coincida con el eje menor de la muestra, lejos de sus extremos y esquinas (Figuras 16 C y 17 Págs. 71 y 72, respectivamente)
3. Registrar la distancia ( $D \pm 2 \%$ ) y el ancho menor de muestra ( $W \pm 5 \%$ ) perpendicular a la dirección de carga. Si el ancho no es uniforme, se promediará el valor de la distancia ( $W$ ), como se indica en la figura 17, Pág. 72.
4. Aplicar la carga en forma progresiva hasta que ocurra la falla (entre 10 y 60 seg) y registrar la carga ( $P$ ), en KN.

5. El ensayo debe ser rechazado o invalidado si la fractura no se asemeja a los modelos de la figura 20 Pág. 76.

NOTA: En rocas duras el registro de la distancia (D) será suficiente para el cálculo del  $I_s$ . Sin embargo, en muestras débiles, las puntas de carga pueden penetrar o marcar el espécimen, por lo que deberá registrarse la distancia (D') en el momento de la falla. Algunos investigadores recomiendan tomar la medida (W) como la mínima dimensión de la superficie de rotura después del ensayo o la falla.

### ***Rocas anisotrópicas***

1. Las rocas estratificadas, foliadas o que presenten otras formas observables de anisotropía, deben ser ensayadas en las direcciones que presenten la mínima y la máxima resistencia, que generalmente son paralela y perpendicular a los planos de discontinuidad.
2. Los mejores resultados se obtienen en núcleos de roca cuyos ejes sean perpendiculares a los planos de discontinuidad. En todo caso, deberán preferirse aquellos en los cuales el ángulo entre su eje y la normal a los planos de debilidad no exceda los  $30^\circ$ . Así mismo, se recomienda realizar primero una serie de ensayos diametrales, de manera tal que los trozos restantes tengan las dimensiones requeridas para realizar los ensayos axiales.
3. Para la realización del ensayo en la dirección de menor resistencia, debe asegurarse que la carga se aplique a lo largo de un mismo plano de debilidad.

Igualmente, cuando se ensaye en la dirección de mayor resistencia, debe asegurarse que la aplicación de la carga se realiza perpendicular a los planos discontinuidad (Figura 21).

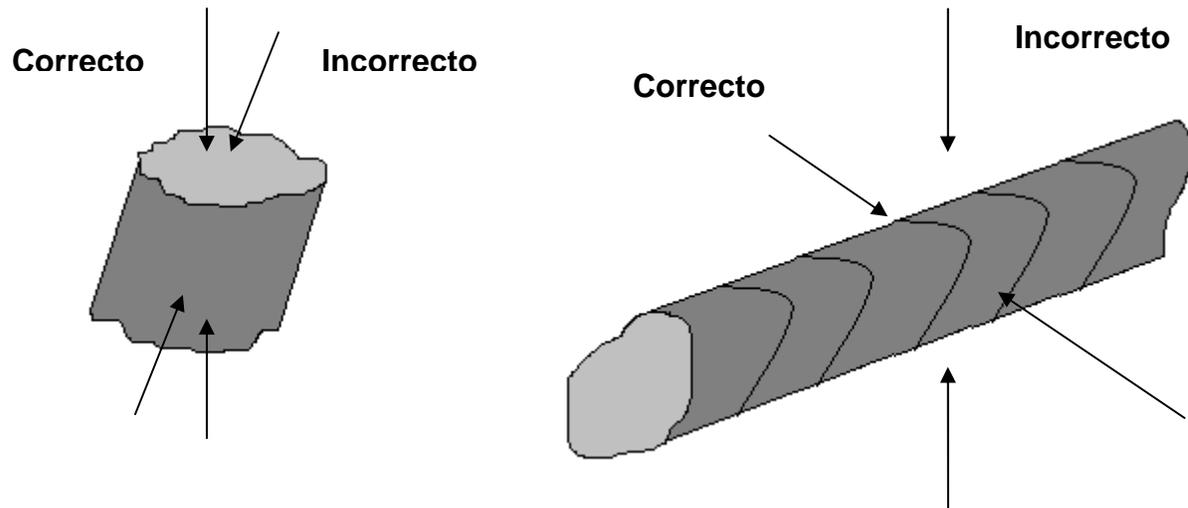


Fig. 21 Direcciones de carga para ensayos en muestras de rocas anisótropas

## Cálculos

1. Calcular el Índice de Carga Puntual mediante la expresión:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \text{ (N/mm}^2\text{= MPa)} \quad [8]$$

donde (De) es el “diámetro del núcleo equivalente” dado por:

$$De^2 = D^2, \text{ para el ensayo diametral} \quad [9]$$

$$De^2 = \frac{4 * A}{\pi} \text{ para el ensayo axial, bloque o irregular.} \quad [10]$$

$$\text{Siendo } A = W * D \quad [11]$$

(área mínima de la sección transversal del plano de rotura (mm<sup>2</sup>))

- Determinar el Índice de Carga Puntual corregido  $Is(50)$ , definido como el valor de  $Is$  que se hubiera medido en un ensayo diametral en un núcleo de 50 mm de diámetro, mediante la expresión:

$$Is(50) = F * Is \quad [12]$$

donde (F) es el “Factor de Corrección por Tamaño” obtenido por la expresión:

$$F = \left( \frac{De}{50} \right)^{0.45} \quad [13]$$

para (De) en mm.

- Calcular el valor promedio de  $Is(50)$  para cada serie o conjunto de ensayos, descartando los dos valores mas altos y los dos más bajos, cuando se cuente con diez ó más resultados válidos. Si el número de muestras es significativamente bajo, descartar únicamente el valor superior y el inferior.

3. Determine el Índice de Anisotropía ( $I_a$ ), definido como la relación entre el promedio de los valores de  $I_s$  (50) obtenido de los ensayos perpendiculares y paralelos a los planos de debilidad.

$$I_a = \frac{I_s(50) \perp}{I_s(50) //} \quad [14]$$

la tendrá valores próximos a 1.0 para rocas isotrópicas y valores mayores para las anisotrópicas.

### **Reporte de resultados**

Los resultados de cada tipo de ensayo (diametral, axial, bloque irregular, paralelos y perpendiculares a los planos de debilidad), deben ser tabulados separadamente en un reporte que debe incluir la siguiente información para cada muestra ensayada:

1. Número de la muestra, proveniencia, tipo de roca, grado de meteorización, tipo y orientación de los planos de anisotropía o de debilidad.
2. Listado de valores obtenidos para  $P$ ,  $D$ ,  $I_s$  e  $I_s(50)$ , y de  $W$ ,  $De$ ,  $De^2$  y  $F$  de ser necesario.

3. Dirección de la carga: Paralela ( $//$ ) o perpendicular ( $\perp$ ) a los planos de anisotropía.
4. Valores promedio de  $I_s(50)$ . Para rocas anisotrópicas indicar por separado los valores obtenidos para cada una de las condiciones del ensayo ( $//$ ,  $\perp$ ) y el correspondiente índice de anisotropía ( $I_a$ ).
5. Los resultados pueden ser utilizados para estimar la resistencia a la compresión uniaxial para la mayoría de los tipos de roca, mediante la siguiente relación aproximada:

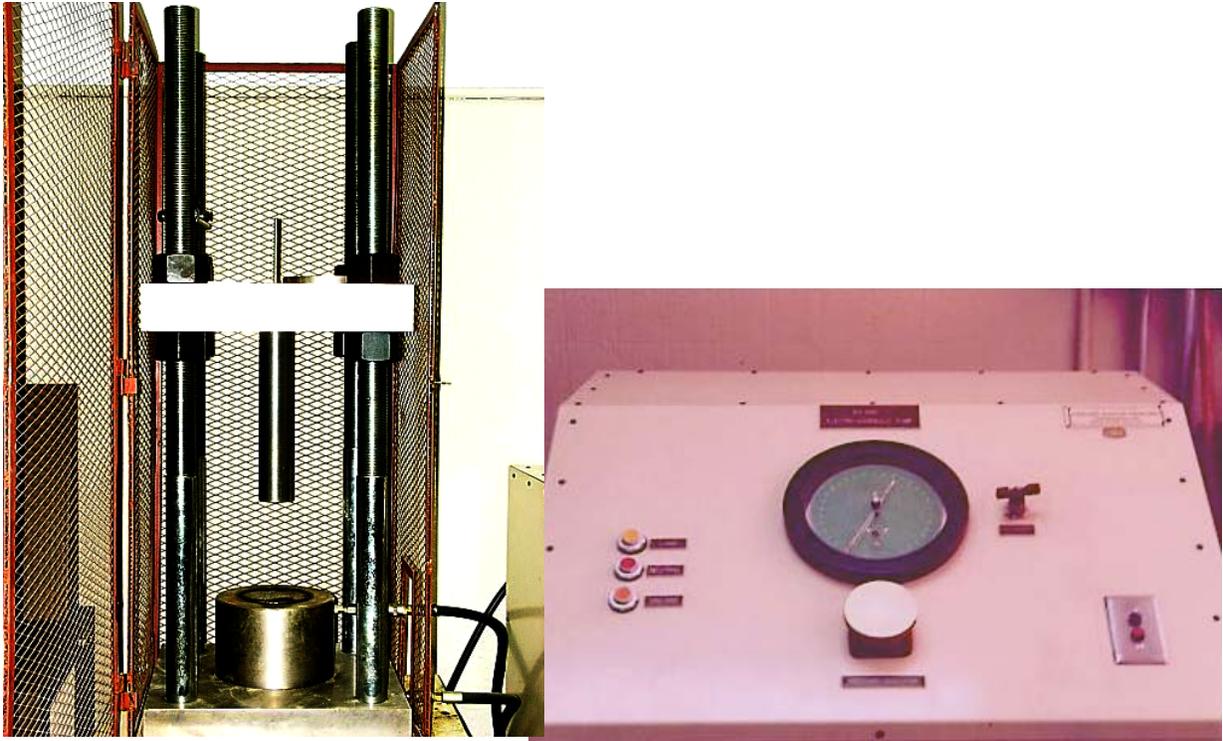
$$C_o = 20 \text{ a } 25 I_s(50) \text{ (MPa)} \quad [15]$$

Sin embargo, se han obtenido relaciones que varían entre 15 y 50 especialmente en rocas anisotrópicas, por lo que la tendencia es a utilizar directamente el valor de  $I_s(50)$  para la clasificación geomecánica.

### **3.2. *Ensayo de Resistencia a la Compresión Uniaxial***

#### **Aparatos y equipos necesarios**

1. Prensa para la aplicación y medida de la carga axial sobre la probeta, a una velocidad controlada (figuras 22a, 22b y 23).

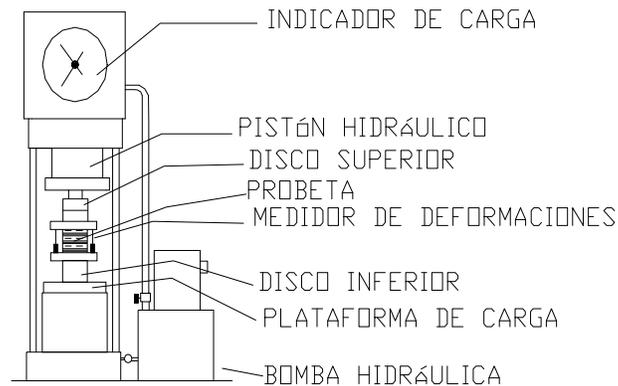


22a Prensa de carga y bomba electro-hidráulica, marca Structural Behavior Laboratories (SBEL), modelo EH-1000, con capacidad de 120000 Kg. Propiedad del Laboratorio de Mecánica de Rocas, del Departamento de Ingeniería de Minas U.C.V.



22b Prensa de carga y bomba Electro-hidráulica, marca Baldwin, con capacidad máxima de 100000 Kg. Propiedad del Instituto De Materiales y Modelos Estructurales (IMME), de la Universidad Central de Venezuela

**Fig. 22 Prensas para ensayo de Compresión Uniaxial**



**Fig. 23 Disposición de la muestra en el ensayo de compresión uniaxial**

2. Discos de acero para la transmisión de la carga, de diámetro igual o ligeramente superior al de la muestra ( $\approx + 2$  mm), de 15 mm de espesor mínimo y de superficie completamente plana (tolerancia 0.005 mm)
3. Asiento esférico (ligeramente lubricado) para colocar en el extremo del disco superior.
4. Vernier, cronómetro, transportador

### **Preparación de las muestras**

1. La probeta de roca debe ser completamente cilíndrica, con una altura de 2.5 a 3.0 veces su diámetro, el cuál no debe ser inferior a 54 mm. Generalmente se

usan núcleos provenientes de perforaciones, de diámetro NX o superior. El diámetro de la muestra debe ser por lo menos 10 veces del mayor grano que constituye la roca. El Comité Conjunto del Concreto Armado (CCCA) (1976), en su norma Ag 25: "Método de Ensayo para determinar la Resistencia a la Compresión de Piedra Natural Para La Construcción", establece que: "...Las probetas de ensayo podrán ser cubos, prismas rectos o cilindros...", "...la dimensión lateral (distancia entre caras verticales opuestas), no deberá ser menor de 5 cm (NOTA 1) y la relación entre la altura (NOTA 2), y la dimensión lateral, no deberá ser menor de 1:1..."

2. Los extremos del núcleo deben ser planos, lisos y perpendiculares a su eje, permitiéndose las siguientes tolerancias: cara/eje =  $0.06^\circ$  y cara/cara =  $0.25^\circ$
3. Los lados de la muestra deben ser lisos y libres de irregularidades o desviaciones sobre 0.3 mm
4. El tratamiento de los extremos de la probeta debe hacerse por medios mecánicos; no se permite el uso de "capping".

### **Procedimiento**

1. Determinar el diámetro o dimensión lateral de la muestra con una aproximación de 0.1 mm, promediando dos medidas paralelas entre sí, que se realizarán en la parte superior, media e inferior del espécimen. El área de la sección transversal

(A<sub>o</sub>) se calculará con el promedio de estos resultados. Determinar la altura del núcleo con una aproximación de 1.0 mm.

2. Coloque la muestra centrada en los discos de carga, colocar el asiento esférico en la parte superior y alinear con el eje de carga de la prensa figura 23, Pág. 84.
3. Aplicar carga vertical en forma continua, con un incremento de esfuerzos constantes entre 5.0 y 10.0 kg/cm<sup>2</sup>/s, hasta producir la falla, lo cual debe ocurrir entre los 5 y 10 minutos de haber comenzado el ensayo.
4. Registrar la máxima carga (P máx) con error no superior al 1 %.
5. Se recomienda realizar por lo menos 5 ensayos por litología. En el caso de Muestras cúbicas, que pueden ser tomadas del elemento de estudio, en caso de que no se disponga de perforaciones, "...Se deberán preparar por lo menos 3 probetas iguales para cada condición de ensayo; o sea, cuando se desee obtener la resistencia a la compresión para la probeta en condición húmeda y en condición seca pero solamente en una dirección, tal como la dirección perpendicular a la estratificación, se necesitaran 6 probetas. Para los ensayos de resistencia en condición húmeda y en condición seca, tanto perpendiculares como paralelos a la estratificación, se necesitarán 12 probetas (NOTA 3). Deberán prepararse las caras que van a soportar la carga, esmerilándolas para lograr planos paralelos (NOTA 4) hasta donde sea posible...." (CCCA, 1976)

## Cálculos

1. Calcular la resistencia a la compresión Uniaxial de la muestra de roca, dividiendo la máxima carga soportada por la probeta entre el área de su sección transversal inicial.

$$C_0 = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_0} \text{ [Kg/cm}^2 \text{ o N/mm}^2 \text{ = MPa]} \quad [16]$$

2. En el caso de muestras cúbicas, se recomienda multiplicar el valor obtenido en la ecuación 16 por 0.8, para hacer equivalente la compresión en muestra cúbica con la obtenida en muestras cilíndricas.
3. Según el CCCA (1976), cuando la relación entre la altura y el diámetro (o dimensión lateral) difiera de la unidad en 25 % o más, se deberá calcular la resistencia del cubo equivalente, como sigue:

$$4. \quad \sigma_c = \frac{\sigma}{0.778 + 0.222\left(\frac{b}{h}\right)} \quad [17]$$

donde:

$\sigma_c$  = Resistencia a la compresión de una probeta cúbica equivalente, en kg/cm<sup>2</sup>.

$\sigma$  = Resistencia a la compresión de la probeta de altura mayor que el diámetro o dimensión lateral, en kg/cm<sup>2</sup>.

b = Diámetro o Dimensión Lateral, en cm.

h = Altura, en cm.

## Reporte de resultados

1. Descripción litológica de la muestra de roca.
2. Proveniencia de la muestra: Localización geográfica, profundidad, fecha y método de muestreo, orientación.
3. Orientación del eje de carga con respecto a los planos de foliación o estratificación.
4. Diámetro y altura del núcleo ensayado.
5. Velocidad de aplicación del esfuerzo y duración del ensayo.
6. Tipo de fractura (Ver figura 24), (también aplicada de forma similar a muestras cúbicas):
  - Corte oblicuo
  - Resquebrajamiento axial
  - Exfoliación axial o combinación de estas
7. Fecha del ensayo y características del equipo mecánico.
8. Otras propiedades físicas disponibles.

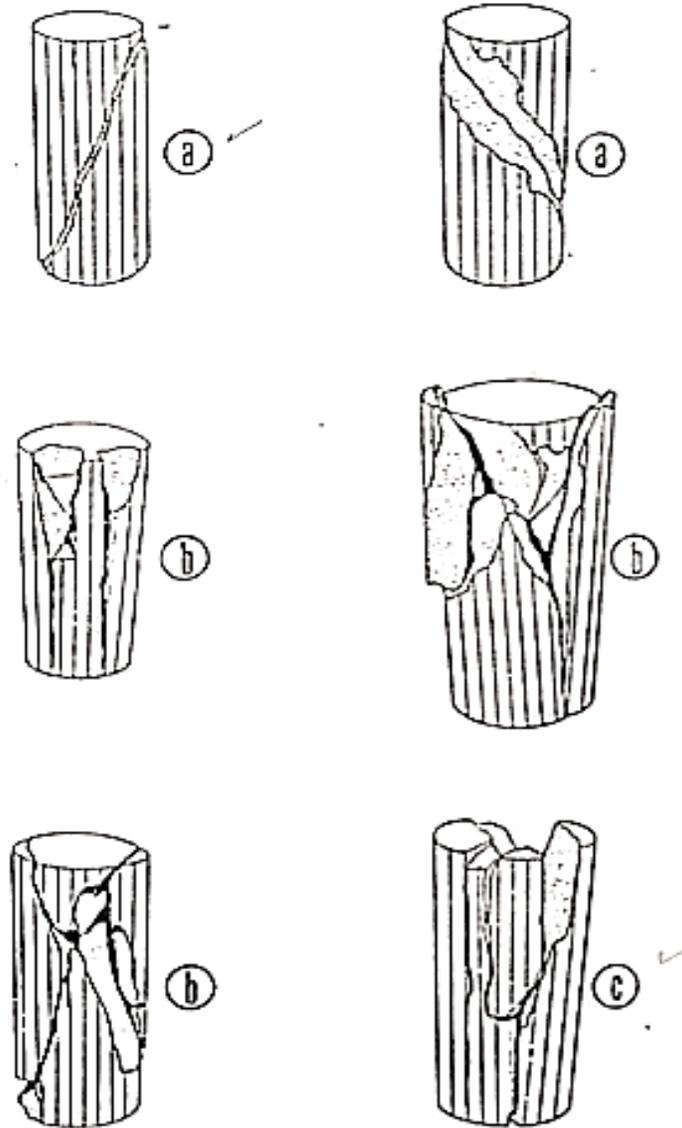


Fig. 24 Ejemplos de fracturas en muestras de roca (Castillejo, 1993)

9. Resistencia a la compresión uniaxial (monoaxial, no confinada o compresión simple) de cada espécimen ensayado y valor promedio por litología.

## **NOTAS EXPLICATIVAS (Propuestas por el CCCA, (1976))**

■ NOTA 1: Para materiales de granos muy gruesos como algunos granitos, el diámetro de la probeta no deberá ser menor de 6.35 cm (2.5”).

■ NOTA 2: Se considera que la altura de la probeta es la distancia entre las superficies de carga.

■ NOTA 3: En algunos materiales, tales como granito, se distinguen tres direcciones de fisurabilidad, a saber: “cruce principal o rift” (el plano de agrietamiento más fácil), “grano o grain” (el próximo plano de agrietamiento más fácil) y “grano duro o headgrain” (el plano de agrietamiento más difícil). Estas direcciones de fisurabilidad dan lugar a planos de partitura de la roca con superficies bastante lisas y uniformes, y tienen característica de ser aproximadamente perpendiculares entre sí. De vez en cuando es necesario realizar ensayos para determinar la resistencia perpendicular a cada una de estas direcciones. En tales casos, la muestra deberá marcarse en la cantera para indicar cuales caras son las de grano, “cruce principal” y “grano duro” y se deberá preparar el número de probetas necesarias, con sus superficies de carga paralelas a cada uno de estos planos y debidamente identificadas para los distintos ensayos.

■ NOTA 4: La exactitud de los resultados del ensayo depende de manera principal de la uniformidad en la distribución de la carga sobre las caras de la probeta; lo que a su vez depende del paralelismo entre las caras de carga y de su

perpendicularidad con el eje de la probeta y además de que las superficies de las caras de carga sean lo suficientemente planas. Para conseguir todo esto se requieren cuidados especiales en la preparación; se recomienda seguir el siguiente procedimiento: Suponiendo que la probeta sea un prisma rectangular y que la carga se va a aplicar paralelamente al eje más largo del prisma, tomar como referencia, dos caras laterales adyacentes del prisma y esmerilar las caras de carga hasta que sean perpendiculares a las dos caras de referencia, comprobándolo con una escuadra. Finalmente, pulir frotando las caras esmeriladas sobre la superficie plana y lisa de una plancha de hierro colado sobre la que se colocó un papel de lija N° 80 y agua. Para impedir que la probeta se balancee durante el pulido, conviene sujetarla lo más cerca posible del extremo que se lija. Como prueba de planeidad se puede ver si la superficie acabada previamente humedecida, presionada sobre otra superficie comprobadamente plana de un cuerpo que pese 4.5 kg (10lbs), es capaz después de levantarlo sin que se desprendan. También se puede hacer el acabado de las caras mecánicamente, siendo entonces los resultados de los ensayos considerablemente mayores. Para esto se coloca la probeta en el mandril de un torno (si es de tres puntos se puede colocar una cuña entre un punto y la probeta para asegurar la sujeción) y se esmerila con una rueda abrasiva montada en un árbol al que mueve un pequeño motor de alrededor de 5000 r.p.m. La planeidad se comprueba con una reglilla mirando a contraluz fuerte.

## **Clasificación**

En la tabla 3, se muestra la clasificación de la calidad de la roca intacta en función de su resistencia a la compresión uniaxial, sugerida por Franklin J. (1989).

<b>Clasificación de la roca</b>	<b>Co (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Extremadamente débil	< 20
Muy débil (Roca blanda)	20 - 60
Débil	60 – 200
Medianamente resistente	200 – 600
Muy resistente (Roca dura)	600 – 2000
Extremadamente resistente	> 2000

**Tabla 3. Clasificación de la roca en función de su resistencia a la compresión uniaxial.**

### **3.3. *Determinación de la deformabilidad de materiales rocosos en Compresión Uniaxial***

Este método de prueba está destinado a determinar las curvas de esfuerzo-deformación y los módulos de Young y relación de Poisson en compresión uniaxial de un espécimen de roca de geometría regular. Esta prueba está especialmente diseñada para la clasificación y caracterización de la roca intacta.

## **Aparatos y equipos necesarios**

1. Prensa para la aplicación y medida de la carga axial sobre la probeta, a una velocidad controlada (figuras 22 y 23, Pág. 83 y 84, respectivamente).
2. Discos de acero para la transmisión de la carga, de diámetro igual o ligeramente superior al de la muestra ( $\approx + 2$  mm), de 15 mm de espesor mínimo y de superficie completamente plana (tolerancia 0.005 mm)
3. Asiento esférico (ligeramente lubricado) para colocar en el extremo del disco superior.
4. Vernier, cronómetro, transportador
5. Medidor eléctrico de esfuerzos, transformadores diferenciales de variable lineal, medidores de compresión, dispositivos ópticos o cualquier otro equipo de medición adecuado. Deben estar diseñados de tal forma que el promedio de dos deformaciones axiales y diametrales, igualmente espaciados, puedan ser determinados para cada incremento de carga. Los equipos deben ser fuertes y estables, con una sensibilidad a la deformación en el orden de  $5 \times 10^{-6}$ .
6. Ambas deformaciones, axial y diametral deben ser determinadas con una exactitud de 2 % de la lectura y una precisión de 2 % de la escala de medición.

7. Si se utilizan medidores eléctricos de resistencia a esfuerzos, la longitud de los medidores sobre las deformaciones axial y diametral que se determinen deben tener un mínimo de 10 veces el tamaño del grano en magnitud y los medidores no deben pasar los límites dentro de  $D/2$  de los bordes del núcleo, donde  $D$  es el diámetro del mismo.
8. Si los micrómetros diales de LVDT's se utilizan para medir deformación axial debida a la carga, deben graduarse para una lectura alrededor de 0.002 mm y una exactitud dentro de 0.002 mm en un rango de 0.02 y 0.005 mm en un rango de 0.25 mm. El micrómetro o LVDT's no debe salirse de una distancia de  $D/2$  de los bordes del núcleo.
9. Un equipo para la grabación de las cargas y las deformaciones; preferiblemente un grabador X-Y capaz de plotear directamente las curvas de carga-deformación.

### **Preparación de las Muestras**

Ver apartado 3.2 (Preparación de Muestras)

### **Procedimiento**

1. La Humedad puede tener un efecto significativo sobre la deformabilidad de los núcleos a ensayar. Cuando sea posible, las condiciones de humedad deben ser preservadas desde que se toma la roca in situ hasta el momento del ensayo.

2. Cuando las características del material rocoso con estas condiciones varían de saturado a seco, debe tomarse NOTA de las condiciones de humedad a fin de realizar una correlación entre la deformabilidad y el contenido de humedad. El exceso de humedad puede crear un problema de adherencia de los medidores de esfuerzo los cuales pueden requerir un cambio en el contenido de humedad de la muestra. Las condiciones de humedad deben ser reportadas en conformidad con “Suggested method for determination of the water content of a rock sample”, Method 1, ISRM Committee on Laboratory Test, Document No. 2, December 1977.
3. La carga sobre el núcleo debe ser aplicada continuamente a un esfuerzo constante. La falla debe ocurrir entre los 5 y 10 minutos luego de la carga, de la misma forma el incremento de carga (Velocidad de aplicación del esfuerzo), debe estar entre los límites de 0.5 a 1.0 MPa/s
4. Los esfuerzos o deformaciones que se producen debido a cargas axial y diametral, deben ser grabadas entre intervalos de carga con poca separación entre ellos, si no son grabados de manera continua.
5. Deben tomarse un mínimo de 10 lecturas sobre los rangos de carga para definir las curvas de esfuerzo-deformación axial y diametral.
6. Es recomendable algunas veces, aplicar unos cuantos ciclos de carga y descarga.

7. El número de núcleos instrumentados y ensayados bajo un determinado grupo de condiciones, esto se obtiene según la práctica en las pruebas, pero es preferible un mínimo de 5 núcleos por litología.

### Cálculos

1. Las deformaciones Axial y Diametral ( $\varepsilon_a$  y  $\varepsilon_d$ , respectivamente), pueden ser grabadas directamente con un equipo indicador de esfuerzos o puede ser calculado a partir de las lecturas de deformación dependiendo del tipo de instrumentos tal como se discutió anteriormente.
2. La deformación Axial se puede calcular mediante la ecuación:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [18]$$

donde

$l_0$  : Medida inicial de la longitud axial

$\Delta l$  : variación de la medida de la longitud axial (definida como positiva para una disminución de la longitud)

3. La deformación Diametral puede ser determinada sobre cualquier diámetro, midiendo los cambios en el diámetro de la muestra o midiendo la deformación circunferencial. En el caso de medir los cambios de los diámetros, la deformación diametral puede calcularse mediante la ecuación:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0} \quad [19]$$

donde

$d_0$  : diámetro original, no deformado

$\Delta d$  : variación en el diámetro ( definido como negativo para un incremento en el diámetro)

4. En el caso de la medición de la deformación circunferencial  $\varepsilon_d$ , la circunferencia es

$$C = \pi \cdot d \quad [20]$$

siendo el cambio en la circunferencia

$$\Delta C = \pi \cdot \Delta d \quad [21]$$

Luego, la deformación circunferencial,  $\varepsilon_c$ , es relacionada con la deformación diametral,  $\varepsilon_d$ , mediante

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad [22]$$

así que

$$\varepsilon_c = \varepsilon_d \quad [23]$$

donde  $C_o$  y  $d_0$  son respectivamente, la circunferencia y el diámetro originales de las muestras.

5. El esfuerzo de compresión en la muestra  $\sigma$ , es calculado mediante la división de la carga compresiva  $P$  sobre el espécimen mediante el área de la sección transversal,  $A_0$

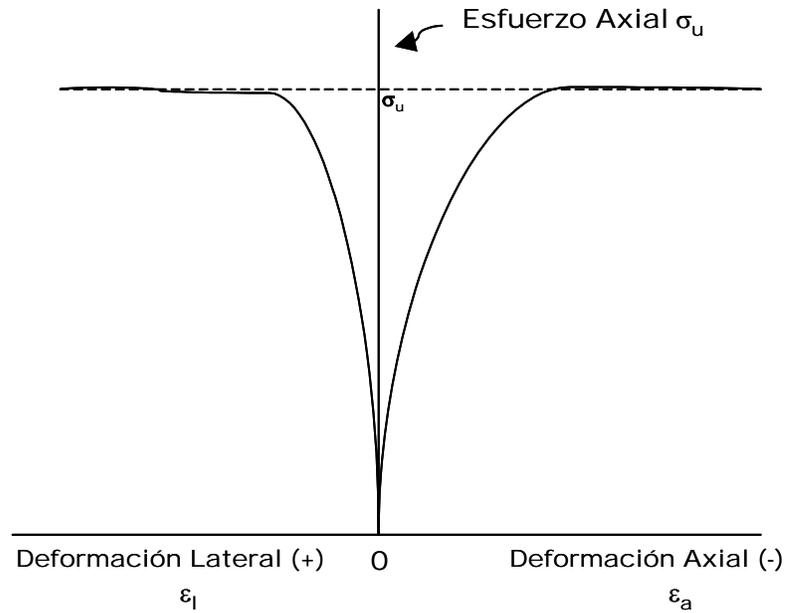
De esta forma

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad [24]$$

donde en el procedimiento de prueba, los esfuerzos compresivos y deformaciones son consideradas como positivas.

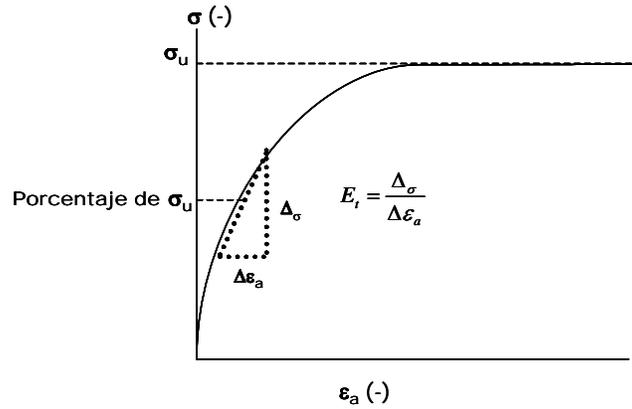
La figura 25 ilustra una gráfica típica del esfuerzo axial versus la deformación diametral. Estas curvas muestran el comportamiento de materiales rocosos desde cero esfuerzo hasta el esfuerzo ultimo,  $\sigma_u$ . La curva completa proporciona la mejor descripción del comportamiento de deformación de la roca teniendo un comportamiento esfuerzo-deformación, no lineal en bajos y altos niveles de esfuerzo.

6. El módulo Axial de Young,  $E$  (definido como la relación entre la variación del esfuerzo axial y la variación de la deformación axial producida por la variación del esfuerzo aplicado) de la muestra puede ser calculado empleando varios métodos aceptados en la práctica ingenieril. Los métodos más comunes, mostrados en la figura 26, se detallan a continuación.
7. El módulo tangente de Young,  $E_t$ , es medido como un nivel de esfuerzo el cual es un porcentaje fijo del último esfuerzo, (Fig. 26a). Generalmente tomando un nivel de esfuerzo equivalente al 50 % del ultimo esfuerzo uniaxial compresivo.

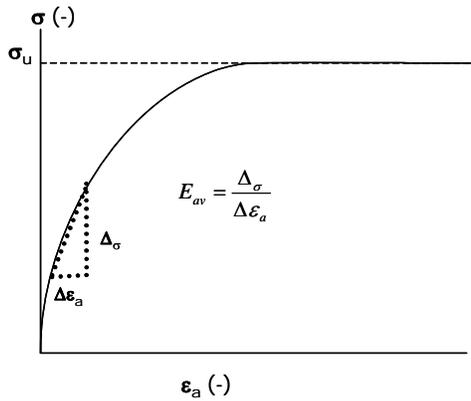


**Fig. 25 Formato para la presentación gráfica de la curva esfuerzo-deformación axial y diametral. (Fuente: ISRM, 1981)**

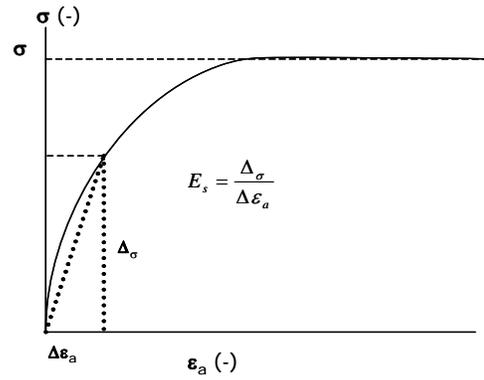
8. El módulo de Young promedio,  $E_{av}$ , es determinado por los promedios de las pendientes de una porción de la línea más o menos recta de la curva esfuerzo-deformación. (Fig. 26b).
  
9. Modulo de Young secante,  $E_s$ , es medido usualmente desde el esfuerzo cero hasta un porcentaje fijo del ultimo esfuerzo ( Fig. 26c), generalmente un 50 %.
  
10. El Módulo Axial de Young  $E$  es expresado en unidades de esfuerzo, por ejemplo, pascal (Pa) pero la unidad más apropiada es el gigapascal ( $GPa = 10^9 Pa$ ), ó  $Kg/cm^2$  expresado en forma exponencial ( $\times 10^5$ ,  $\times 10^6$ ).



a. Módulo de la Tangente medido en un porcentaje fijo del último Esfuerzo



b. Módulo Promedio de una porción Lineal de la Curva Esfuerzo-Deformación.



c. Módulo de la secante, medido por encima de un porcentaje fijo del último Esfuerzo

**Fig. 26** Métodos para calcular el módulo de Young para la curva esfuerzo-deformación. (Fuente: ISRM, 1981)

11. La relación de Poisson,  $\nu$ , puede ser calculada mediante la ecuación:

$$\begin{aligned} \nu &= - \frac{\text{pendiente de la curva esfuerzo - deformación axial}}{\text{pendiente de la curva esfuerzo - deformación diametral}} \\ &= - \frac{E}{\text{pendiente de la curva diametral}} \end{aligned} \quad [25]$$

donde la pendiente de la curva diametral es determinada de la misma forma que cualquiera de las tres maneras ya indicadas para el módulo de Young. Note que la

relación de Poisson en esta ecuación, tiene un valor positivo, ya que la pendiente de la curva diametral es negativa según las convenciones utilizadas en este procedimiento.

12. La deformación volumétrica,  $\varepsilon_v$ , para un nivel de esfuerzo dado es calculada mediante la ecuación:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2 \cdot \varepsilon_d \quad [26]$$

### **Reporte de resultados**

De 1 a 8, ver parte 3.2 (Reporte de Resultados)

9. Valores de carga aplicada, esfuerzos y deformaciones, ubicados en un gráfico.

10. Modulo de Young y relación de Poisson para cada muestra, expresadas en las tres figuras correspondientes (Fig. 26, Pág. 100), junto al resultado para la muestra.

11. Método de determinación del módulo de Young, y a que nivel de esfuerzo fue determinado.

12. Debe indicarse en este reporte si la muestra no cumple con las especificaciones geométricas para el ensayo.

### **3.4. *Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta (Brasileiro)***

#### **Aparatos y equipo necesario**

1. Para la realización de este ensayo, se requiere de una Prensa de carga y bomba Electro-hidráulica, como la referida en el aparte correspondiente al equipo y Materiales del ensayo de Compresión Uniaxial.
2. Cinta adhesiva gruesa (0.2 a 0.4 mm) de ancho igual o ligeramente superior al espesor de la muestra de roca.
3. Vernier, cronómetro, transportador

#### **Preparación de las muestras**

1. El espécimen de roca debe tener forma de disco, de por lo menos 50 mm de diámetro y espesor de 0.5 veces su diámetro. Generalmente se usan núcleos provenientes de perforaciones, de diámetro NX o superior.
2. La superficie cilíndrica debe estar libre de marcas y cualquier irregularidad a través del espesor del disco no debe exceder 0.025 mm.

3. Los extremos de la muestra deben ser planos y paralelos, permitiéndose tolerancias de 0.25 mm y 0.25 ° respectivamente.
4. La periferia del disco se recubre con una capa de cinta adhesiva, a fin de reducir posibles irregularidades de contacto.

### **Procedimiento**

1. Determinar el diámetro (D) de la muestra con aproximación de 0.1 mm, promediando dos medidas perpendiculares entre sí. Determinar el espesor (t) en el centro del disco de roca, con aproximación de 0.1 mm.
2. Montar el espécimen de roca en posición diametral en las mordazas de carga, de manera que el eje de rotación de la muestra y el aparato coincidan.
3. Aplicar carga en forma continua, con un incremento constante de 200N/s (20 kg/s) hasta producir la falla, lo cual debe ocurrir entre los 15 y 30 s de haber comenzado a aplicar la carga.
4. Registrar la carga (P) para el momento de inicio de la fractura (en muchos casos la carga continúa incrementándose hasta partir la muestra), sin embargo, la diferencia entre los valores generalmente no supera el 5%.

5. Si el plano de fractura se desvía significativamente de la línea recta entre los puntos de contacto con las mordazas, el ensayo se considerará inválido (Ver Fig. 27)



**Fig. 27 Fractura Típica de Ensayo de Tracción Indirecta**

6. Se recomienda realizar por lo menos diez ensayos por litología.

### **Cálculos**

1. Calcular la resistencia a la tensión uniaxial o inconfiada de la muestra de roca, mediante la expresión:

$$T_0 = 0.636 * \left( \frac{P}{D * t} \right) \text{ [N/mm}^2 \text{ = MPa]} \quad [27]$$

donde P es la carga de falla en (N), D es el diámetro del disco de roca en (mm) y t su espesor en (mm).

NOTA: Esta expresión solo se aplica cuando el plano de fractura se produce aproximadamente en línea recta entre los puntos de contacto entre las placas de carga. Esta fractura debe ser similar a la mostrada en la Figura 27, Pág. 104.

### **Reporte de resultados**

1. Descripción litológica de la muestra de roca.
2. Proveniencia de la muestra: Localización geográfica, profundidad, fecha y método de muestreo, orientación.
3. Orientación del eje de carga con respecto a los planos de foliación o estratificación.
4. Diámetro y espesor del núcleo ensayado.
5. Velocidad de aplicación del esfuerzo y duración del ensayo.
6. Tipo de fractura: orientación y localización de la superficie de falla.
7. Fecha del ensayo y características del equipo mecánico.
8. Otras propiedades físicas disponibles.

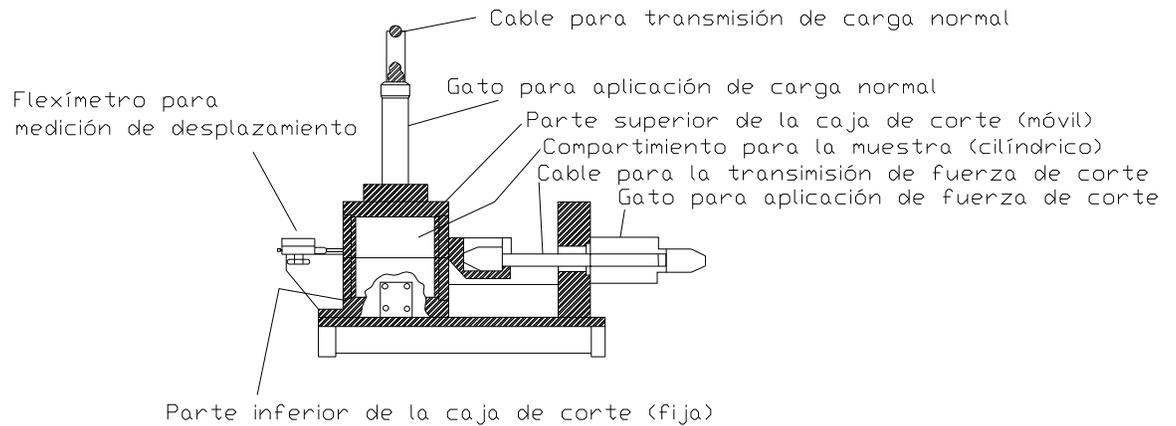
9. Resistencia a la tensión uniaxial de cada espécimen de roca y promedio por litología, en MPa o Kg/cm<sup>2</sup>.

NOTA: La dificultad en establecer exactamente el punto de inicio de la fractura, ha sugerido el uso de muestras en forma de anillo, sometidas a compresión o a presión hidráulica interna.

### **3.5. *Ensayo de Corte Directo en Discontinuidades***

#### **Aparatos y equipo necesario**

1. Para preparar la muestra:
  - a. Sierra de diamante, cincel o cortador de núcleos
  - b. Alambre o cinta adhesiva para mantener los planos de la discontinuidad unidos durante el montaje de la muestra.
  - c. Moldes desarmables para la montura del espécimen.
  - d. Cemento, yeso dental, resina o similar, de resistencia suficiente para fijar cada mitad de la muestra.
2. Caja de corte (Figuras 28 y 29) constituida por:



**Fig. 28 Esquema del equipo de Corte Directo, SBEL, RM-101. (Fuente: DE MARCO, 1995)**



**Fig. 29 Equipo de Corte Directo, SBEL, RM-102. Laboratorio de Mecánica de Rocas, U.C.V.**

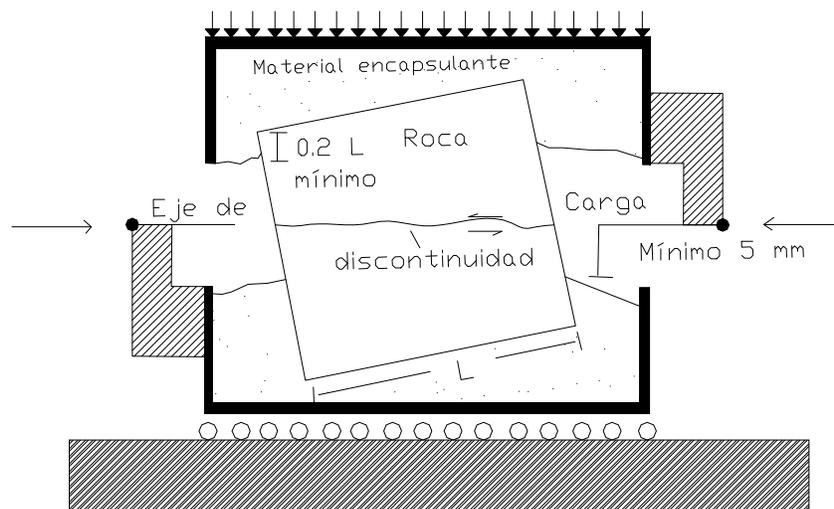
- a. Sistema para aplicación de carga normal, diseñado para asegurar que sea uniformemente distribuida sobre el plano a ensayar. La fuerza

resultante debe actuar normal al plano de corte pasando a través del centro del área y mantenerse constante con una tolerancia del 2% del valor deseado.

- b. Sistema para aplicar fuerza de corte, preferiblemente en dos sentidos, diseñado de manera que la carga sea distribuida uniformemente a lo largo de la superficie de discontinuidad y la fuerza de corte resultante actúe en el plano de corte. El equipo debe permitir un desplazamiento de corte de por lo menos el 10 % de la longitud del espécimen. Debe poseer un dispositivo de baja fricción (guayas o similares) para asegurar que la resistencia del mecanismo al desplazamiento de corte sea menor que el 1 % de la máxima fuerza de corte aplicada en el ensayo.
  - c. Equipo (manómetros) para la medición independiente de las fuerzas normal y de corte con una precisión de  $\pm 2\%$  de la máxima fuerza normal alcanzada en el ensayo.
3. Equipo (flexímetros) para la medición de los desplazamientos de corte, normal y lateral. En el primer caso el dispositivo debe permitir registrar un desplazamiento superior al 10 % de la longitud de la muestra, con una precisión de 0.1 mm. Para la medición de los desplazamientos normal y lateral, el equipo debe permitir un desplazamiento de 0.05 mm.
4. Vernier, cronómetro, implementos para la preparación de muestras

## Preparación de las muestras

1. El bloque o núcleo de roca que contenga el plano de discontinuidad a ensayar, debe obtenerse por métodos que eviten en lo posible la perturbación de la muestra. Las dimensiones del espécimen deben ser tales que permitan su acomodo en el molde de montaje y un encapsulamiento adecuado (Figura 30). Se recomienda el uso de muestras preferiblemente cuadradas con un área de corte mínima de  $2500 \text{ mm}^2$  y una altura de 40 mm. Para el caso de núcleos, se sugiere utilizar los provenientes de perforaciones de diámetro NX ( $\approx 54 \text{ mm}$ ), con una longitud (medida en su centro) igual o superior que el diámetro. Las dimensiones máximas para el equipo SBEL –RM 102 son  $80 * 80 * 80 \text{ mm}$ .
2. Durante el montaje, la integridad mecánica del espécimen debe asegurarse, manteniendo en posición y apretadas ambas caras de la discontinuidad con alambre o cinta adhesiva, que serán cortados justo antes de iniciar el ensayo.



**Fig. 30 Posición de la muestra en la Caja de Corte (Fuente; DEMARCO, 1995)**

3. Colocar la muestra en el molde inferior de manera que la superficie de discontinuidad quede centrada, orientada horizontalmente y sobresalga unos 5 mm por encima del molde (Figuras 30, Pág. 109 y 31). El espesor de empotramiento de cada parte de la muestra en el material de encapsulamiento será de por lo menos el 20 % de la longitud del bloque ensayado y nunca menor de 10 mm.



**Fig. 31 Montaje de la muestra en el material encapsulante**

4. Verter en el molde el material de encapsulamiento, hasta alcanzar su tope, y esperar el fraguado.
5. Preparar el molde para la segunda mitad de la muestra, agregar arena de grano fino tratando de cubrir la discontinuidad, dejando aproximadamente 1 cm de espesor. Todo esto a fin de que esta se encuentre libre de obstáculos al momento de realizar el ensayo.
6. Colocar (en forma invertida) el molde con la primera parte de la muestra (ya fija), sobre el segundo molde de manera que la porción de muestra restante, quede

embebida en el material de encapsulamiento según las mismas indicaciones que las especificadas para la primera porción ( punto 3 ).

7. Esperar el fraguado, desmontar cuidadosamente el espécimen de los moldes, identificar la muestra e indicar la dirección de corte en el material de fijación.

### **Procedimiento**

1. Colocar la muestra en la base inferior de la caja de corte, orientada según la indicación correspondiente y cubrir con la parte superior. Colocar los dispositivos para aplicación de la carga (cables, mangueras hidráulicas).
2. Cortar la cinta adhesiva y/o alambres colocados para sujetar las dos mitades de la muestra en posición.
3. Colocar los flexímetros para medición de las deformaciones normal, de corte y lateral.
4. Aplicar la carga normal hasta el valor especificado para el ensayo y registrar el desplazamiento normal. Las muestras húmedas o con relleno en el plano de corte, deberán someterse a una etapa de consolidación la cual se considerará completa cuando la variación en el desplazamiento normal sea inferior de 0.05 mm en 10 min.

5. Aplicar carga de corte en forma continua, con un incremento de esfuerzos constante (del orden de  $0.25 \text{ kg/cm}^2$ ) registrando los desplazamientos para cada incremento, hasta alcanzar la resistencia pico. (Deben tomarse por lo menos 10 lecturas antes de la rotura). La velocidad de aplicación de la carga debe ser tal que permita realizar las lecturas cómodamente y no debe ser superior a  $0.1 \text{ mm/min}$  en esta etapa. Esta velocidad puede ser incrementada a unos  $0.5 \text{ mm/min}$  entre lecturas, siempre que el valor de la resistencia pueda ser adecuadamente registrado.
6. Luego de alcanzar la resistencia pico, las lecturas pueden ser tomadas en incrementos que pueden variar entre  $0.5$  y  $5 \text{ mm}$  de desplazamiento de corte, seleccionando el valor más conveniente para la definición adecuada de la curva esfuerzo-desplazamiento. La velocidad de los desplazamientos de corte, en esta fase del ensayo, será de  $0.5$  a  $1 \text{ mm/min}$ .
7. Si se desea establecer la resistencia residual, se continuará con las lecturas hasta alcanzar por lo menos  $1 \text{ cm}$  de desplazamiento de corte. En este intervalo se registrarán 4 mediciones, las cuales no deben mostrar una variación mayor a  $5\%$  en el valor de resistencia cortante, para satisfacer la condición residual.
8. Habiendo establecido la resistencia residual, el esfuerzo normal puede ser incrementado o reducido y puede continuarse el corte para obtener los valores de resistencia residual para diferentes esfuerzos normales. Para alcanzar el desplazamiento necesario, pudiera ser necesario tener que invertir la dirección de corte o regresar la muestra a su posición inicial, sin embargo esta práctica no es

conveniente. Es recomendable, el uso de muestras diferentes para la determinación de resistencia pico y residual para cada esfuerzo normal aplicado.

9. Una vez finalizado el ensayo, retirar los flexímetros, descargar los gatos y desmontar la caja de corte.
10. Retirar la muestra, exponer el plano de corte y describirlo detalladamente según lo indicado en el punto V. Determinar el área de la superficie de corte tomando sus dimensiones con una aproximación de 0.1 mm.
11. Se recomienda realizar por lo menos cinco ensayos para la misma discontinuidad, ensayando cada espécimen a un esfuerzo normal diferente, pero constante.

### Cálculos y gráficos

1. Calcular el esfuerzo normal y de corte, para cada una de las lecturas efectuadas, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\text{Esfuerzo Normal} \quad \sigma_n = \frac{P_n}{A} \quad [\text{Kg/cm}^2 \text{ o N/mm}^2 \text{ (MPa)}] \quad [28]$$

$$\text{Esfuerzo de corte} \quad \tau = \frac{P_c}{A} \quad [\text{Kg/cm}^2 \text{ o N/mm}^2 \text{ (MPa)}] \quad [29]$$

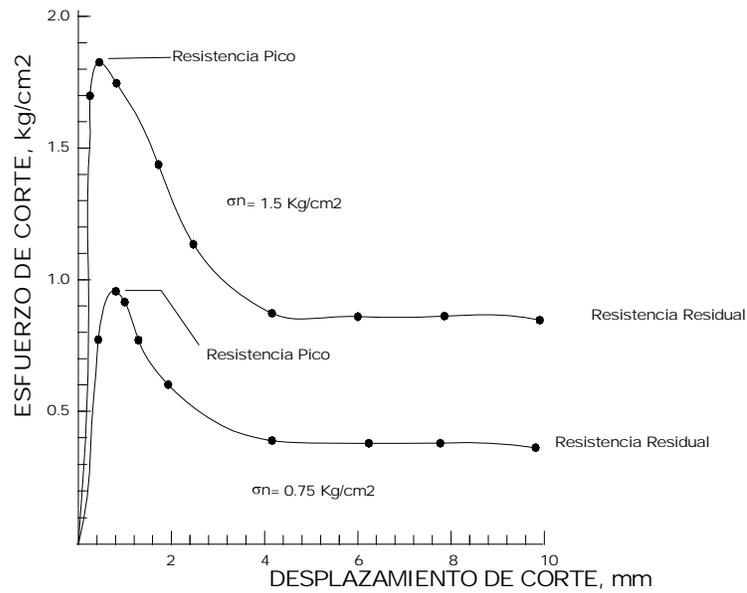
Donde:

$P_n$  = Fuerza Normal aplicada en Kg o N.

$P_c$  = Fuerza de corte aplicada en Kg o N.

$A$  = Área de la superficie de corte en  $cm^2$  ó  $mm^2$

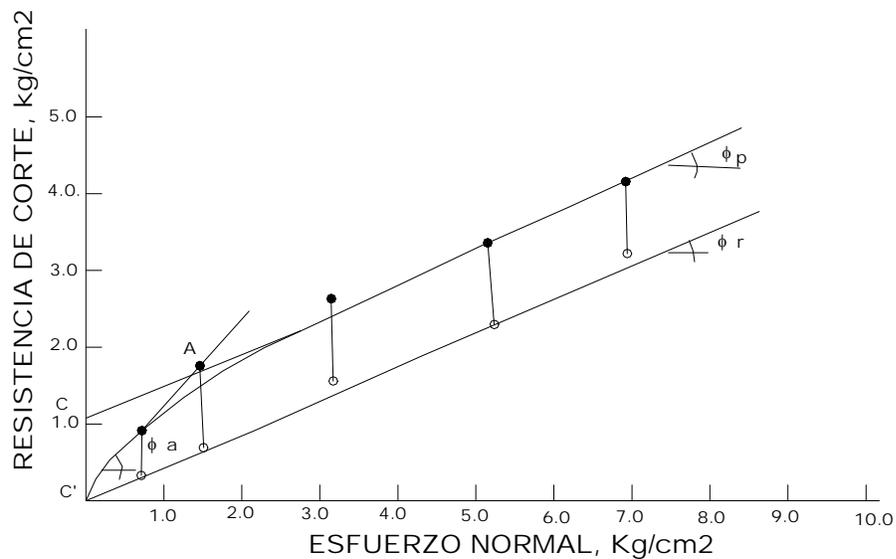
2. Graficar para cada muestra la curva esfuerzo de corte vs. Desplazamiento de corte, indicando el esfuerzo normal aplicado, y los valores de resistencia pico y residual ( Figura 32)



**Fig. 32 Curva típica esfuerzo de corte-desplazamiento, en planos de foliación de esquistos cuarzo-micáceo-calcáreo de la Formación Las Mercedes, Caracas ( DE MARCO, 1995)**

3. Graficar para varios especímenes de la misma discontinuidad, los valores de las presiones normales aplicadas, en el eje de las abscisas y sus correspondientes valores de resistencia al corte pico y residual, en el eje de las ordenadas ( Figura 33)

4. Las envolventes de resistencia pueden ser obtenidas, ajustando una curva a los puntos graficados anteriormente. Por consideraciones prácticas es aconsejable trazar una línea recta entre los puntos más relevantes o varias líneas rectas si fuera el caso ( Figura 33). Cada línea se caracteriza calculando su gradiente ( $m$ ) y su intercepto en el eje de las ordenadas ( $b$ ).



**Fig. 33 Representación del ensayo de corte directo para varios ensayos realizados a través de planos de foliación de esquistos cuarzo-micáceo-calcáreo de la formación Las Mercedes, Caracas. (DE MARCO, 1995)**

5. Determine, de acuerdo a las envolventes trazadas, los parámetros de resistencia al corte  $\phi_r$ ,  $\phi_a$ ,  $\phi_p$ ,  $c'$  y  $c$ , según se muestra en la figura y donde:

$\phi_r$ : ángulo de fricción residual

$\phi_a$ : ángulo de fricción para bajos esfuerzos normales, influenciado por la rugosidad (i) de la discontinuidad.  $\phi_a \approx \phi_r + i$ .

$\phi_p$ : ángulo de fricción para niveles de esfuerzos normales superiores a  $\sigma_a$  (ver punto A, figura 33)

$c'$ : intercepto de cohesión para la curva de resistencia pico (puede ser cero).

$c$ : cohesión aparente para los niveles de esfuerzos correspondientes a  $\phi_p$ .

### **Reporte de resultados**

1. Descripción litológica de la muestra de roca.
2. Descripción de la superficie de discontinuidad: tipo, perfil de rugosidad, presencia de relleno y sus características geométricas y litológicas, preferiblemente complementadas con propiedades índice relevantes ( p.e. contenido de humedad natural, límites de consistencia y granulometría del material de relleno, resistencia en la pared de la discontinuidad determinada con el martillo de Schmidt (ISRM, 1981)
3. Proveniencia de la muestra: Localización geográfica, profundidad, fecha y método de muestreo, orientación.

4. Forma y dimensiones del espécimen ensayado.
5. Fecha del ensayo y características del equipo mecánico.
6. Otras propiedades físicas disponibles.
7. Tabulación y gráfico de los valores de esfuerzo de corte y desplazamiento correspondiente, para cada nivel de esfuerzo normal aplicado (Figura 32)
8. Gráfico esfuerzo normal vs. Resistencia de corte, elaborado preferiblemente en base a resultados obtenidos de ensayar diferentes especímenes de la misma discontinuidad, indicando las correspondientes envolventes y parámetros de resistencia al corte interpretados (Figura 33).

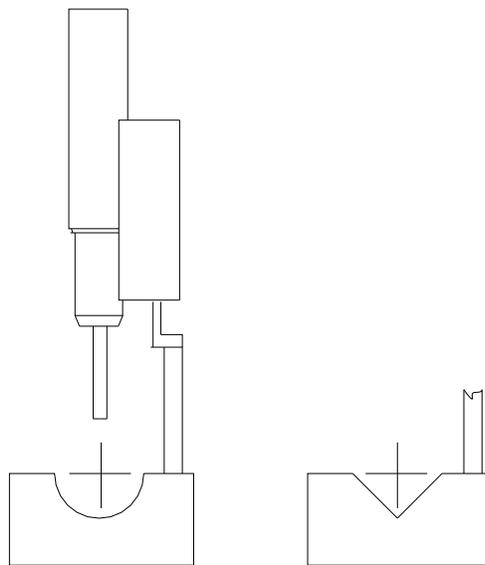
**3.6. Método Sugerido para la determinación de la dureza mediante el Rebote de Schmidt**

**Aparatos y equipo necesario**

1. Martillo de Schmidt el cual determina la dureza del rebote de una muestra. La punta del martillo es colocada sobre el espécimen y es deprimido dentro del martillo empujando este contra la muestra. La energía es almacenada en un resorte el cual se libera de manera automática indicando el nivel de energía y el impacto de la masa contra la punta del martillo. La altura del rebote (R) de la

masa es medida sobre una escala y es tomada como una medida de dureza. El equipo es portátil y puede ser usado tanto en laboratorio como en campo.

2. El martillo de Schmidt es disponible en diferentes niveles de impacto de energía. El tipo martillo L que tiene una energía de impacto de 0.74 Nm, es el recomendado para este método.
3. Una base de acero de un peso mínimo de 20 Kg en el cual las muestras deberán asegurarse. Los núcleos deben ser probados sobre una lámina de acero con un canal semicilíndrico del mismo radio que el núcleo, o también una hendidura en forma de V. (Fig. 34)



**Fig. 34 Bases para la ubicación de muestras. (Fuente: ISRM, 1981)**

## Procedimiento

1. Las muestras obtenidas para las pruebas de laboratorio deben ser representativas de la roca estudiada. En lo posible, debe tratarse de usar muestras grandes para las pruebas de dureza de Schmidt. El martillo Tipo L debe ser usado sobre núcleos con diámetro igual o superior a NX o sobre bloques de roca con un mínimo de separación entre bordes de 6 cm.
2. La superficie de prueba de todas las muestras, tanto en campo, como en el laboratorio, debe ser suave y plana en el lugar donde va a ser ubicada la punta del equipo. Esta área debajo de la roca o material rocoso, que debe tener una profundidad de 6 cm debe estar libre de grietas, o de alguna discontinuidad localizada en la masa rocosa.
3. Los trozos de roca pequeños, sean ensayadas en el laboratorio o en el campo, deben asegurarse a una base rígida a fin de minimizar las vibraciones y movimientos de la muestra durante el ensayo. La base debe ubicarse en una superficie plana que provea un soporte firme.
4. El valor de dureza obtenido se verá afectado por la orientación del martillo. Por esto se recomienda que el martillo sea utilizado en una de estas tres posiciones: verticalmente, apuntando hacia arriba, horizontalmente, o verticalmente hacia abajo con el eje del martillo ubicado a  $\pm 5^\circ$  en la posición deseada. Cuando no es factible el uso de alguna de estas tres orientaciones ( por ejemplo en pruebas

dentro de un túnel circular), la prueba debe ser conducida con el ángulo necesario y los resultados, deben ser corregidos a la posición horizontal o vertical utilizando las curvas de calibración suministradas por el fabricante. La orientación del martillo para las pruebas y las correcciones aplicadas para las orientaciones distintas a horizontal o vertical, deben ser reportadas en los resultados.

5. Debe realizarse un mínimo de 20 pruebas individuales sobre una muestra de roca. Las ubicaciones de la punta del martillo, deben estar separadas por una distancia mínima igual al diámetro de la punta del diámetro del martillo. Las pruebas que causen grietas o alguna otra falla visible deben ser rechazadas. Los errores en la preparación de la muestra y la técnica de prueba, tienden a producir bajos valores de dureza.

## Cálculos

1. Debido a que el Martillo utilizado en este ensayo es del Tipo M, para concreto, las lecturas obtenidas, deben convertirse al martillo tipo L. La expresión utilizada para esta expresión, Proviene de la gráfica mostrada en la Fig. E.1 del [Anexo E](#), y se muestra a continuación:

$$R(L) = 1.1141 * R(M) + 3.964 \quad [30]$$

donde

R(L): Rebote con el Martillo Tipo L

R(M): Rebote con el Martillo Tipo M

2. Con el valor promedio obtenido y la densidad del material se estima la Resistencia a la Compresión sin confinar utilizando la gráfica mostrada en el [Anexo E](#) (Fig. E.2)

### **Reporte de resultados**

1. Descripción litológica de la muestra de roca. Proveniencia de la muestra: Localización geográfica, profundidad, fecha y método de muestreo, orientación.
2. Tipo de muestra ( núcleo, perforación o muestra de mano, in situ). Tamaño y forma del núcleo o bloque de roca.
3. Fecha del muestreo, fecha del ensayo y condición de almacenamiento (por ejemplo, exposición a temperaturas extremas, aire seco, humedad, etc.)
4. Orientación del eje del martillo en durante la prueba.
5. Método de fijación de la muestra ( bloque V o sujetadores).
6. Valor de dureza obtenido por el martillo de Schmidt como se mostró en la sección anterior.

### **3.7. Método de Ensayo para Determinar la Densidad (Peso Específico) de Muestras de Roca y de estériles**

#### **Equipo Necesario**

Para las muestras con peso mayor de 250 gramos, y por debajo de los 5 Kg, el equipo constará de lo siguiente:

1. Balanza. Una balanza que tenga una capacidad de 5 Kg o más y con una precisión de 0.5 g o menos.
2. Envase (Beaker) con capacidad para sumergir las muestras a ensayar, manteniendo un nivel de agua constante.
3. Aparato de Suspensión, que suspenda la muestra dentro del envase con agua.
4. Para muestras con peso de 250 gramos o menos, el aparato debe constar de lo siguiente:
5. Balanza. Una balanza con capacidad de 500 gramos o más y con una precisión de 0.1 gramos o menos, que a la vez tenga un soporte estacionario.
6. Envase (Beaker) o envase apropiado para pesar la muestra en agua por medio de un hilo suspendido desde el aparato de suspensión

**Procedimiento (caso de muestras que puedan absorber agua)**

1. Peso de la muestra sin parafina. Determinar el peso de la muestra de ensayo por medio de la balanza especificada en la sección I. Este peso será designado con la letra "A".
2. Peso de la muestra con parafina. Cubrir la muestra de ensayo en toda su superficie con una capa de parafina lo suficientemente gruesa como para cubrir todas las cavidades de la superficie. (NOTA) La aplicación de parafina se puede lograr enfriando la muestra en el refrigerador hasta una temperatura de aproximadamente 4.4 °C ( 40 °F) por treinta minutos y luego sumergiéndola en parafina tibia. Puede ser necesario repasar la superficie con una brocha llena de parafina caliente para llenar los vacíos más pequeños. Dejar que el recubrimiento se enfríe al aire libre por treinta minutos, y luego determinar el peso seco de la muestra (D) a la temperatura ambiente con la balanza especificada en la sección 3.7. Muestras con peso mayor de 250 gr deberán pesarse con precisión de 0.5 gr. Muestras con peso de 250 gr o más deberán pesarse con precisión de 0.1 gr.

NOTA: Si se desea utilizar la muestra en otras pruebas que requieran el desprendimiento de la cubierta de parafina, puede cubrirse la muestra con talco pulverizado antes de colocarle la parafina.

3. Peso de la muestra con parafina en el Agua. Sumergir la muestra de ensayo recubierta de parafina dentro de un baño de agua a temperatura ambiente y

luego pesar dentro del agua con el aparato descrito en la sección 3.7. Este peso se designará como “E”. En caso tal en que las características de la balanza y del recipiente no permitan el peso directo de la muestra, debe pesarse primero el recipiente solo con agua y luego pesar el recipiente con la muestra sumergida. El peso “E”, será el resultado obtenido de la diferencia de estos dos.

4. Peso específico de la parafina. Determinar el peso específico de la parafina ( en caso de que no se pueda, puede tomarse generalmente un valor de 0.90). Este valor se designará como “F”.
5. Determinar el Peso específico ( Densidad) de la muestra de ensayo, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Peso Específico} = \frac{A}{E - \left( \frac{D - A}{F} \right)} \quad [31]$$

donde:

- A: Peso, al aire, de la muestra seca (en gramos).
- D: Peso, al aire, de la muestra seca más el recubrimiento de parafina ( en gramos).
- E: Peso, al agua, de la muestra seca, más el recubrimiento de parafina (en gramos). (Diferencia entre peso de muestra sumergida en el recipiente con agua, y peso del recipiente con agua, sin la muestra).

■ F: Peso específico de la parafina

6. Las determinaciones repetidas no deberán variar en más de 0.02 para muestra de ensayo con peso mayor a 250 gr y menor de 5 Kg, ni en más de 0.01 para muestras de ensayo con peso de 250 gr o menos.

**Procedimiento (caso de muestras que no absorban agua (sin parafina))**

1. Sumergir la muestra de ensayo dentro de un baño de agua a temperatura ambiente y luego pesar dentro del agua con el aparato descrito en la sección 3.7. Este peso se designará como “E”. Muestras con peso mayor de 250 gr deberán pesarse con precisión de 0.5 gr. Muestras con peso de 250 gr o más deberán pesarse con precisión de 0.1 gr. En caso tal en que las características de la balanza y del recipiente no permitan el peso directo de la muestra, debe pesarse primero el recipiente solo con agua y luego pesar el recipiente con la muestra sumergida. El peso “E”, será el resultado obtenido de la diferencia de estos dos.
2. Determinar el Peso Específico (Densidad) de la muestra de ensayo, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Peso Específico} = \frac{A}{E} \quad [32]$$

donde:

- A: Peso, al aire, de la muestra seca (en gramos).

■ E: Peso, al agua, de la muestra seca (en gramos). (Diferencia entre peso de muestra sumergida en el recipiente con agua, y peso del recipiente con agua, sin la muestra).

3. Las determinaciones repetidas no deberán variar en más de 0.02 para muestra de ensayo con peso mayor a 250 gr y menor de 5 Kg, ni en más de 0.01 para muestras de ensayo con peso de 250 gr o menos.

## CAPÍTULO VI

### Resultados Experimentales

Cabe destacar aquí, que para los efectos de la caracterización del Macizo, se tomaron en cuenta solamente dos unidades, la unidad 4 y las unidades 7 y 9 agrupadas en una misma unidad.

Debido a que las calizas de interés en este estudio (Unidades 7 y 9), pertenecen a la Formación Maraca, según Rodríguez, S (1986), y las características litológicas, según González de Juana (1980) son reconocidas por su similitud litológica, como se cita a continuación: “En el Estado Trujillo Maraca se reconoce por su similitud litológica, extraordinariamente notable, con el resto del occidente de Venezuela. Se compone típicamente de caliza arenosa conchífera, gris en capas gruesas, con abundantes especímenes de *Exogyra* (*E. aff. Squamata* D’ORBIGNY) y *Ostrea scyphax* COQUAND. Las calizas son más arenosas hacia la base y el espesor de la unidad no sobrepasa 10 a 20 m.”

Por las características litoestratigráficas y bioquímicas que definen la facies de formación de estas calizas así como sus límites y extensión regional podemos considerar esta secuencia de caliza-arenisca-caliza como una Unidad estratigráfica.

Es reconocida estratigráficamente la Formación Maraca en la geología Venezolana; por conveniencia en el ordenamiento de la explotación internamente se ha subdividido la Formación Maraca en Unidades 9,8 y 7 (GUTIERREZ, A (2000) Inédito).

A continuación se presentan, en resumen, los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio clasificados por litología (unidad). En el [Anexo G](#), se puede ver con detalle los datos correspondientes a los resultados de cada ensayo.

## 1. Ensayo de Carga Puntual

Se realizaron 25 ensayos para la Unidad 4 y 40 para las Unidades 7 y 9, los cuales se presentan en las tablas ubicadas en el [Anexo G](#), Tablas G.1, G.2. Para cada muestra se calcularon los valores, como se muestra a continuación.

Por ejemplo para la muestra M7U9P48E, se calculó el índice de Carga Puntual mediante la expresión [8] Cap V, 3.1 Ensayo de Carga Puntual

$$I_s = \frac{16500 N_w}{3101.18 \text{ mm}^2} = 5.32 \text{ MPa}$$

El “diámetro del núcleo equivalente” en este caso está dado por:

$$De^2 = D^2, \text{ para el ensayo diametral} \quad [9]$$

$$De^2 = \frac{4 * A}{\pi} \text{ para el ensayo axial, bloque o irregular.} \quad [10]$$

$$\text{Siendo } A = W * D \quad [11]$$

(área mínima de la sección transversal del plano de rotura (mm<sup>2</sup>))

En este caso, y por las características geométricas de la muestra, el ensayo es de tipo axial, los cálculos son como sigue:

$$De^2 = \frac{4 * 2435.66 \text{ mm}^2}{\pi} = 3101.18 \text{ mm}^2$$

Luego de obtener el valor de  $I_s$ , se determinó el Factor de Corrección (F), de la siguiente forma:

$$F = \left( \frac{De}{50} \right)^{0.45} = \left( \frac{55.69 \text{ mm}}{50} \right)^{0.45} = 1.05$$

Se procede ahora a calcular el Índice de Carga Puntual corregido  $I_s(50)$ , como se muestra seguidamente.

$$I_s(50) = F * I_s = 1.05 * 5.32 \text{ MPa} = 5.58 \text{ MPa}$$

Ahora se calcula el valor promedio de  $I_s(50)$  para cada serie o conjunto de ensayos, descartando los dos valores mas altos y los dos más bajos, y se determinó el Índice de Anisotropía ( $I_a$ ), definido con la siguiente ecuación

$$I_a = \frac{I_s(50) \perp}{I_s(50) \parallel}$$

Estos resultados, se muestran en las tablas 4 y 5 correspondientes a cada Unidad Litológica Trabajada.

UNIDAD 4	Promedios:
$I_{s(50)\perp}$ (Mpa)	4,50
$I_{s(50)\parallel}$ (Mpa)	4,89
$I_{a(50)}$	0,92

Tabla 4. Resultados Ensayo de Carga Puntual para la Unidad 4

UNIDADES 7 Y 9	Promedios:
$I_{s(50)\perp}$ (Mpa)	4,70
$I_{s(50)\parallel}$ (Mpa)	4,83
$I_{a(50)}$	0,97

Tabla 5. Resultados Ensayo de Carga Puntual para Unidades 7 y 9

## 2. Ensayo de Compresión Uniaxial

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de los ensayos de Compresión Uniaxial (Tabla 5). Vale la pena acotar que estos ensayos se realizaron tanto en muestras cúbicas como en muestras cilíndricas, para cada una se exponen los procedimientos en el Capítulo V, ítem 3.2, aparte III (Procedimiento Experimental). Se muestran también las fotografías de las fracturas de cada muestra ensayada, junto con los gráficos esfuerzo-Deformación Unitaria correspondientes ( Figuras 35 a 48).

Se determinó también el Módulo de Young, en sus variantes Tangencial y secante,(Ver Capítulo V; ítem 3.3).

El esfuerzo Máximo se obtuvo luego de realizar los gráficos Esfuerzo-Deformación Unitaria, siendo este el mayor valor que fue leído antes de producirse la fractura mediante, con este valor y con el área de la muestra se obtuvo el valor correspondiente a la Compresión Simple ( $C_o$ ).

A continuación se muestra un Calculo Tipo, donde se calculan los valores especificados anteriormente.

Para el cálculo de la Compresión Uniaxial, se utilizó la expresión [16], página 87, realizándose el mismo como sigue:

- Se transformó el valor obtenido en el ensayo, ya que se tomaron solamente divisiones, a las unidades correspondientes, es decir, que la carga ( $P$ ) en divisiones ( $Div$ ), se llevó a Kilogramos ( $Kg$ ), y la deformación, también en divisiones, se llevó a deformación Unitaria.

$$P = 12 Div$$

$$P = 12 [Div] * 200 \left[ \frac{Kg}{Div} \right] = 2400 Kg$$

donde, 200 es la apreciación del equipo, que indica que 1 división, son 200 Kg.

- La deformación Unitaria, se determina utilizando la expresión [18], página 97 y se calcula como sigue:

$$\varepsilon = 26 \text{ Divisiones}, \varepsilon = 0.026 \text{ pulgadas} * 25.4 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{pulgadas}} \right] = 0.6604 \text{ mm}$$

Luego, La deformación Unitaria, es:

$$\varepsilon_{unitaria} = \frac{0.6604 \text{ mm}}{(16.60 \text{ cm} * 10 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{cm}} \right])} = 0.004$$

donde, 16.60 cm, es el valor de la longitud de la muestra de roca ensayada.

- Como último cálculo se determina la Resistencia a la Compresión Uniaxial ( $C_o$ ), utilizando la siguiente expresión:

$$C_o = \frac{P_{\text{máx}}}{A} = \frac{2400 \text{ kg}}{6.33 \text{ cm}^2} = 379.15 \text{ kg/cm}^2$$

- En el caso de muestras cúbicas se reporta el valor máximo multiplicado por 0.8, factor recomendado para poder compararlo con los resultados en muestras cilíndricas.

- Para el cálculo del Módulo de Young, simplemente debe determinarse la pendiente de un tramo de la gráfica resultante (Ver Cap. V). En el caso del Módulo Tangente, se determinó primero en la gráfica, un punto correspondiente al 50 % del valor de la carga, y se trazó una recta aproximada a la gráfica. Para el Módulo de Young Secante, se determina este mismo valor, pero se la recta es trazada desde el origen, hasta el valor correspondiente al 50 % de la carga. La expresión utilizada para determinar estos valores se muestra en el Capítulo. V

■ Todos estos cálculos fueron realizados con el programa Microsoft Excel de la Casa Microsoft y se presentan en la tabla 6 y en las figuras 35 a 48.

MUESTRA	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	LONGITUD (cm)	DIAMETRO (cm)	ANCHO (cm)	TIPO DE FRACTURA	P máx. (kg)	Ao (cm <sup>2</sup> )	Co (kg/cm <sup>2</sup> )	Et* (kg/cm <sup>2</sup> )	Es** (kg/cm <sup>2</sup> )
M10U4P50	Caliza gris con tonos rosáceos. Bioperturbada. Micritica. Vetas de calcita.	16,60	6,28	-	B	8000	30,97	258,27	97881,95	143722,22
M12U4P50	Caliza micritica gris con estratificación plana paralela continua y grietas delgadas rellenas de calcita.	15,80	6,34	-	B	12000	31,57	380,11	65524,30	42222,91
M12U4P51	Caliza gris fosilifera con grietas rellenas de calcita. Fósiles de bivalvo y gasterópodos.	16,73	6,32	-	B	14000	31,37	446,28	65188,05	52128,19
M13U4P51	Caliza gris fosilifera (Bivalvos y gasterópodos grandes). Bioperturbada. Grieta rellena de calcita.	17,49	6,33	-	B	12800	31,47	406,74	68585,23	42435,06
M5U4P50	Limolita carbonosa negra	16,76	6,33	-	B	5600	31,47	177,95	28766,88	40443,18
M8U4P51	Caliza micritica con estructuras estilolíticas, fragmentos de fósiles y materia orgánica	16,73	6,32	-	B	6600	31,37	210,39	51744,01	37434,16
M2U9P48B	Caliza gris dura, masiva	14,58	6,33	-	B	10400	31,47	330,47	52821,40	47424,18
MAU7D	Caliza gris dura, masiva	18,15	6,33	-	B	22000	31,47	699,08	79072,07	81288,37
M3U9	Caliza gris, dura, masiva con tonos rosados (alteración). Fragmentos fósiles	7,91	-	8,07	B-C	29900	63,83	374,72	20836,94	18216,78
M11U9	Caliza gris con cristales de calcita y algunos esporádicos de cuarzo	8,50	-	8,25	B-C	71000	70,13	809,98	28320,09	28381,94
M8U9	Caliza gris, oscura, dura, masiva con granos de cuarzo. Bioperturbada	7,45	-	6,81	B-C	53800	50,73	848,34	20134,36	22018,29
M9U9.2	Caliza gris oscura, masiva con grietas rellenas de calcita	7,50	-	7,10	B-C	43400	53,25	652,02	37781,35	35992,47
M16U9	Caliza gris con cristales de calcita y algunos esporádicos de cuarzo	6,12	-	7,00	B-C	51200	42,81	956,90	49425,64	49901,83
MEU7	Caliza gris, Masiva, dura. Cristales de calcita	8,01	-	9,60	B-C	63400	76,90	659,59	21028,35	23991,45

**Tabla 6. Resultados Ensayo de Compresión Uniaxial**

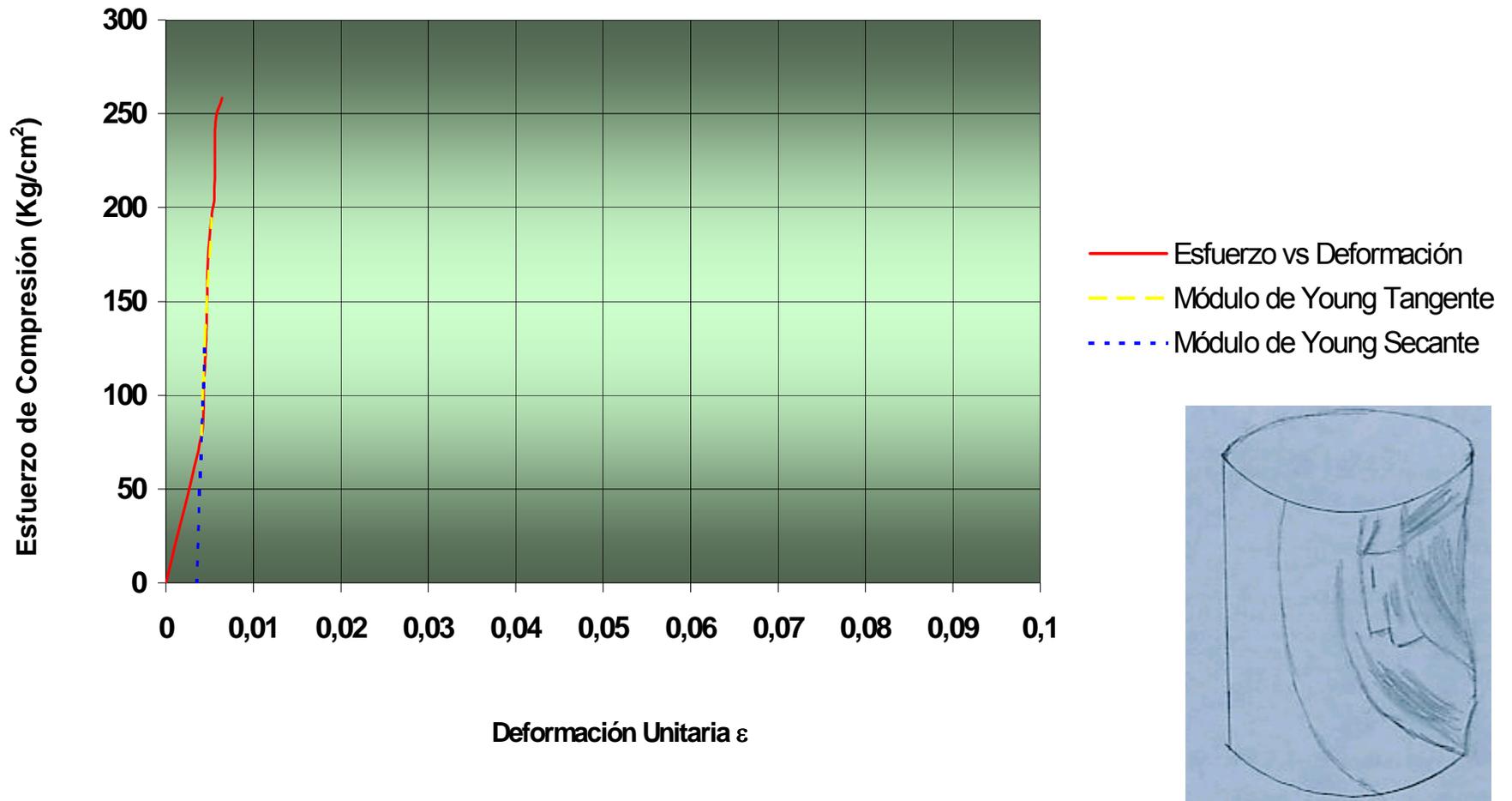


Fig. 35. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M10U4P50 y Fotografía de la fractura (Fuente: Elaboración Propia)

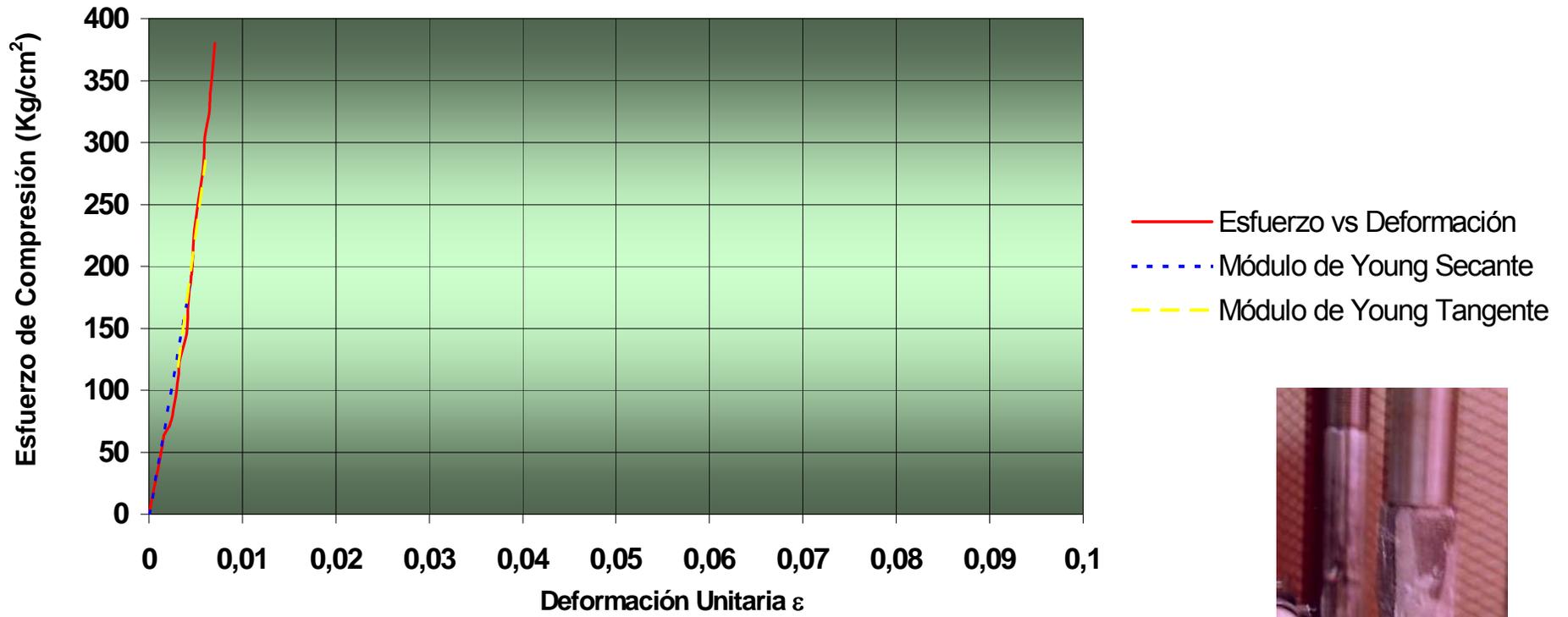


Fig. 36. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M12U4P50 y Fotografía de la fractura

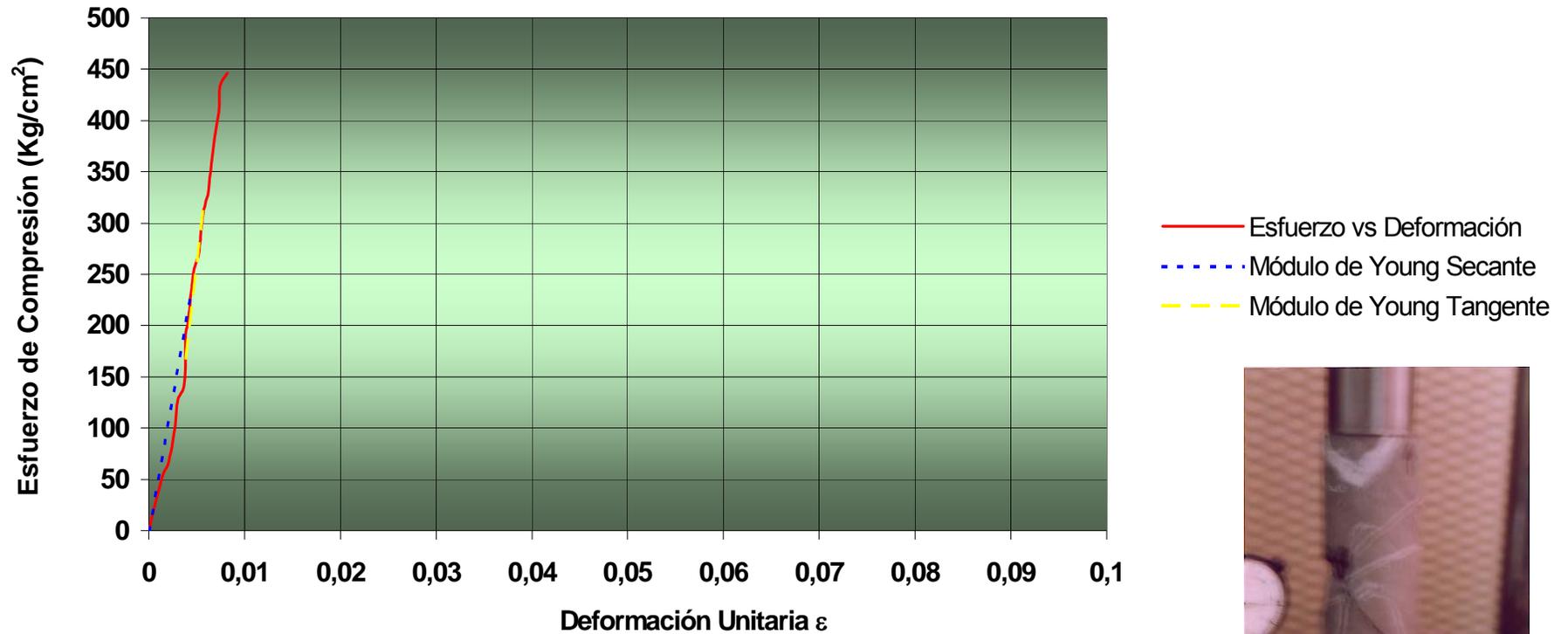


Fig. 37. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M12U4P51 y Fotografía de la fractura

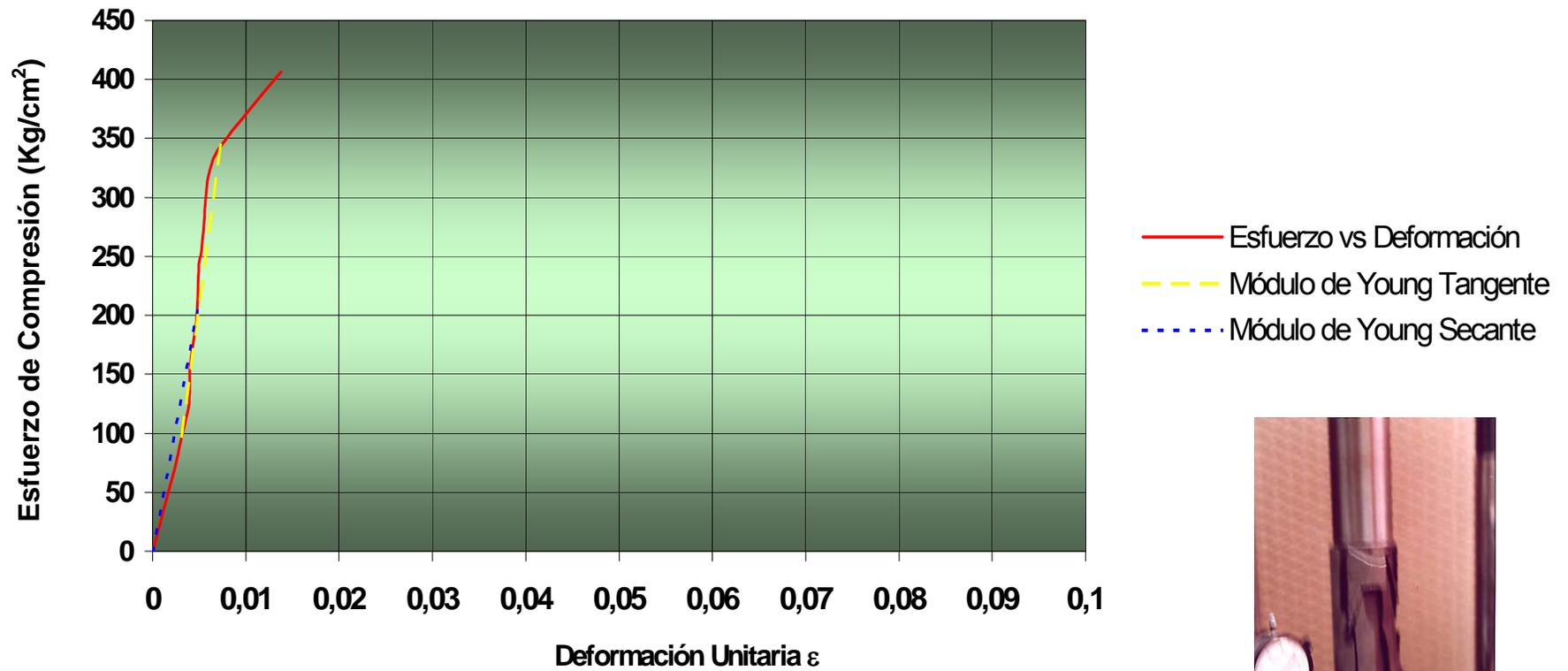


Fig. 38. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M13U4P51 y Fotografía de la fractura

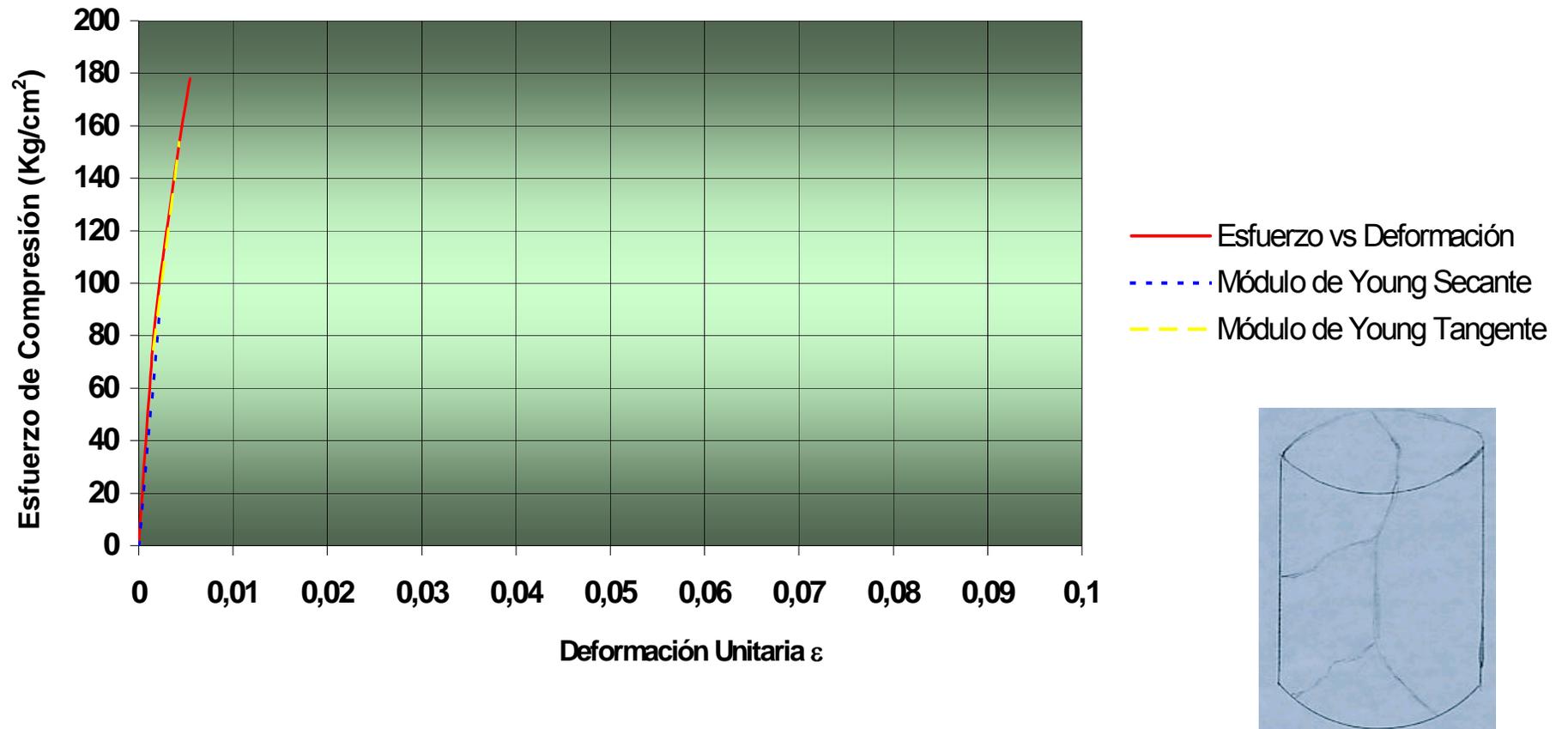


Fig. 39. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M5U4P50 y Fotografía de la fractura

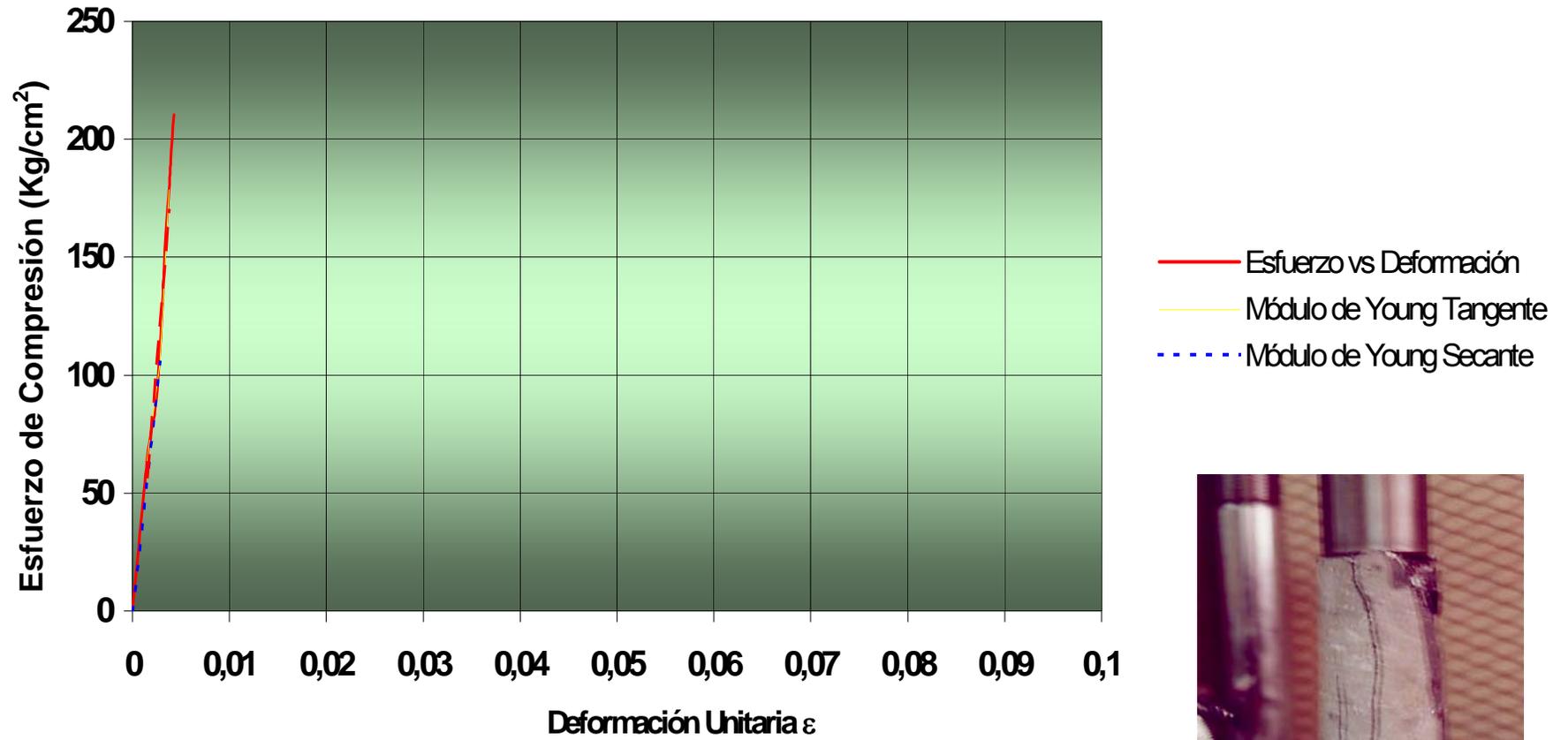


Fig. 40. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M8U4P51 y Fotografía de la fractura

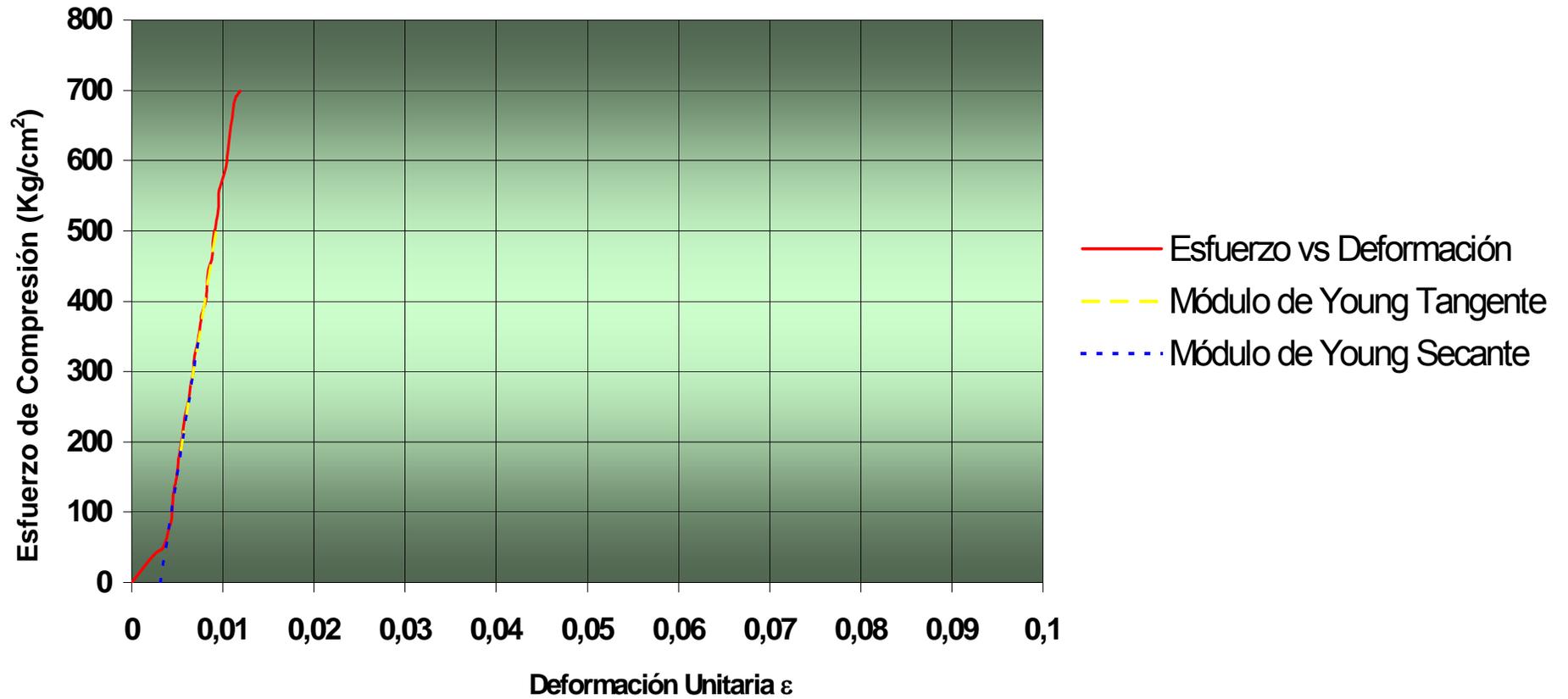


Fig. 41. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra MAU7D (sin fotografía de la fractura, la muestra se destruyó completamente)

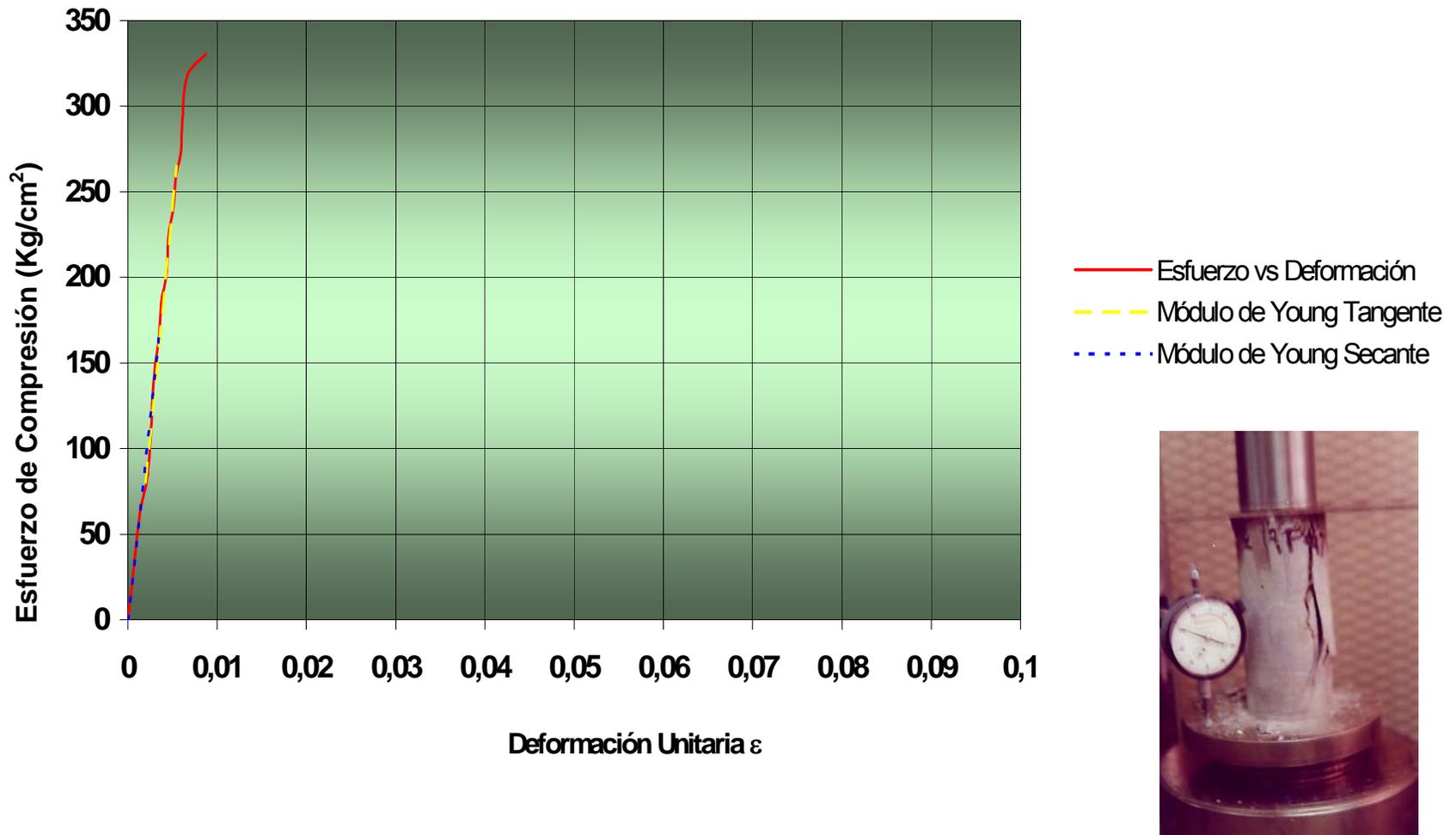
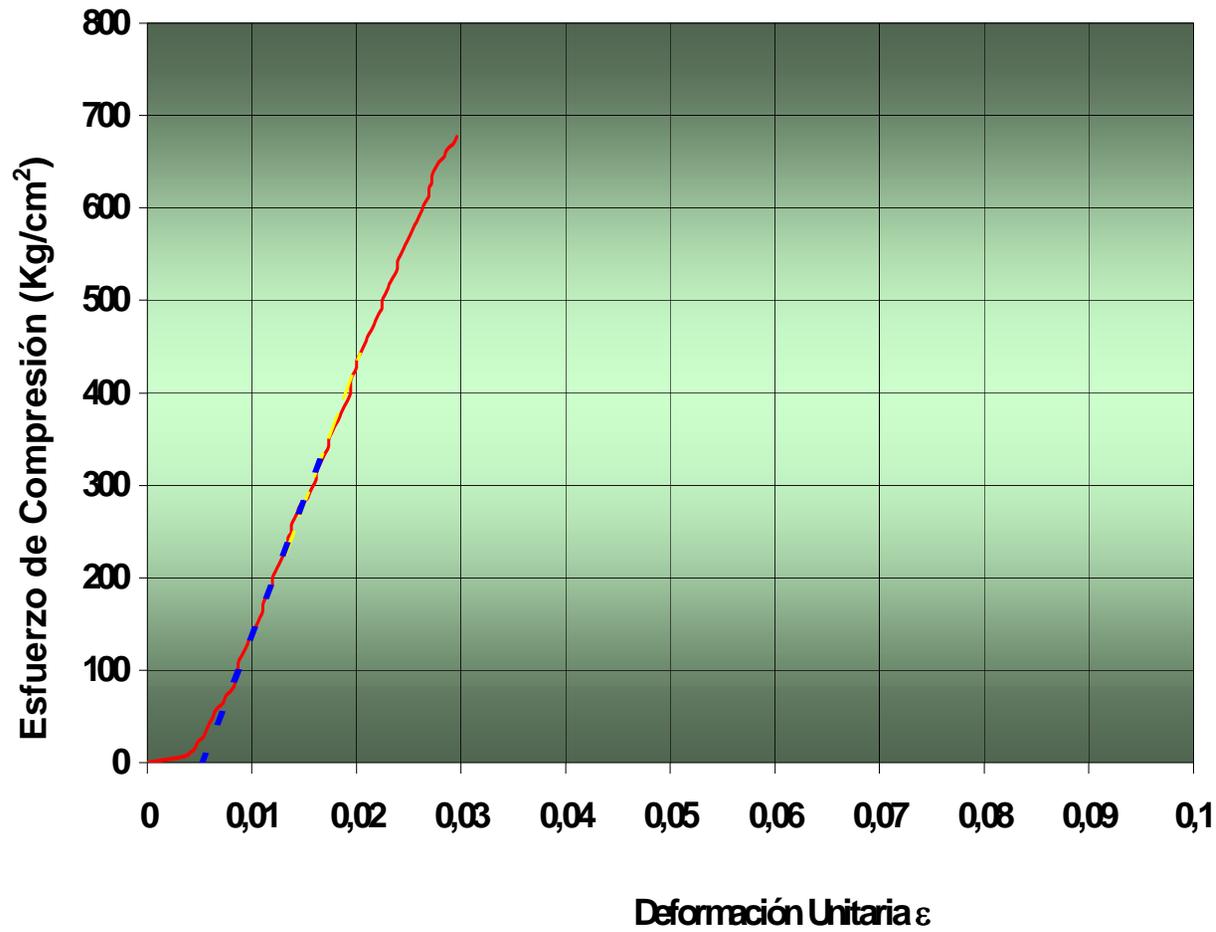


Fig. 42. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M2U9P48B y Fotografía de la fractura



- Esfuerzo vs Deformación
- - - Módulo de Young Tangente
- ■ ■ Módulo de Young Secante



Fig. 43. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M11U9 y Fotografía de la fractura

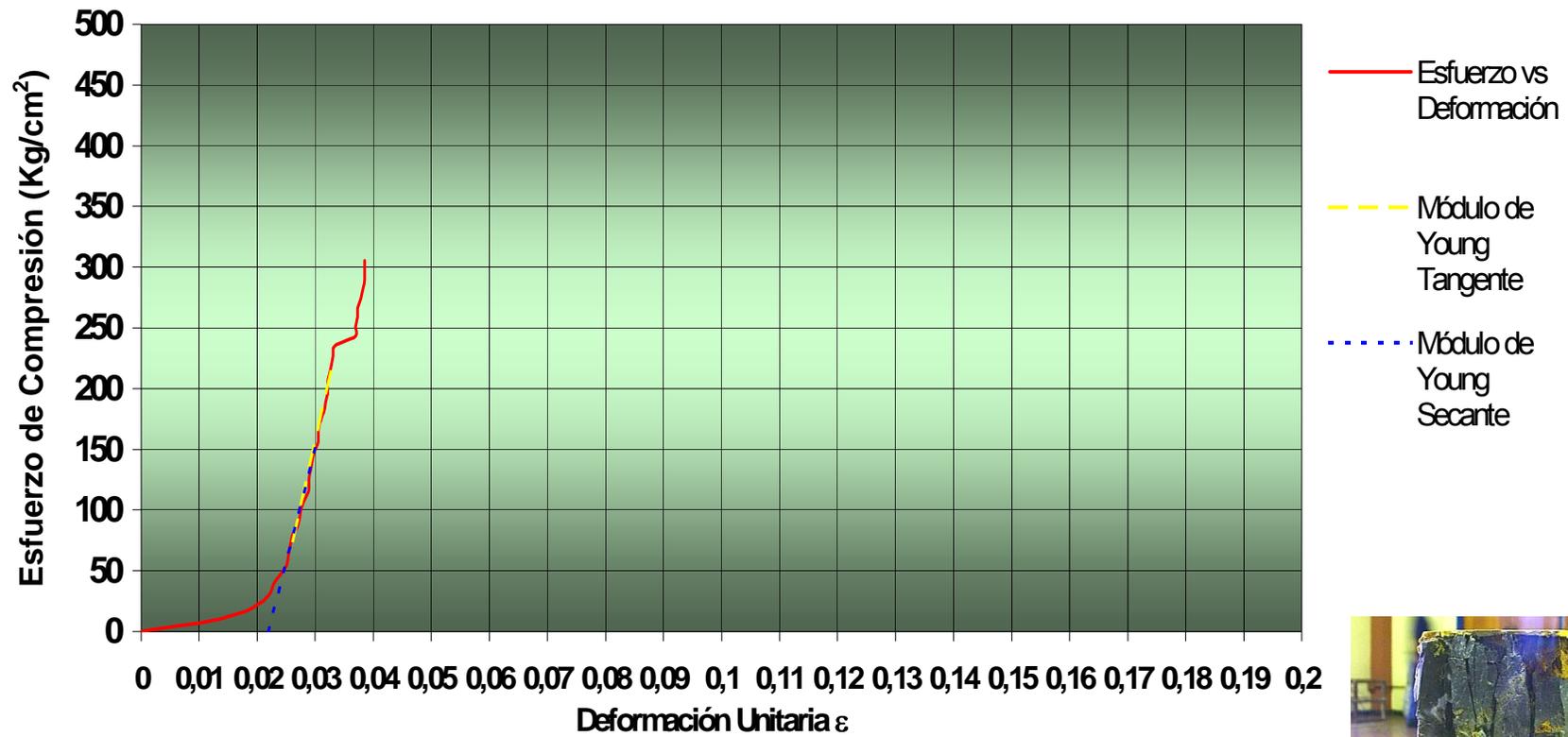


Fig. 44. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M3U9 y Fotografía de la fractura

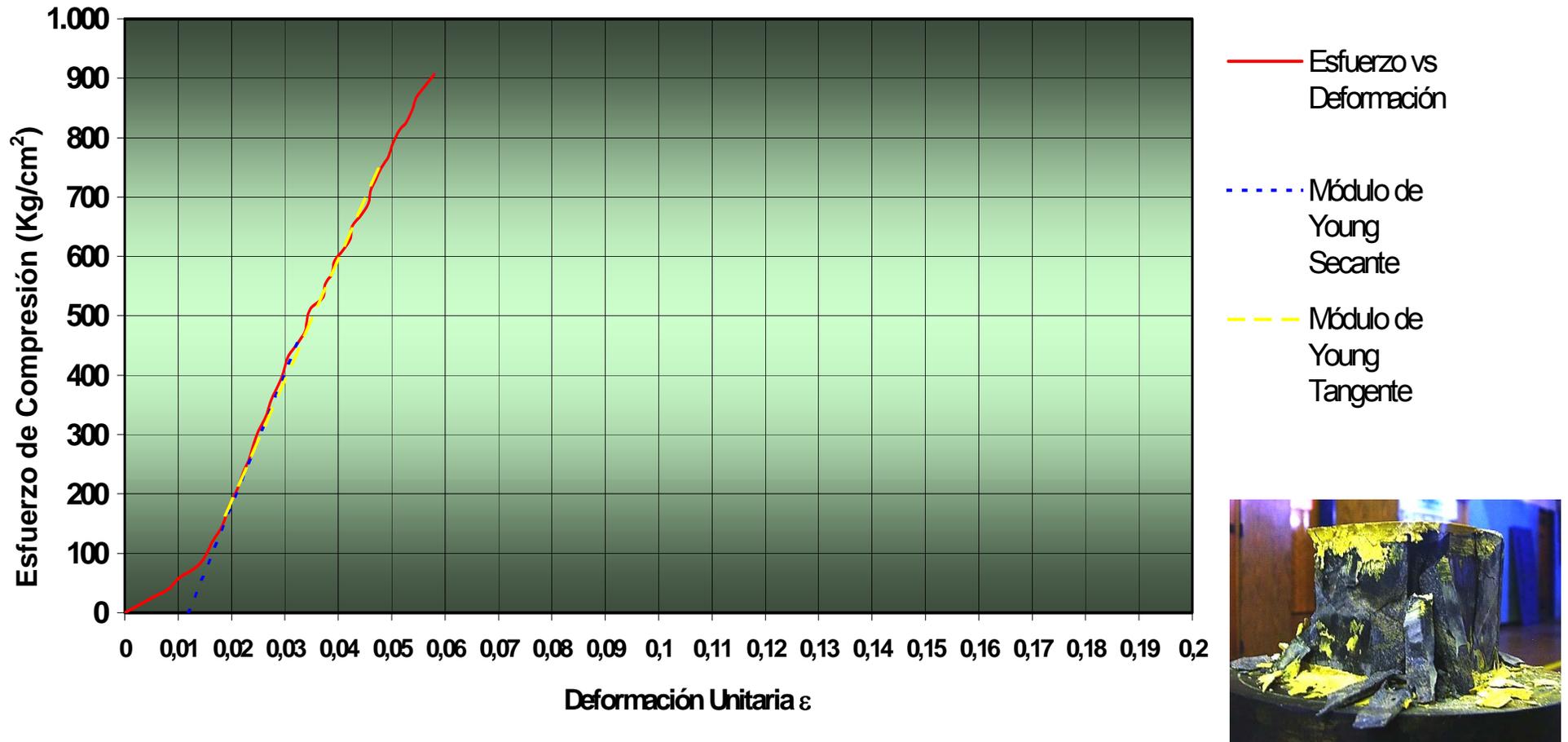


Fig. 45. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M8U9 y Fotografía de la fractura

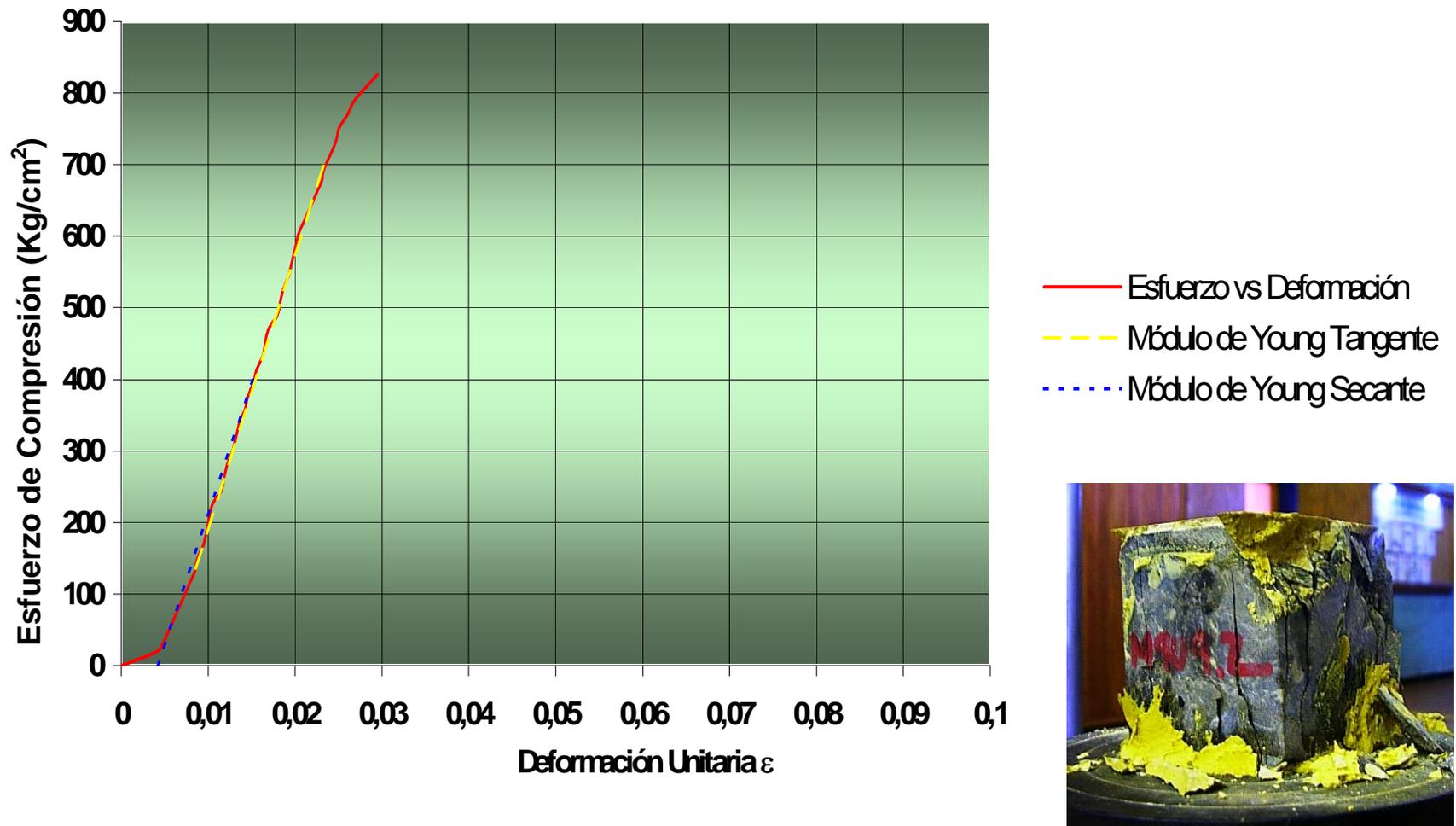
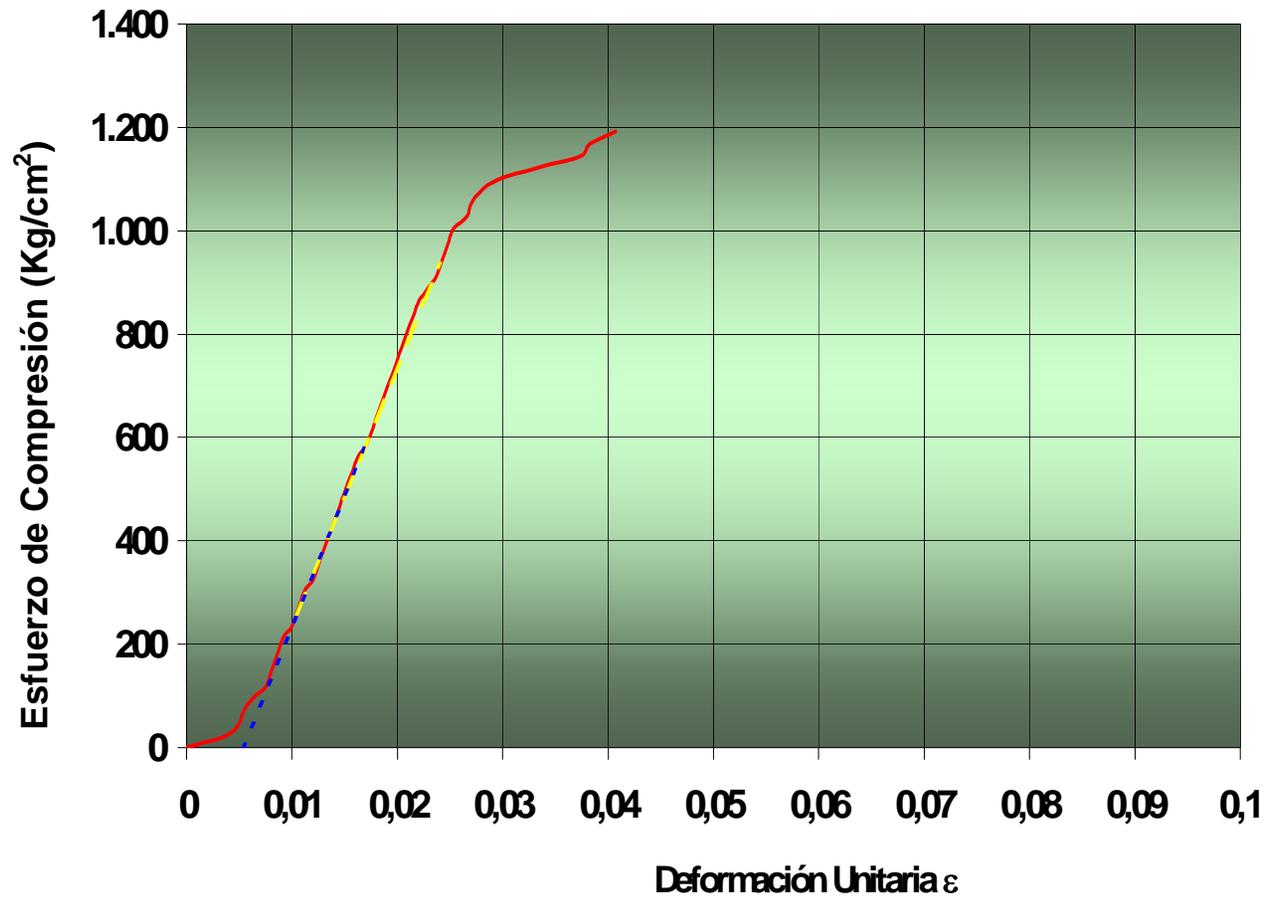


Fig. 46. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M9U9.2 y Fotografía de la fractura



- Esfuerzo vs Deformación
- - - Módulo de Young Tangente
- · · Módulo de Young Secante



Fig. 47. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra M16U9 y Fotografía de la fractura

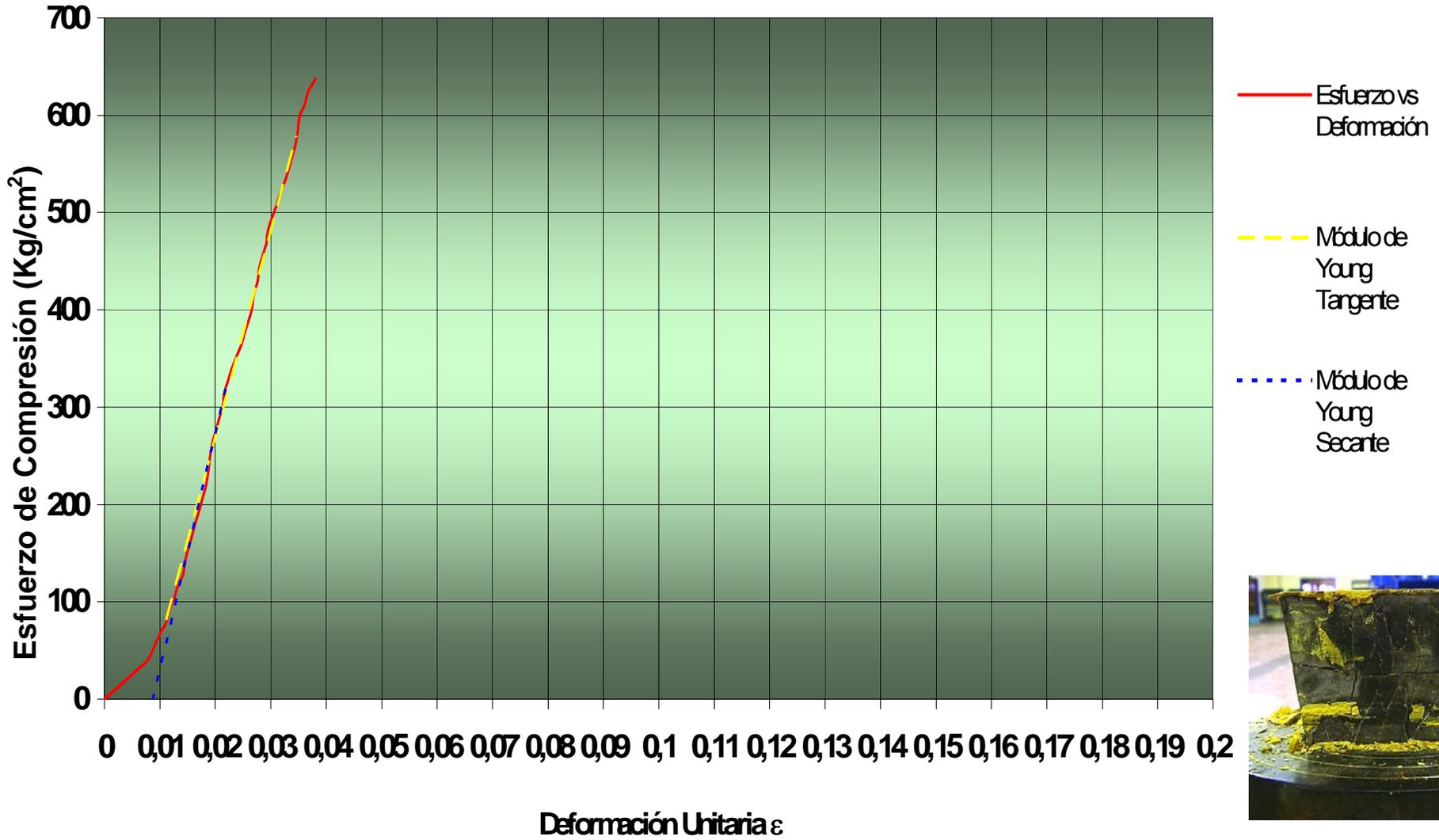


Fig. 48. Gráfico Esfuerzo-Deformación Muestra MEU7 y Fotografía de la fractura

### 3. Ensayo de Rebote con Martillo de Schmidt

Se realizó el Rebote de Schmidt en 10 muestras por litología, este valor, es recogido en las tablas mostradas en el [Anexo G](#), (G.3 y G.4), siguiendo el procedimiento reseñado en el Capítulo V.

Debido a que el Martillo de que se dispone en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la UCV es de tipo M, y para rocas se recomienda el de tipo L, debe realizarse una conversión, mediante una gráfica, obteniendo como resultado el valor esperado.

Este gráfico se muestra en el [Anexo E](#), Figura E.1, donde también se muestra la ecuación equivalente. Se ubica el valor de la lectura obtenida en el eje horizontal, y se lleva hasta la recta con ecuación  $R(L)=1.1141 \cdot R(M)+3.964$ , en el eje vertical, se obtiene el valor del rebote para un martillo Tipo L.

El procesamiento de los datos se puede demostrar utilizando, por ejemplo la muestra M6U9, de la cual se tomaron 10 rebotes y luego de eliminar el 50% menor de datos, se obtuvo un valor promedio de 25.40. La corrección correspondiente, da como resultado 32.26.

Complementando estos datos con la densidad de la roca caliza ( $\approx 2.56 \text{g/cm}^3$ ), puede determinarse la Resistencia a la Compresión Simple, utilizando el gráfico de correlación ([Anexo E](#), Figura E.2). Para esto, se ubica el valor del Rebote en la escala Horizontal, y se intercepta con la línea inclinada correspondiente al valor de densidad,

en este punto de corte, se prolonga una recta horizontal hacia el eje vertical izquierdo, obteniendo finalmente el valor de la Resistencia a la Compresión Simple, que para la muestra ejemplo (M6U9), es de 51 MPa.

Los resultados de este ensayo, se muestran en la Tabla 7.

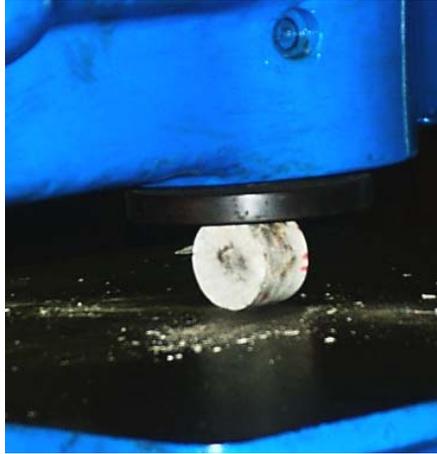
MUESTRA	LITOLOGIA	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	Co (MPa)	Co (kg/cm <sup>2</sup> )
M6U9	Caliza gris, dura, masiva con fragmentos fósiles. Grietas rellenas de calcita	2,56	55	550
M8U9	Caliza gris, oscura, dura, masiva con granos de cuarzo. Bioperturbada.	2,56	70	700
M6U9P48	Caliza Azulosa masiva	2,56	70	700
M9U9.2	Caliza gris, oscura, masiva con grietas de calcita	2,56	70	700
M7U9	Caliza gris, dura, masiva	2,56	110	1100
M9U9P48B	Caliza gris dura	2,56	46	460
M1U7	Caliza gris, dura masiva	2,65	55	550
M1U7	Caliza gris, dura, masiva. Cristales de calcita	2,65	84	840
MLU7	Caliza gris, dura, masiva. Cristales de calcita	2,65	60	600
MEU7	Caliza gris, dura, masiva. Cristales de calcita	2,65	80	800
M10U4P51.3	Intercalación de micrita carbonosa con grietas rellenas de calcita	2,61	70	700
M9U4P50	Micrita gris en capa intercalada con limolita calcárea	2,61	90	900
M6U4P50	Caliza gris con estratificación plana paralela discontinua	2,61	57	570
M12U4P50	Caliza gris con venas de calcita	2,6	57	570
M8U4P51	Micrita negra con estratificación plana paralela continúa	2,61	84	840
M11U4P50	Micrita negra densa	2,61	41	410
M4U4.3	Caliza gris con grietas rellenas de calcita	2,61	50	500
M4U4.1	Caliza gris con grietas rellenas de calcita	2,61	41	410
M7U4P51	Micrita negra con vetas de calcita	2,61	56	560
M5U4P51	Micrita negra con venas de calcita	2,61	55	550

**Tabla 7. Resultados Ensayo de Rebote de Schmidt**

#### 4. Ensayo de Tracción Indirecta

Se realizó este ensayo a 11 muestras de la Unidad 4 y 16 muestras de la Unidad 9. Este ensayo se realizó en dos equipos diferentes, inicialmente se utilizó el equipo de carga puntual en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la UCV, y luego se finalizaron los ensayos en una prensa Hidráulica perteneciente al Instituto de Materiales y Modelos Estructurales de la UCV.

El equipo utilizado en el IMME, cuenta con dos planchas (donde se aplica la carga), que permitirían la ubicación de la muestra (periferia) totalmente en contacto con estas y distribuida uniformemente, como se sugiere en la norma correspondiente (Cap V, ítem 3.4, Procedimiento), y puede apreciarse en la Figura 49.



**Fig. 49. Ubicación de Muestra para Ensayo de Tracción Indirecta. Prensa Hidráulica perteneciente al IMME-UCV**

Los resultados obtenidos, se procesaron según la expresión [26] del Cap. V, (Cálculos). Se presenta a continuación un cálculo Tipo de la Resistencia a la Tracción Indirecta. Tomando como Muestra, M10U9P48A

$$P = 9300 \text{ NW}$$

$$D = 63 \text{ mm}$$

$$T = 43.20 \text{ mm}$$

$$T_0 = 0.636 * \left( \frac{9300 \text{ Nw}}{63 \text{ mm} * 43.20 \text{ mm}} \right) = 2.173 \text{ Nw/mm}^2 = 22.16 \text{ kg/cm}^2$$

P es la carga de falla en (N), D es el diámetro del disco de roca en (mm) y t su espesor en (mm).

Los resultados de este ensayo, se muestran en la tabla 8.

## **5. Ensayo de Corte Directo.**

Se realizó el ensayo de Corte directo a través de discontinuidades en Roca, a fin de determinar los parámetros de fricción y cohesión, en el macizo rocoso. Estos ensayos fueron hechos en muestras de Roca, en su mayoría Diaclasadas, pertenecientes a la zona de estudio. Estas muestras fueron obtenidas tanto por núcleos provenientes de perforaciones, como por muestras de mano en zonas con presencia de diaclasas.

Se realizó primero, la medición del perfil de rugosidad de cada una de las superficies de discontinuidad a ensayar, así como el cálculo aproximado de su área. Los Resultados de este ensayo se pueden ver en los gráficos correspondientes (Ver Figuras 50, 51, 52, 53, 54 y 55). Además de estos resultados, se presenta una representación del ensayo de Corte para las litologías a caracterizar en este trabajo, de donde se puede obtener la información correspondiente a la cohesión y al ángulo de fricción. (Ver Figuras 56 y 57)

UNIDAD	MUESTRA	DESCRIPCIÓN LITÓGICA	ESPESOR (mm)	DIAMETRO (mm)	P (N)	To (kg/cm <sup>2</sup> )
4	M7U4P51	Caliza micrítica con fragmentos fósiles retrabajados de bivalvos pequeños con estratificación plana paralela continua	49,60	63,20	19319	39,97
	M12U4P51	Caliza gris fosilífera con grietas rellenas de calcita. Fósiles de bivalvo y gasterópodos.	44,30	63,20	16200	37,53
	M10U4P51.1	Caliza gris con tonos rosáceos. Bioperturbada. Micrítica. Vetas de calcita.	35,00	63,00	18600	54,71
	M10U4P51.2	Caliza gris con tonos rosáceos. Bioperturbada. Micrítica. Vetas de calcita.	30,00	63,53	18900	64,31
	M10U4P51.3	Caliza gris con tonos rosáceos. Bioperturbada. Micrítica. Vetas de calcita.	29,50	63,20	17554	61,06
	M10U4P51.4	Caliza gris con tonos rosáceos. Bioperturbada. Micrítica. Vetas de calcita.	29,60	63,20	19319	66,98
	M6U4P50	Caliza micrítica gris oscura. Presencia de microfósiles. Presenta grieta rellena de calcita.	32,70	63,00	8700	27,39
9	M10U9P48A	Caliza gris dura	43,20	63,00	19200	45,75
	M10U9P48B	Caliza gris dura	45,28	63,00	19200	43,65
	M10U9P48C	Caliza gris dura	37,20	63,00	18600	51,47
	M4U9P48A	Caliza gris dura masiva	43,75	63,30	20100	47,07
	M5U9P48A	Caliza azulosa, masiva	41,90	63,10	21000	51,51
	M6U9P48.1	Caliza azulosa, masiva	36,20	63,20	19662	55,74
	M6U9P48.2	Caliza azulosa, masiva	42,50	63,50	25007	60,09
	M6U9P48.3	Caliza azulosa, masiva	33,75	63,00	20790	63,41
	M7U9P48A	Caliza azulosa, masiva	40,50	63,30	20400	51,61
	M7U9P48B	Caliza azulosa, masiva	41,20	63,30	20100	49,98
	M7U9P48D	Caliza azulosa, masiva	38,40	63,30	20100	53,63
	M8U9P48E	Caliza azulosa, masiva	38,40	63,60	15000	39,83
	M9U9P48A	Caliza gris Dura	43,75	63,30	21000	49,18
	M9U9P48B.1	Caliza gris Dura	30,10	63,20	16966	57,84
	M9U9P48B.2	Caliza gris Dura	33,00	63,00	18927	59,04

Tabla 8. Resultados Ensayo de Tracción Indirecta

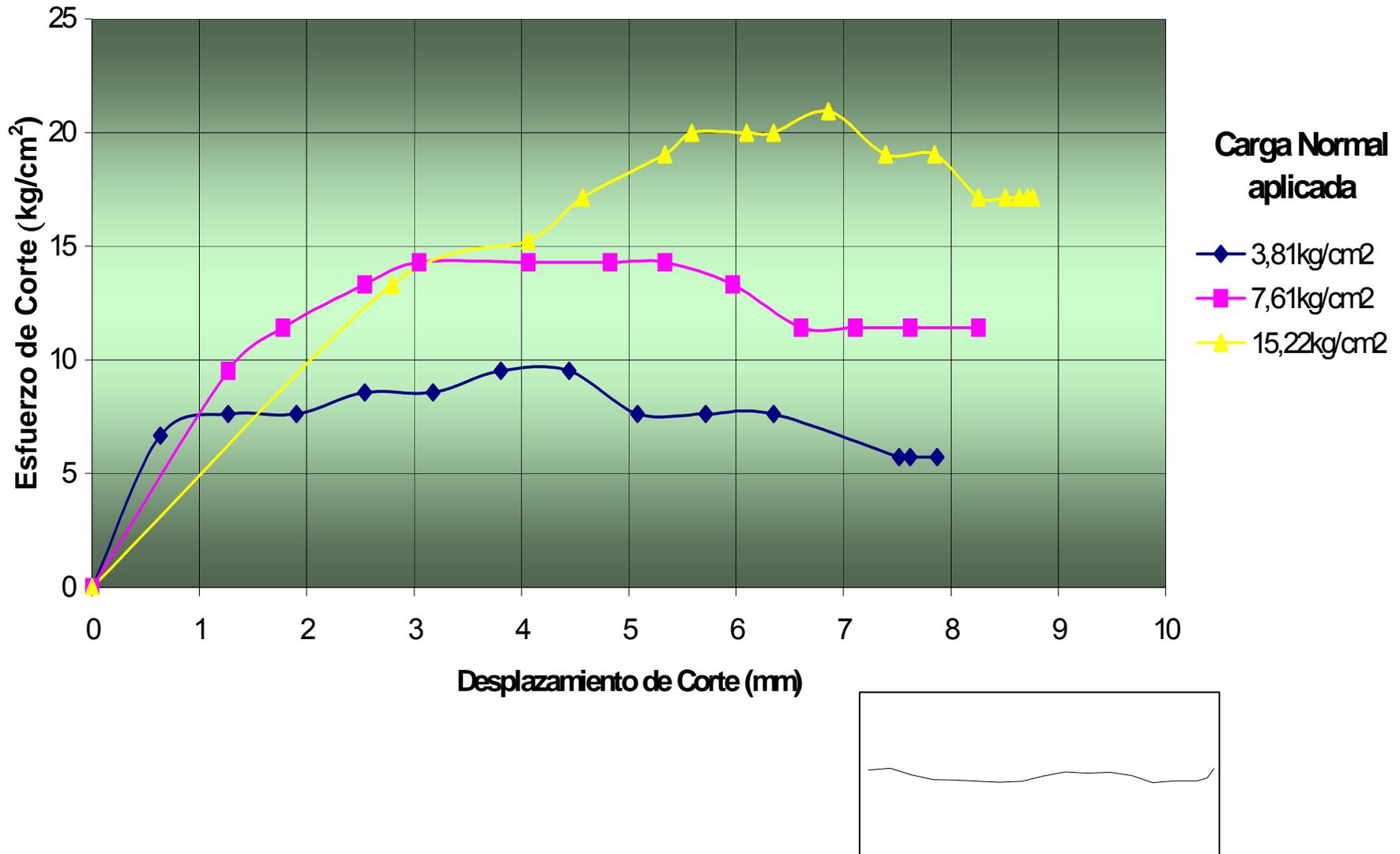


Fig. 50. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M1U9, y rugosidad

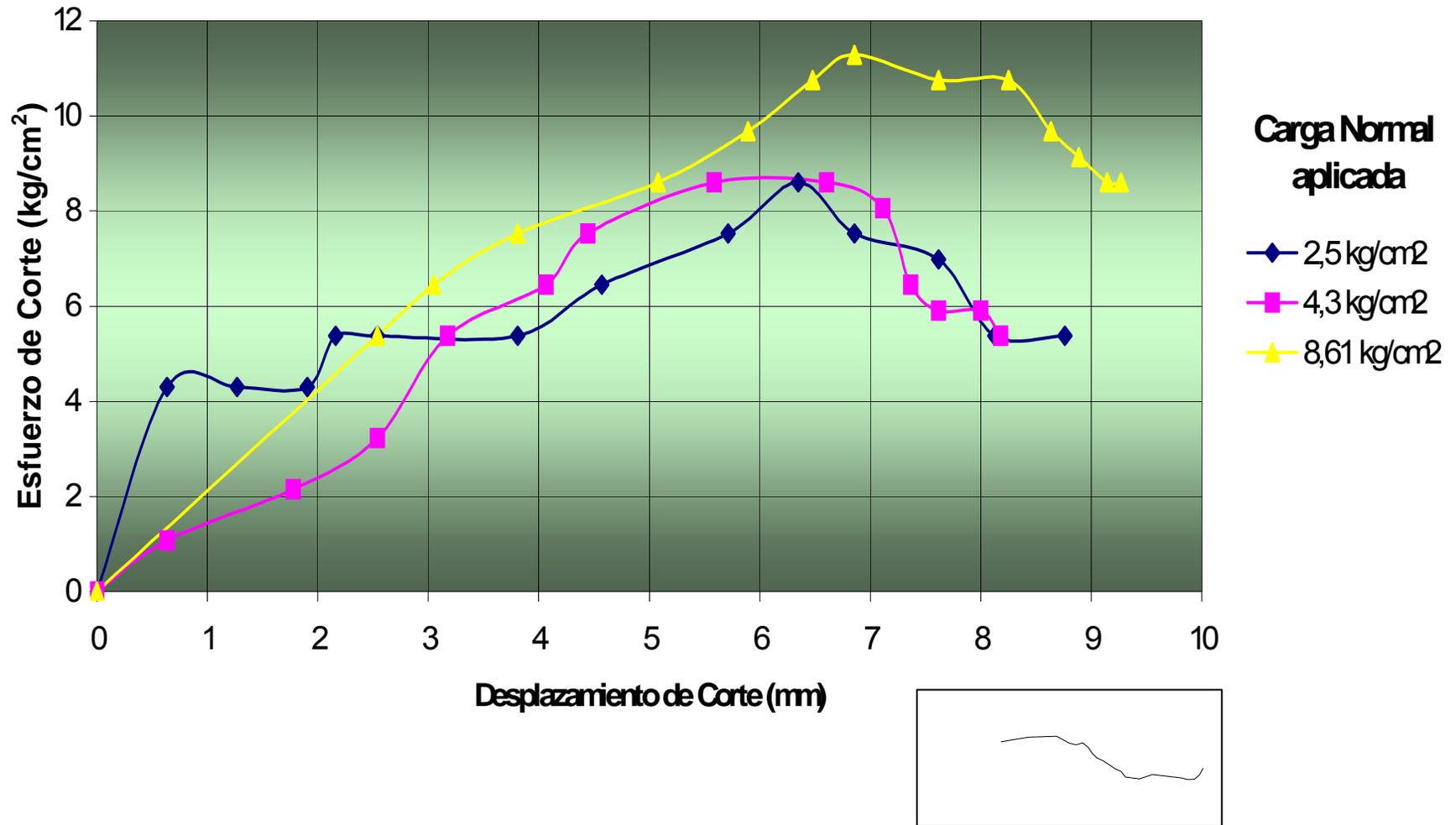


Fig. 51. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M3U9, y rugosidad

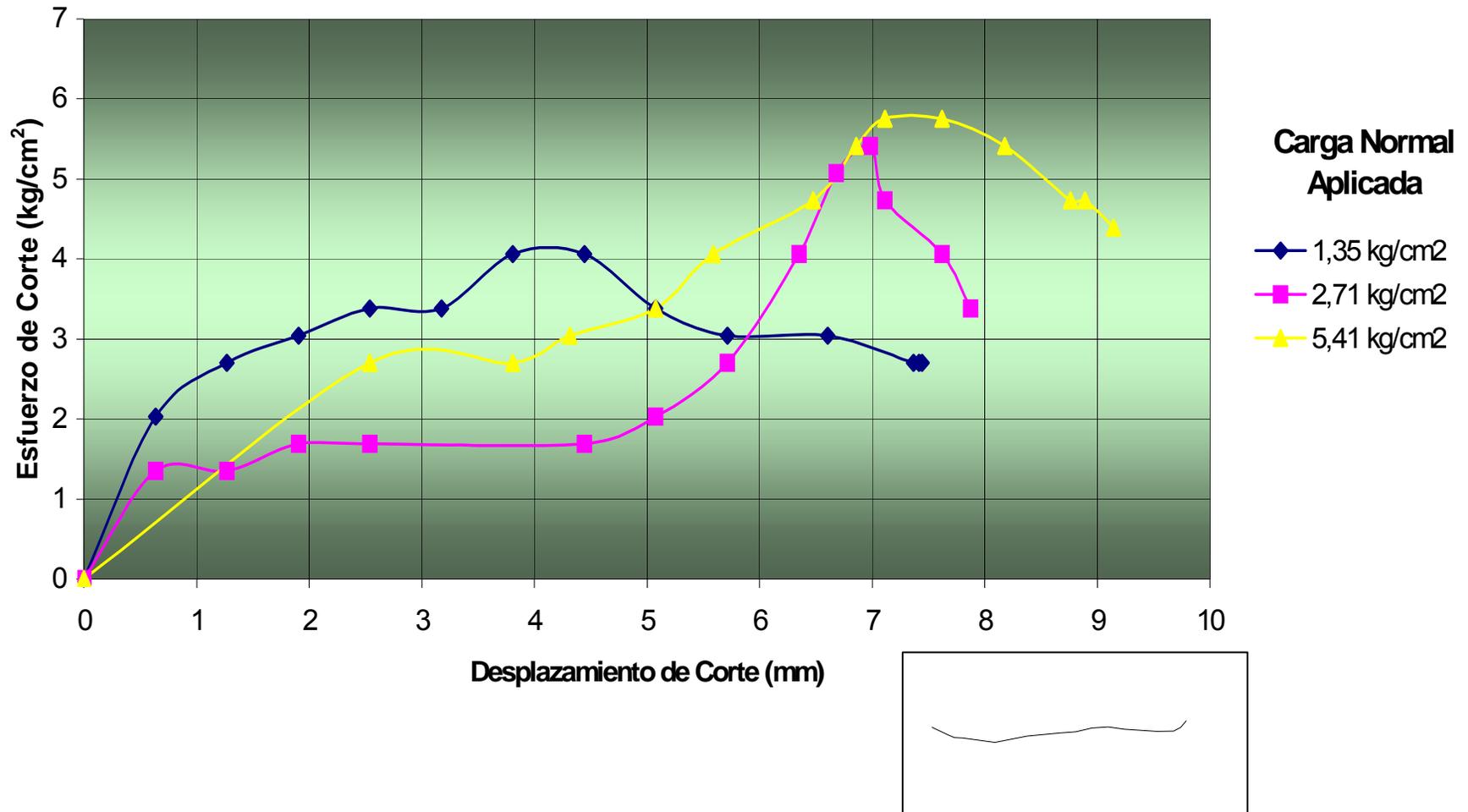


Fig. 52. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M3U9P48, y rugosidad

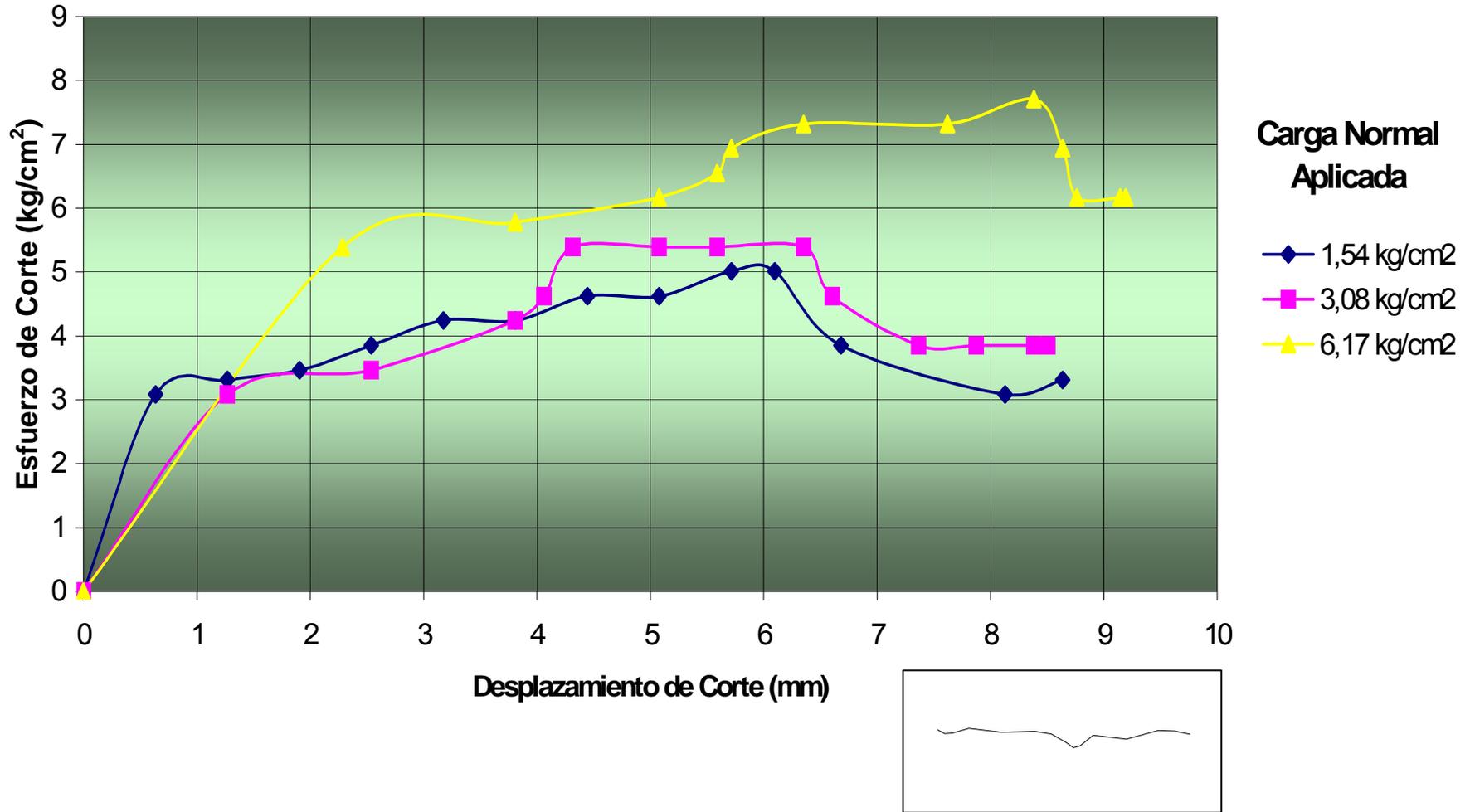


Fig. 53. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M2U4, y rugosidad

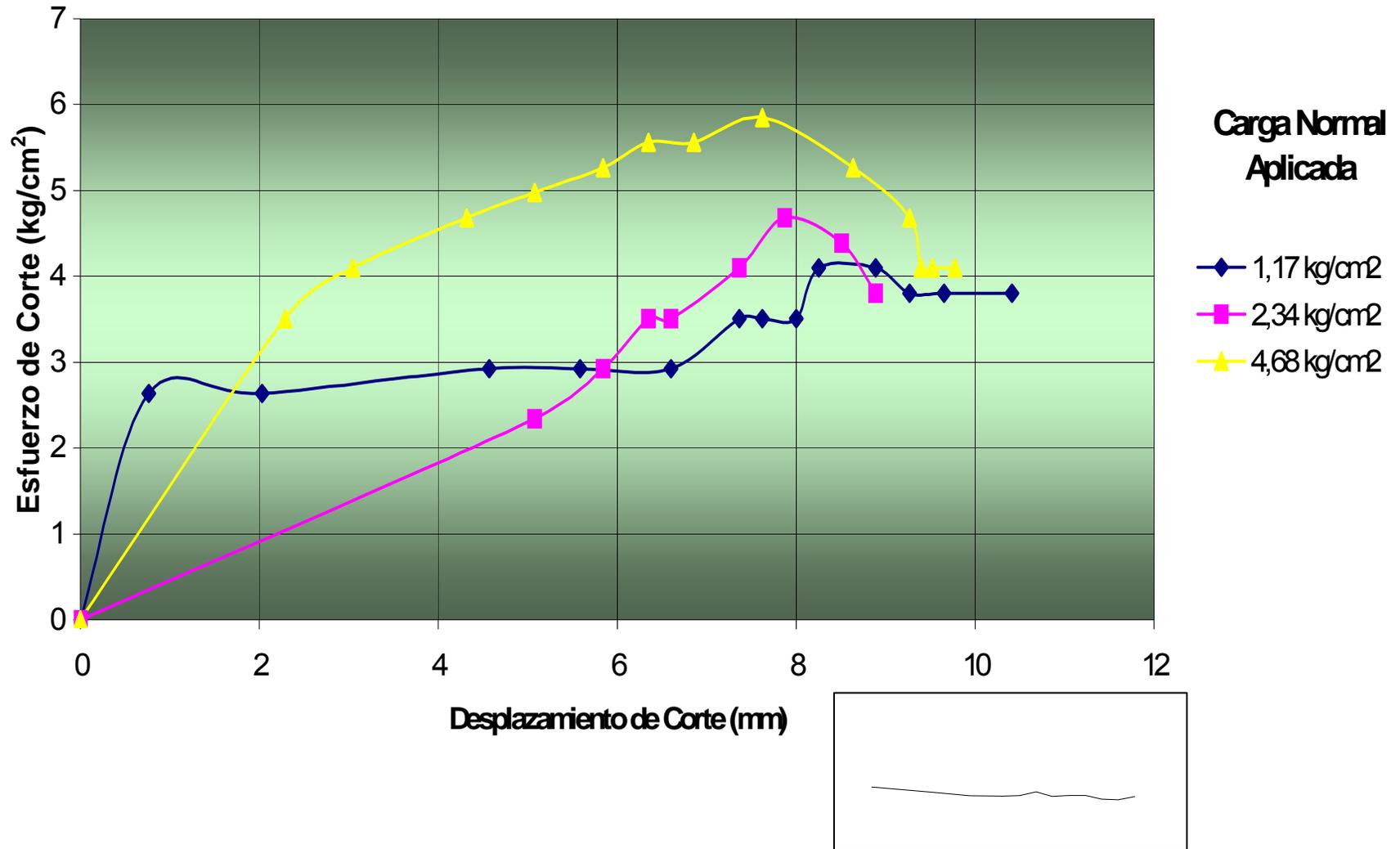


Fig. 54. Resultado de Ensaio de Corte Direto para muestra M7U4P50, y rugosidad

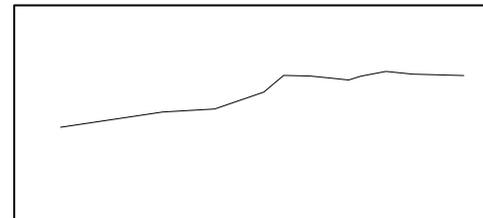
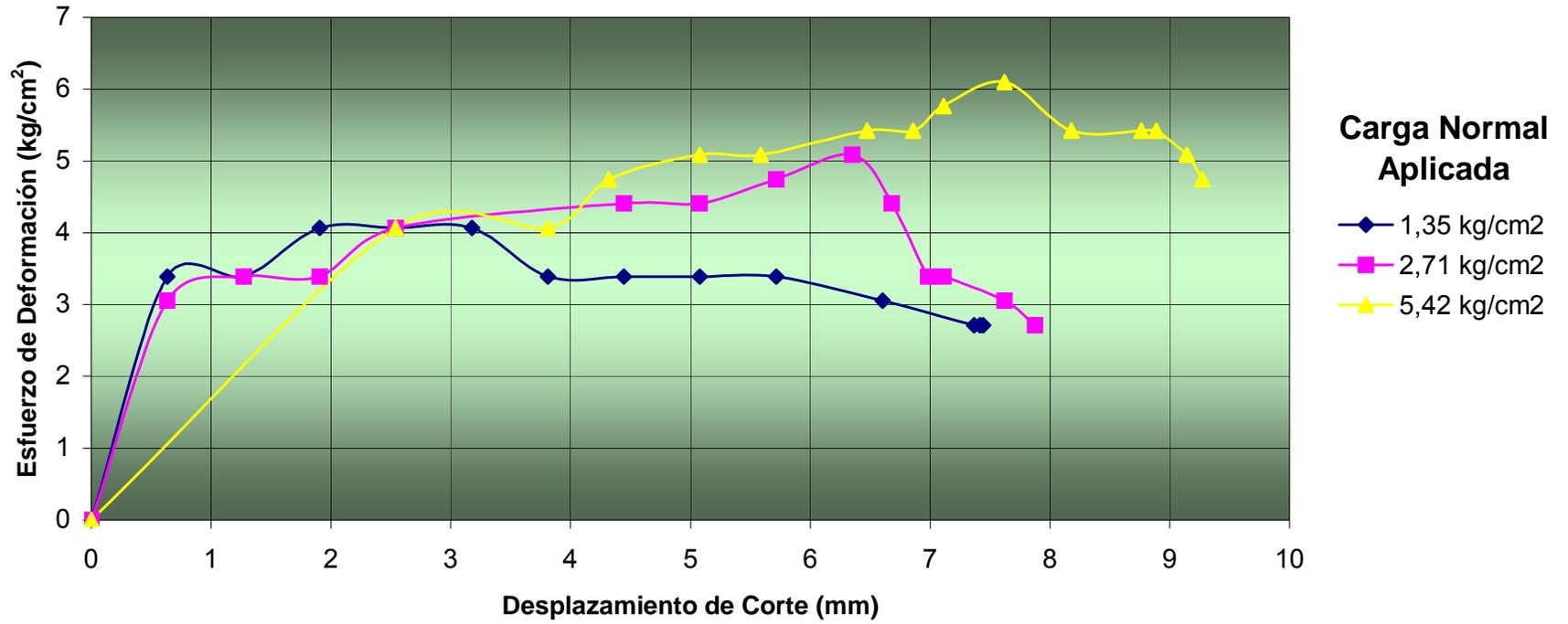


Fig. 55. Resultado de Ensayo de Corte Directo para muestra M6U4P51, y rugosidad

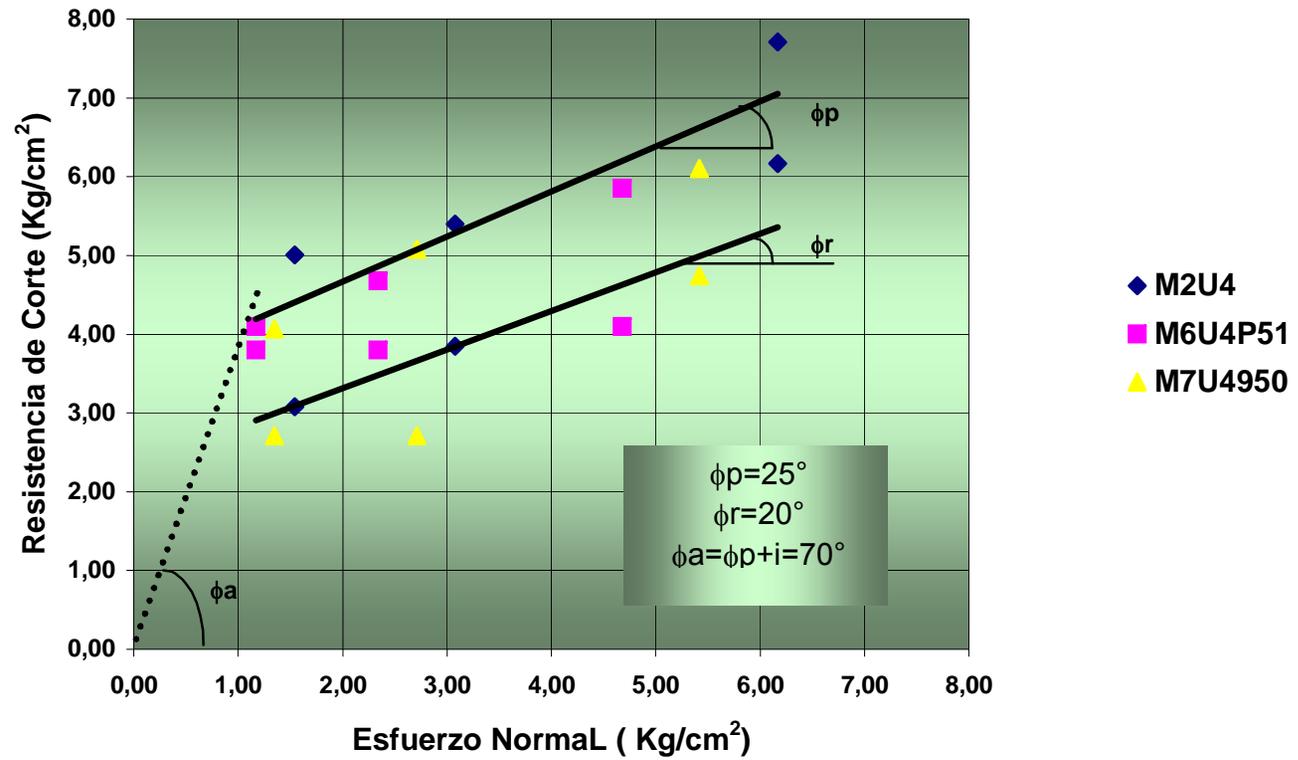


Fig. 56. Representación del ensayo de Corte Directo para varios ensayos realizados a través de planos de discontinuidad de la Unidad 4

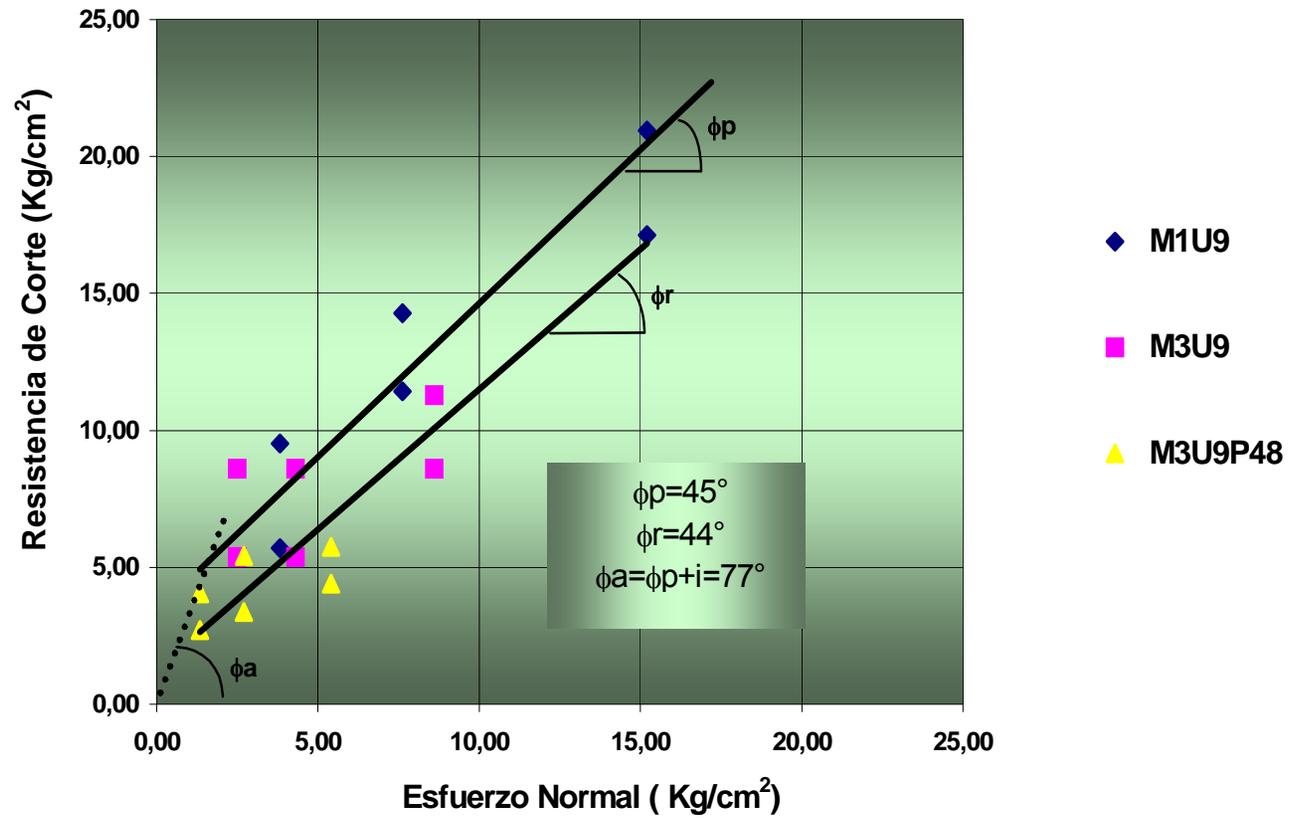


Fig. 57. Representación del ensayo de Corte Directo para varios ensayos realizados a través de planos de discontinuidad de las Unidades 7 y 9

## 6. Determinación de la Densidad

La densidad fue determinada según las pautas establecidas en el Cap. V, (Método de Ensayo para Determinar la Densidad (Peso Específico) de Muestras de Roca y de estériles. Se dividieron las muestras por grupos, debido a que algunas de estas requerían del uso de Parafina, para poder determinar su densidad, y el proceso de cálculo varía un poco entre uno y otro tipo.

A continuación se presentan los resultados promedios obtenidos en cada litología (Unidades 4, 7 y 9) y en cada estéril (Unidades 3 y 8 e intercalaciones de Unidad 9). En el [Anexo G](#) (Tablas G.5., G.6. y G.7.), se muestran los resultados de densidad para cada muestra ensayada.

Vale la pena acotar que estas intercalaciones de estériles de la Unidad 9 (Capas B, D y F), se corresponden básicamente a areniscas de grano fino, y limolitas. (Ver CAP II. Geología Local).

En la Fig. 58 puede apreciarse un corte donde se notan, de arriba abajo las intercalaciones de arenisca en la Unidad 9.



**Fig. 58 Intercalación de estériles (Capas Oscuras) Unidad 9**

## 7. Resumen de Resultados

A continuación, se presenta un Cuadro Resumen (Tabla 9), con los resultados obtenidos en cada ensayo.

Litología Ensayo	UNIDAD 3	UNIDAD 4		UNIDAD 8	UNIDADES 7 Y 9		INTERCALACIONES DE ESTERILES (Unidad 9)		
		Lab. Minas	IMME		IMME	Lab. Minas	B	D	F
CARGA PUNTUAL (Is)	-	4.7 Mpa		-	4.8 MPa		-	-	-
CARGA PUNTUAL (Ia)	-	0.92		-	0.97		-	-	-
COMPRESIÓN UNIAXIAL	-	313.29±0.18 kg/cm <sup>2</sup>		-	716.93±0.12 kg/cm <sup>2</sup>	514.78±0.19 kg/cm <sup>2</sup>	-	-	-
TRACCIÓN INDIRECTA	-	47.57±0.19 kg/cm <sup>2</sup>	51.36±0.14 kg/cm <sup>2</sup>	-	59.23±0.05 kg/cm <sup>2</sup>	48.37±0.09 kg/cm <sup>2</sup>	-	-	-
MARTILLO DE SCHMIDT	-	601±0.14 kg/cm <sup>2</sup>		-	700±0.13 kg/cm <sup>2</sup>		-	-	-
RQD	-	63.15 %		-	72.8 %		-	-	-
CORTE DIRECTO (φ)		25°			45°				
DENSIDAD	2.44±0.09 g/cm <sup>3</sup>	2.62±0.04 g/cm <sup>3</sup>		2.51±0.04 g/cm <sup>3</sup>	2.65±0.03 g/cm <sup>3</sup>		2.47±0.068 g/cm <sup>3</sup>	2.49±0.09 g/cm <sup>3</sup>	2.40±0.17 g/cm <sup>3</sup>

Tabla 9. Resumen de Resultados Obtenidos

## CAPÍTULO VII

### Análisis de Resultados

Según los resultados obtenidos, relacionados con la Resistencia a la Compresión Simple, podemos hacer las siguientes deducciones.

Basándose en la Clasificación de Franklin, (Ver Tabla 3, Pág. 92), puede decirse que las rocas de la Unidad 4 son “Medianamente Resistente” y las de la Unidad 9, que engloba a la Unidad 7, por razones antes explicadas, “Muy Resistente (Roca Dura)”. Está claro, que esta clasificación, variará dependiendo de la condición de la roca, ya que si se analizan rocas muy meteorizadas, o Bioperturbadas, donde se puedan apreciar Unidades Estilolíticas, la Resistencia de la misma variará considerablemente, esto lo puede verse en las rocas de la Unidad 4 más cercanas al contacto con la Unidad 3, y hacia la base correspondiente a la Unidad 9, donde se observaron evidencias de ser Bioperturbadas. Es posible que estos elementos afecten la resistencia de la roca, ya que en el caso de las Unidades Estilolíticas o estilolitos pueden alinearse según plano, permitiendo la formación de superficies de presión-disolución de gran extensión. Estas superficies, frecuentemente se alinean paralelas a la estratificación, ya que se generan por la presión ejercida por los sedimentos supradyacentes. En conclusión se tendría una especie de estratificación adicional.

Cuando la roca está Bioperturbada, hay que tomar en cuenta el ambiente de depositación de esos sedimentos, ya que la roca, o sedimento, se vio perturbada por elementos naturales (insectos, corrientes, etc.); en estas muestras se encontraron

algunas evidencias de microfósiles y de la acción de corrientes en la roca caliza (en el momento de la depositación).

En los resultados obtenidos, puede verificarse lo anteriormente dicho, ya que aquellas muestras que contienen en su litología, evidencias de bioperturbación, o presencia de fósiles, presentan unos valores de Resistencia a la Compresión bajos, en relación los otros que no presentan esta evidencia.

Con relación a la Resistencia a la Tracción Indirecta, puede decirse que la Unidad 9, es la que presenta una mayor resistencia a la Tracción aunque son valores muy cercanos, (aproximadamente  $50 \text{ kg/cm}^2$  para la Unidad 4 y  $52 \text{ kg/cm}^2$  para la Unidad 9), esto, se debe, una vez más a lo masivo del material que compone a esta Unidad. La Unidad 4, es una litología afectada por muchos esfuerzos de Tensión-deformación, ya que prácticamente conforma los limbos del Sinclinal donde se



**Fig. 59. Frente de Excavación Unidad 4**

encuentra ubicado el Yacimiento (Ver Figuras 59 y 60)



**Fig. 60. Unidad 3. Sinclinal**

Los valores obtenidos, representan un 5-15 % del valor de Compresión sin Confinar obtenido para una misma litología.

Con respecto a la Resistencia al Corte en discontinuidades puede notarse en los gráficos de las figuras 57 y 58 (Págs. 160 y 161), que se obtuvo un ángulo de fricción Mayor en la Unidad 9 ( $55^\circ$  para la fricción pico y  $54^\circ$  para la residual), lo que corrobora que la estructura de la roca, es un factor importante que afecta en cierta manera la resistencia de la misma. Este valor está relacionado con la estructura interna de la roca y también por el tipo de diaclasa que se produce en el macizo correspondiente a esta Unidad. Como se puede observar en la Geología Regional, la Unidad 9, contiene un tipo de roca masivo y poco descompuesto, en algunos casos Bioperturbada y con presencia de fósiles en la mayoría de los casos, esto hace que se oponga una mayor resistencia al corte. Lo contrario sucede con la Unidad 4, que comprende formaciones de calizas micríticas grises oscuras a negras, duras, en capas de hasta 0.5 m, intercaladas con capas de limolita calcárea, arcillolita y lutita, con presencia de pirita y

carbón, al estar más descompuestas, su resistencia al corte va a ser menor, por lo tanto, también su ángulo de fricción, como se puede ver en la Fig. 57 (Pág. 160).

Al clasificar el macizo rocoso, según los diferentes criterios expuestos en el capítulo III, con los resultados obtenidos se tienen las siguientes consideraciones.

Según Salcedo, en su clasificación del tipo de Remoción (Ver Tabla B.1), se tiene que para la Unidad 9, la roca va del tipo I al II, es decir de Muy buena a Buena, presentándose Ligeramente Meteorizada con un espaciamiento de discontinuidad de 1 a 3 m, baja persistencia y con diaclasas ligeramente abiertas. Como se tienen valores de ambas columnas, se recomienda utilizar un tipo de remoción que combine perforación y voladura con escarificación, utilizando para esta última equipos de remoción dentro de un rango de 650-750 HP.

En el caso de la Unidad 4, se tiene una roca, igual que la anterior de Buena a Muy Buena, pero por la observación realizada en campo, a pesar de tener un valor de compresión dentro del rango de Clase I, la tendencia es a Clase II, tomando en cuenta también los niveles de meteorización y fracturamiento que se presentan en el macizo. Incluso la tendencia, se acerca más al Tipo III, regular, donde no es necesario el uso de explosivos, y el tipo de remoción es Escarificación Difícil, utilizando equipos de 410 a 450 HP.

En las figuras 61,62 y 63, se puede apreciar detalles de las Unidades de estudio, en donde los elementos antes expuestos, quedan justificados por la fotografía.



**Fig. 61. Detalle Unidad 9**



**Fig. 62. Detalle Unidad 7**



**Fig. 63 Detalle Unidad 4**

De acuerdo con la clasificación del RQD (Rock Quality Designation), presentada en la tabla 1, el macizo rocoso es de calidad REGULAR (RQD = 50 a 75%), según los resultados obtenidos para ambas litologías, en las perforaciones realizadas (Ver [Anexo E](#)). Sin embargo, puede notarse que en una misma litología (Pozos Unidad 4), existen valores de RQD que indican, que el macizo en sí en la Unidad 4 no es Homogéneo. El pozo 51, presenta una clasificación Regular, al igual que el pozo 50, pero este último presenta un valor menor. A su vez, en promedio, la Unidad 9, tiene un mayor valor de RQD, indicando que esta zona tiene un material más masivo que la Unidad 4 como tal.

Teniendo ya, la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, se procede a determinar el Índice de Resistencia Geológica (GSI), el cuál aparece reseñado en la tabla C3, del [Anexo C](#). Según esta tabla, se tienen los siguientes valores por Unidad de estudio.

Para la Unidad 4, se tiene que la Estructura se corresponde a la casilla MUY FRACTURADA (Ver Fig. 63), con una Condición de la Superficie del Tipo MEDIA, la intersección de estas dos casillas, da como resultado un valor de GSI ubicado dentro del rango de 40 a 50.

En cuanto a la Unidades 7 y 9, la Estructura correspondiente es FRACTURADA (Ver Fig. 61 y 62), y la Condición de Superficie corresponde a la casilla BUENA, ya que las observaciones de campo así lo definen. El valor de GSI, correspondiente está dentro del rango de 65-70.

Con los datos de RQD, y observaciones en campo de los macizos de estudio, puede determinarse el RMR de Bieniawski (Rock Mass Rating). Para esto se utiliza la tabla C.1 del [Anexo C](#), donde se muestran los diferentes parámetros de clasificación.

Para la Unidad 4, se tomaron, además de los valores provenientes de los ensayos, datos en campo en cuanto a las condiciones de diaclasas, teniendo estas como características principales una separación dentro de un rango de 0.1 a 0.2 m, una Persistencia < 1 m, Abertura > 5 mm, Paredes de la discontinuidad Ligeramente rugosas, con un relleno Blando > 5 mm y Moderadamente Meteorizada, además de la no presencia de agua freática.

Con la corrección correspondiente, se obtiene que RMR= 47, lo que da como resultado una roca de Calidad Media, verificándose, en esta misma tabla, el ángulo de fricción correspondiente de 25° a 35°, como puede verificarse en el gráfico de la figura 57 (Pág. 160)

En el caso de las Unidades 7 y 9, los valores para su clasificación son: separación entre diaclasas dentro de un rango de 0.3 a 0.8 m, una Persistencia < 1 m, Abertura > 5 mm, Paredes de la discontinuidad rugosas, con un relleno Duro > 5 mm y Ligeramente Meteorizada, además de la no presencia de agua freática.

Con la corrección correspondiente, se obtiene que RMR= 63, lo que da como resultado una roca de Calidad Buena, verificándose, en esta misma tabla, el ángulo de fricción correspondiente de 35° a 45°, como puede verificarse en el gráfico de la figura 58.

Los resultados promedio de los ensayos de carga puntual, mostraron valores uniformes del  $I_{s(50)}$ , independientes de la unidad ensayada (4.69 Mpa, para la Unidad 4, y 4.77 Mpa, para la Unidad 9). En este sentido se considera que los valores de la unidad 9, pueden estar afectados por la presencia de fósiles y bioperturbaciones. En este sentido, no se consideró conveniente relacionar los valores del  $I_{s(50)}$ , con la resistencia a la compresión sin confinar ( Ecuación 15).

Los valores del índice de anisotropía (  $I_a$  ), son cercanos a la Unidad, (0.92 para la Unidad 4, y 0.97 para la Unidad 9) indicando que las rocas estudiadas presentan un comportamiento isotrópico.

En referencia a los resultados del cálculo de la densidad de las unidades de estudio y los estériles correspondientes, se puede decir que por ser ambas litologías rocas calizas se esperaba una coincidencia en los resultados de ambas, en efecto, como se observa en el capítulo VI Resultados, tabla 9, se evidencia este efecto, aunque la unidad 9 tiene una mayor densidad, debido a las características estructurales de la roca, que difieren notablemente de las de la Unidad 4.

En cuanto a los estériles, las densidades varían si se comparan con las de la roca caliza, ya que en estos, dependiendo de la litología donde se ubiquen, tenemos diversos elementos de composición, desde pirita y carbón, hasta arenisca y arcillas. La mayor densidad en este caso, la tiene la Unidad 8, debido a su estructura, una arenisca, que se describe en el capítulo II Geología Local. La Unidad 3 con una meteorización alta, colinda con la unidad 4, ya que es el centro del Sinclinal, contiene

varios componentes que afectan la composición de la Caliza, siendo esta la de menor densidad.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1. CONCLUSIONES

Luego de realizado el Análisis correspondiente a los resultados obtenidos, en la Caracterización Geomecánica del Yacimiento de Estudio, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Las Unidades que se estudian en este trabajo, tienen diferente comportamiento, ya que se evidencia según los resultados obtenidos, la no Homogeneidad del Yacimiento, inclusive dentro de una misma litología.
2. Se corroboró la mediante las características geomecánicas de los macizos Rocosos, la semejanza entre las Unidades 7 y 9, las cuales se consideraron, durante todo el trabajo como una sola Unidad.
3. Las rocas de la Unidad 9 pueden clasificarse, según los resultados obtenidos, de la siguiente manera: Calidad BUENA, según Bieniawski, MUY RESISTENTES, según Franklin y de calidad REGULAR según el % de RQD. La Unidad 4 se presenta según Bieniawski, con una calidad REGULAR, MEDIANAMENTE RESISTENTE, según Franklin y REGULAR, según la clasificación del RQD. De esto se desprende que en general la unidad geomecánicamente más competente es la 9 y la 7.

4. Según la clasificación propuesta por Salcedo para predecir el tipo de remoción, se llega a la conclusión de que en ambos casos es necesario el uso de escarificación combinados, tanto por voladura como por escarificación, variando la roca de la Unidad 9 de Muy Buena a Buena, y la Unidad 4 de Buena a Regular
5. La resistencia a la Tracción, para este tipo de roca, corresponde entre 5 y un 15 % del valor de su resistencia a la Compresión Simple.
6. La forma de depositación y tectónica de los sedimentos influye directamente en la resistencia de la roca. Esto se observó durante todos los ensayos, especialmente en los ensayos de carga puntual. Según los resultados de  $I_{s(50)}$  obtenidos en este trabajo, la presencia de fósiles, hace inconveniente el uso del ensayo carga puntual, para estimar la resistencia a Compresión Uniaxial de estos materiales.
7. Conociendo con la realización de este trabajo de investigación, todos los parámetros involucrados en la Caracterización Geomecánica de Macizos Rocosos, puede decirse que al momento de clasificar, existen muchos parámetros relacionados con diferentes elementos de Caracterización. Por esto es conveniente utilizar más de un Criterio de clasificación.

## **2. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda complementar la clasificación del tipo de remoción, mediante la realización de mediciones de la Velocidad de propagación de la Onda Sísmica en

los macizos rocosos de interés presentes en el yacimiento. Esto contribuiría a optimizar los procesos de extracción y consiguiente producción.

2. Se recomienda verificar el rendimiento de los equipos de escarificación y el uso de explosivos a partir de los resultados Geomecánicos de las litologías.
3. Es recomendable aumentar el alcance de este trabajo a otras Unidades litológicas de interés para la explotación del Yacimiento, a fin de tener una concepción global del comportamiento Geomecánico del mismo en toda su extensión. Igualmente deben extrapolarse los datos obtenidos a otros procesos, por ejemplo Producción, ya que de esta forma, conociendo el comportamiento mecánico del material, podrán diseñarse, si así se requieren, los elementos de beneficio mineral que se adapten a las condiciones de la Cantera.
4. Se recomienda la realización de un estudio posterior, dirigido a corroborar la relación entre el índice de Carga Puntual y la Resistencia a la Compresión sin Confinar, para los materiales del yacimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- BROWN, E. (1981). **Rock characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods**. Published for the Commission on Testing Methods International Society for Rocks Mechanics. Pergamon Press. Great Britain. Pp.
- CASTILLEJO, M. (1993). **Análisis comparativo de los Métodos de Estabilidad de Taludes y su control**. Trabajo de Ascenso, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- CATTERPILAR (1992). **Manual de Rendimiento**. Ed. 23. Illinois E.U.A. Pp. 600
- Cementia Engineering and Consulting Ltd (1977). **Informe 5977**. Corporación de Cemento Andino S.A., Trujillo, Pp 120
- Comité Conjunto del Concreto Armado (1976). **Ensayos de Laboratorio y Especificaciones**. 3era Edición Caracas Venezuela. Pp. 118 a 123
- DAC MINING (1995) **Introduction to Industrial Minerals**. Chapman &Hall. Inglaterra. Pp 276
- DE MARCO, Pietro. (1990). **Exploración y Caracterización de Rocas Discontinuas Mediante el Uso de Técnicas Adecuadas de Perforación**. Ponencia presentada en: Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas
- DE MARCO, Pietro. (1995). **Determinación de la resistencia mecánica de las rocas mediante ensayos de laboratorio**. Trabajo de Ascenso, Universidad Central de Venezuela, Caracas. Pp 37
- FONSECA, A (2000). **Informe según plan de entrenamiento en el área de cantera durante los días 12/6 al 16/6**. Corporación de Cemento Andino S.A., Trujillo, Pp 30
- GONZÁLEZ DE JUANA, C (1980). **Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas**. Tomo I. FONINVES. Caracas. Pp 405
- GUTIERREZ, A (1999). **Geología en predios y zonas aledañas a la Corporación de Cemento Andino C.A.** Barranquilla, Colombia Pp 12
- HOEK, E (2000) **Rock Engineering**. [Libro en línea]. Disponible: <http://www.rocksciense.com/> [Consulta: 2001, Junio]
- Ingeniería Caura, S.A.: (2000). Evaluación Ambiental Específica Corporación de Cemento Andino, C.A. Zulia, Venezuela, Pp. 300
- Instituto Tecnológico Geominero de España (1987). **Manual del Ingeniero de taludes**. 1ra ed. Madrid, España. Pp. 456

- Instituto Tecnológico Geominero de España (1991). **Mecánica de Rocas aplicada a la minería metálica subterránea**. 1ra ed. Madrid, España. Pp. 334
- PERRY, Gianfranco (1980). **Apuntes para el curso de Mecánica de Rocas**. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Pp.51
- PETRÓLEOS DE VENEZUELA-INTEVEP, (1997). **Léxico Estratigráfico**. [Libro en línea]. Disponible: <http://www.pdv.com/lexico/>. [Consulta: 2000, Noviembre]
- PETRÓLEOS DE VENEZUELA-INTEVEP (1997). **Minerales de Venezuela**. [Libro en línea]. Disponible: <http://www.pdv.com/lexico/museo/minerales/minerales.htm>. [Consulta: 2000, Noviembre]
- PINO DE MARCHENA, S et all (1999). **Plan Minero 1999**. Corporación de Cemento Andino C.A., Trujillo. Pp 32
- RODRÍGUEZ, S. (1986). **Recursos Minerales de Venezuela**. Boletín del Ministerio de Energía y Minas. Caracas, Pp 215
- SALCEDO, D. (1988). **Clasificación para predecir el Tipo de Remoción en Banqueos y Excavaciones para Obras viales**. Sociedad Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones. Boletín 56
- TIMOSHENKO, S (1949). **Elements of strength of materials**. 3ra Ed. New York, Pp 420
- TRUZMAN; M (2000). **Determinación del Índice de Resistencia Geológica (GSI) en Rocas Metamórficas de la Cordillera de la Costa de Venezuela**. Sociedad Venezolana de Geotecnia. Boletín 78
- UCAR, R (sin fecha). **Proyecto de Explotación (1991-1996)**. Corporación de Cemento Andino S.A. , Trujillo. Pp 110

**Anexo A: MAPA GEOLÓGICO**

## Anexo B: CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE REMOCION

### CASOS DE REMOCIÓN (SALCEDO, 1988)

...Los casos de remoción que se presentan anexos a la clasificación propuesta, consideran los siguientes casos:

■ CASO 1: Dirección de avance de la excavación paralela al rumbo de la discontinuidad y con ángulos de buzamiento entre  $20^\circ$  y  $70^\circ$  en el mismo sentido del talud. Esta condición se considera ligeramente desfavorable y se le asigna un valor de 10.

■ CASO 2: Dirección de avance de la excavación paralela al rumbo de la discontinuidad y con ángulos de buzamiento entre  $20^\circ$  y  $70^\circ$ , contrarios al frente de excavación. Este caso se considera desfavorable y se le asignan 13 puntos.

■ CASO 3: Dirección de avance paralela al rumbo de discontinuidad subvertical ( $70^\circ$ - $90^\circ$  en ambos sentidos). Condición muy desfavorable y un valor asignado máximo de 15

■ CASO 4: Dirección de avance de la excavación perpendicular al rumbo de la discontinuidad y en el mismo sentido del buzamiento. Tiene dos posibilidades: a. Buzamientos entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ , condición considerada muy favorable, asignándosele 3 puntos y b. Buzamientos entre  $45^\circ$  y  $70^\circ$  condición favorable y un valor asignado de 5

■ CASO 5: Dirección de avance de la excavación perpendicular al rumbo de la discontinuidad y en el mismo sentido del buzamiento con ángulos altos entre 70° y 90°. Condición ligeramente desfavorable y 10 puntos

■ CASO 6: Dirección de avance de la excavación oblicua al rumbo de la discontinuidad con buzamiento entre 20° y 70° hacia el talud. Condición ligeramente desfavorable, 10 puntos.

■ CASO 7: Dirección de avance de la excavación oblicua al rumbo de la discontinuidad con buzamiento entre 20° y 70° contrarios al frente del talud de corte. Condición desfavorable, 13 puntos.

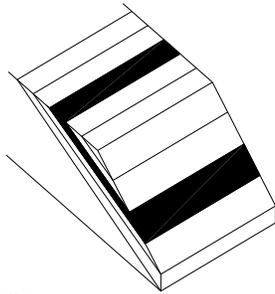
■ CASO 8: Dirección de avance de la excavación oblicua al rumbo de la discontinuidad con buzamiento entre 70° y 90° en cualquier sentido. Condición desfavorable, 13 puntos.

■ CASO 9; La discontinuidad es sensiblemente horizontal (0° a 20°). En este caso, se ha determinado que para el uso y penetración del escarificador tiene además mucha importancia, el espesor o espaciamiento de la discontinuidad. El termino “espesor” se utiliza para estratificación en rocas sedimentarias, e intervalos foliados en el caso de rocas metamórficas; el término “espaciamiento” se utiliza si la discontinuidad es una diaclasa. Se contemplan dos casos:

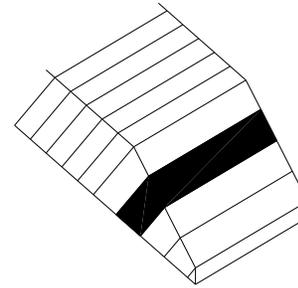
Espesores o espaciamientos mayores de 0.35 m

Espesores o espaciamientos menores de 0.35 m

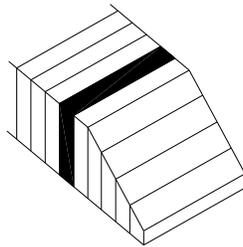
El primer caso se considera muy desfavorable y se le asignan 15 puntos, y el segundo caso se clasifica como desfavorable con 13 puntos... (SALCEDO, 1988)



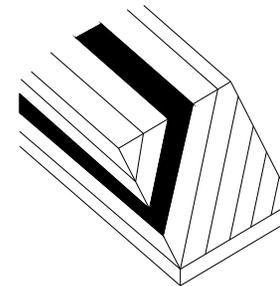
CASO 1  
 DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN: Paralela al rumbo de discontinuidad  
 BUZAMIENTO 20°-70°      CLASIFICACIÓN Ligeramente desfavorable      VALOR 10



CASO 2  
 DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN: Paralela al rumbo de discontinuidad  
 BUZAMIENTO 20°-70°      CLASIFICACIÓN Desfavorable      VALOR 13

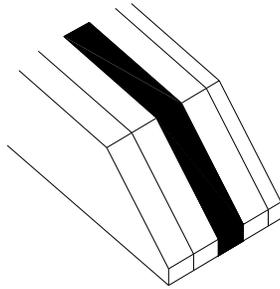


CASO 3  
 DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN: Paralela al rumbo de discontinuidad  
 BUZAMIENTO 70°-90°      CLASIFICACIÓN Muy desfavorable      VALOR 15

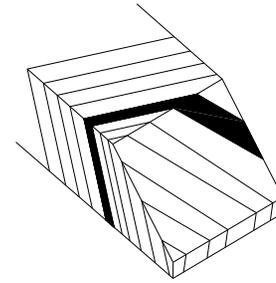


CASO 4  
 DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN: Perpendicular al rumbo de discontinuidad  
 BUZAMIENTO 20°-45°      CLASIFICACIÓN Muy favorable      VALOR 3  
 45°-70°      Favorable      5

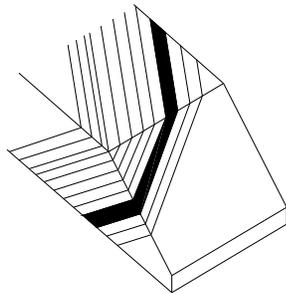
**Fig. B.1 Casos de Remoción 1, 2, 3 y 4 (Fuente: SALCEDO, 1988)**



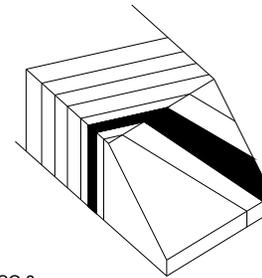
CASO 5  
 DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN: Perpendicular al rumbo de discontinuidad  
 BUZAMIENTO 70°-90°  
 CLASIFICACIÓN Ligeramente desfavorable  
 VALOR 10



CASO 6  
 DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN: Oblicuo al rumbo de discontinuidad  
 BUZAMIENTO 20°-70°  
 CLASIFICACIÓN Ligeramente desfavorable  
 VALOR 10

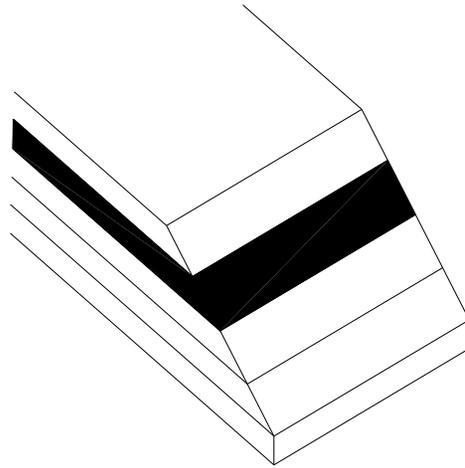


CASO 7  
 DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN: Oblicuo al rumbo de discontinuidad  
 BUZAMIENTO 20°-70°  
 CLASIFICACIÓN Desfavorable  
 VALOR 13



CASO 8  
 DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN: Oblicuo al rumbo de discontinuidad  
 BUZAMIENTO 70°-90°  
 CLASIFICACIÓN Desfavorable  
 VALOR 13

**Fig. B.2.Casos de Remoción 5, 6, 7 y 8 (Fuente: SALCEDO, 1988)**



CASO 9

BUZAMIENTO:  $0^{\circ}$ - $20^{\circ}$

ESPESOR DE INTERVALO (e)

$e > 0.35$  m

$e < 0.35$  m

CLASIFICACIÓN

Muy desfavorable

Desfavorable

VALOR

15

13

Fig. B.3 Casos de Remoción 9 (Fuente: SALCEDO, 1988)

## NOTAS COMPLEMENTARIAS (SALCEDO, 1988)

### ■ NOTA I.

La clasificación debe ser aplicada a masas rocosas litológica y estructuralmente iguales. Cuando existan variaciones en litología, y/o en orientación de estructuras y/o en espaciamiento, la masa rocosa debe ser dividida en regiones. Los límites entre regiones pueden ser cambios bruscos en componentes litológicos, fallas geológicas o ejes de pliegues, por ejemplo.

### ■ NOTA II.

Cuando la masa rocosa tiene varias discontinuidades, se recomienda tomar como primera aproximación las características de la familia más desarrollada con las propiedades que reflejen el menor valor asignado. Si las operaciones de campo no concuerdan con el tipo de remoción predicho con la clasificación propuesta, se pueden utilizar parámetros promedio de las características de las distintas discontinuidades.

### ■ NOTA III.

Cuando existan diaclasas abiertas y estén rellenas con materiales o minerales duros tales como cuarzo o calcita, se recomienda aumentar el valor asignado correspondiente a la escala siguiente.

### ■ NOTA IV.

En los casos de avance de excavación perpendicular al rumbo de la discontinuidad mas desarrollada, las operaciones de campo deberán organizarse de forma tal que se avance en el mismo sentido del buzamiento, como se ha considerado

en los casos 4 y 5. Si por razones de espacio y factibilidad de vías de acceso no es posible cumplir con esta recomendación, el valor asignado correspondiente deberá ser aumentado a la escala siguiente.

■ NOTA V.

Cuando la masa rocosa esté constituida por alternancia de intervalos duros y blandos, se deberán tomar decisiones mediante pruebas de campo. Es evidente que una mototrailla empujada por un bulldozer, no puede estar levantando frecuentemente la cuchilla cada vez que se encuentre con un intervalo duro. La presencia del intervalo duro es fácil de detectar en el campo, porque la cuchilla se tranca y el bulldozer patina sin avance. A juicio del suscrito, en base a pocos casos encontrados, se recomienda como punto de partida establecer que si la masa rocosa tiene más de un 30% de intervalos duros intercalados con blandos, la eficiencia de la mototrailla se pierde y es preferible escarificar previamente.

■ NOTA VI.

Cuando no se disponga de sondeos geofísicos, se puede descartar el valor asignado correspondiente y sumar los valores asignados o los otros factores. En estos casos para fines de clasificación y determinación del tipo de remoción, se deberán utilizar los valores totales "sin geofísica". indicados en el cuadro correspondiente o la sumatoria de valores.

■ NOTA VII.

Cuando no se disponga de sondeos geofísicos y la suma de los valores asignados de los demás factores excluyendo el "Rumbo y Buzamiento", no supera un

valor total de 20, se deberá descartar el valor asignado por ese factor y considerar el material como de remoción convencional.

■ NOTA VIII.

En los casos de rocas metamórficas donde la foliación o esquistosidad es la discontinuidad mas desarrollada y existen muy pocas diaclasas, se seleccionará ésta para estimar los valores asignados en la Tabla B.1. La esquistosidad no es una diaclasa o plano de fractura y por lo tanto para la determinación de sus propiedades, se requiere experiencia geológica de campo. Para fines de "abertura", si se encuentran intervalos duros interfoliados con blandos (metareniscas duras y filitas blandas, por ejemplo), la esquistosidad puede considerarse abierta y rellena por dichos intervalos blandos.

■ NOTA IX.

En las rocas sedimentarias, la estratificación debe considerarse como una discontinuidad y se le aplica el mismo criterio anterior para el caso de estratos duros y blandos interestratificados. (Areniscas o calizas duras y lutitas blandas, por ejemplo.)

■ NOTA X.

La clasificación no es aplicable al caso de suelos cementados duros. La definición de su tipo de remoción es función del grado de cementación, por lo tanto, se recomiendan pruebas de campo

Clase de roca Descripción Velocidad sísmica Valor asignado	I Muy Buena 2150 m/s 26	II Buena 2150-1850 m/s 24	III Regular 1850-1500 m/s 20	IV Pobre 1500-1200 m/s 12	V Muy Pobre 1200-450 m/s 5
Dureza de la Roca	RL:30 RN:50 Extremadamente dura	RL:20-30 RN:40-50 Muy Dura	RL:10-20 RN:20-40 Dura	RL:1-10 RN:10-20 Blanda	RL: 0 RN: 10 Muy Blanda
Descripción	Requiere muchos golpes de martillo de geólogo para romper material intacto. Resuena al golpear con martillo	Muestra de mano requiere más de un golpe de martillo para quebrarse. Resuena al golpear con martillo	No puede ser rayada con la navaja. Muestra de mano se rompe con golpe firme de martillo. Resuena al golpear con martillo	Puede ser rayada con navaja. Golpes firmes con la punta del martillo de geólogo producen hendiduras de 1 a 3 mm. Golpes de martillo producen sonidos apagados	Puede ser desconchada con navaja. Se desmorona con golpe firme de martillo. Con presión de los dedos se producen pedazos de hasta 3 mm de tamaño
Valor Asignado	Is: 3 Mpa 10 $\sigma_c$ : 70 Mpa	Is:1-3 Mpa 5 $\sigma_c$ :10-25 Mpa	Is:1-3 Mpa 2 $\sigma_c$ :10-25 Mpa	Is:0,1-0,4 Mpa 1 $\sigma_c$ :3-10 Mpa	Is:0,1-0,4 Mpa 1 $\sigma_c$ :3-10 Mpa
Meteorización de la roca	Fresca	Ligeramente meteorizada	Meteorizada	Altamente meteorizadas	Descompuesta
Descripción	La masa rocosa tiene composición química, textura, estructura y color original. Discontinuidades generalmente cerradas. No hay decoloración	Las propiedades de la masa rocosa han sido levemente alteradas. Discontinuidades pueden estar abiertas; superficies muestran ligera decoloración	Roca decolorada; discontinuidades pueden estar abiertas, con superficies decoloradas. Alteración comienza a penetrar dentro de la roca	Roca decolorada; discontinuidades pueden estar abiertas, con superficies decoloradas. Alteración comienza a penetrar dentro de la roca	Toda la masa rocosa está decolorada y convertida en suelo, pero conserva textura y estructura original. Ocasionalmente hay roca menos meteorizadas.
Valor Asignado	9	7	5	3	1
Espaciamiento de Discontinuidad	3 m	3-1 m	100-30 cm	30-5 cm	5 cm
Valor Asignado	30	25	20	10	5
Persistencia (Continuidad de Diaclasa)	Muy Baja Persistencia (1m)	Baja Persistencia (1-3 m)	Persistencia media (3-10 m)	Alta Persistencia (10-20 m)	Muy alta persistencia (20 m)
Valor Asignado	5	5	3	2	1
Abertura y relleno de diaclasa	Cerrada	Ligeramente abierta (0,25-0,50 mm)	Abierta (0,5-2,5 mm)	Muy Abierta (2,5-5,0 mm)	Extremadamente abierta 5 mm
Valor Asignado	5	5	4	3	1
Rumbo y Buzamiento	Muy desfavorable	Desfavorable	Ligeramente desfavorable	Favorable	Muy favorable
Valor Asignado	15	13	10	5	3
Sumatoria de valores asignados					
a) Total	100-85	85-70	70-50	50-25	25
b) Sin Geofísica	80-60	60-50	50-30	30-20	20
Tipo de Remoción	Voladura	Voladura y escarificación (Banqueo Combinado)	Escarificación Difícil	Escarificación Normal	Escarificación Convencional
Caballos de Fuerza del tipo de Tractor requerido	Explosivos	650-750 HP	410-450 HP	300-355 HP	140-223 HP

Según Weaver (1975), modificada y adaptada por D. Salcedo (1984-1986)

NOTA: La clasificación debe ser utilizada en conjunto con Notas complementarias, bloques diagramáticos y Tabla B.2 Anexo B

RL: Rebote con Martillo de Schmidt Tipo L

RN: Rebote con Martillo de Schmidt Tipo N

Is: Índice de Carga Puntual

$\sigma_c$ : Compresión sin confinar

**Tabla B.1. Clasificación del tipo de remoción. (Fuente: Salcedo, 1988)**

COMPAÑÍA	TIPOS DE EQUIPOS Y CABALLOS DE FUERZA					
<b>CATERPILLAR</b>	D6D 140HP	D7G 200HP	D8L 335HP	D9L 460HP	D10 700HP	D11N 750HP
<b>KOMATSU</b>	D65E6 155HP	D80A-18 220HP	D155-1 320HP	D355-3 410HP	D455A 650HP	
<b>JOHN DEERE</b>	850 145HP					
<b>INTERNATIONAL DRESSER</b>	TD15C 140HP	TD20E 210HP	TD25E 310HP			
<b>FIAT ALLIS</b>	14C 140HP	FD20 223HP	FD30 300HP	F/A31 425HP		

Tabla B.2. Tabla Comparativa de Tractores (Bulldozers). (Fuente: Salcedo, 1988)

## Anexo C: TABLAS BIENIAWSKI, RMR, GSI. CRITERIO DE HOEK-BROWN

Parámetros de Clasificación												
1	Resistencia de la roca sana	Ensayo de carga puntual	> 100 kg/cm <sup>2</sup>	40-80 kg/cm <sup>2</sup>	20-40 kg/cm <sup>2</sup>	10-20 kg/cm <sup>2</sup>	Compresión simple (kg/cm <sup>2</sup> )					
		C. simple	> 2500 kg/cm <sup>2</sup>	1000-2500 kg/cm <sup>2</sup>	500-1000 kg/cm <sup>2</sup>	250-500 kg/cm <sup>2</sup>	50-250	10-50	10			
Valoración			15	12	7	4	2	1	0			
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%					
	Valoración		20	17	13	8	3					
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m					
	Valoración		20	15	10	8	5					
4	Estado de las diaclasas		Persistencia		Abertura		Rugosidad		Relleno		Meteorización	
			< 1 m	6	Cerrada	6	Muy rugosa	6	Sin relleno	6	Bordes sanos	6
			1 - 3 m	4	< 0,1 mm	5	Rugosa	5	Duro < 5 mm	4	Lig. meteorizada	5
			3 - 10 m	2	0,1 - 1,0 mm	4	Lig. rugosa	3	Duro > 5 mm	2	Moder. meteorizada	3
			> 10 m	0	1 - 5 mm	1	Lisa	1	Blando < 5 mm	2	Muy meteorizada	1
					> 5 mm	0	Espejo de falla	0	Blando > 5 mm	0	Descompuesta	0
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min					
		Relación entre la presión de agua y la tensión principal mayor	0	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5					
	Estado general	Seco	Lig. húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo						
	Valoración		15	10	7	4	0					
Corrección por la Orientación de las Diaclasas												
6	Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20° cualquier dirección					
	Excav. con el buzamiento		Excavación contra buzamiento									
	Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°	Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°	Buz. 45°-90°	Buz. 20°-45°						
	Muy Favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy Desfavorable	Media						
0	-2	-5	-10	-12	-5							
Clasificación												
Clase		I	II	III	IV	V						
Calidad		Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy mala						
Valoración RMR		100-81	80-61	60-41	40-21	< 20						
Características												
Clase		I	II	III	IV	V						
Tiempo de mantenimiento y longitud		20 años con 15 m de luz	1 año con 10 m de luz	1 semana con 5 m de luz	10 horas con 2,5 m de luz	30 min. con 1 m de luz						
Cohesión		> 4 kg/cm <sup>2</sup>	3-4 kg/cm <sup>2</sup>	2-3 kg/cm <sup>2</sup>	1-2 kg/cm <sup>2</sup>	< 1 kg/cm <sup>2</sup>						
Angulo de fricción		> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	15°						

Tabla C.1. Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989) (Fuente: TRUZMAN, 2000)

Clase de Roca <sup>3</sup>	Excavación	Sostenimiento Primario		
		Pernos <sup>4</sup> (Longitudes para Túneles de 10 m de luz)	Concreto proyectado	Costillas
I	A sección completa Avances de 3 m	Innecesario, salvo algún perno adicional		
II	Plena sección. Avances de 1-1.5 m	Colocación de Pernos locales en bóveda, con longitudes de 2 a 3 m y separación de 2 a 2.5 m, eventualmente con malla metálica.	5 cm en bóveda para impermeabilización	No
III	Avance en bóveda y banqueo. Avances de 1.5 a 3 m en la galería.	Colocación sistemática de pernos de 3 a 4 m, con separaciones de 1.5 a 2 m en bóveda y hastiales, con malla metálica.	5 a 10 cm en la bóveda y 3 cm en hastiales	No
IV	Avance en bóveda y en banqueo. Avances de 1 a 1.5 m en la galería.	Colocación sistemática de pernos de 4 a 5 m, con separaciones de 1 a 1.5 m en bóveda y hastiales, con malla metálica	10 a 15 cm en bóveda y 10 cm en hastiales. Aplicación según avanza la excavación.	Entibación ligera ocasional, con separaciones de 1.5 cm
V	Galerías múltiples. Avances de 0.5 a 1 m en la bóveda	Colocación sistemática de pernos de 4.5 a 6 m, con separaciones de 1 a 1.5 m en bóveda y hastiales, con malla metálica. Pernos en la solera	15 a 20 cm en bóveda, 15 cm en hastiales y 5 cm en el frente. Aplicación inmediata después de cada voladura.	Costillas fuertes separadas 0.75 m, con blindaje de planchas metálicas y cerradas en solera.

**Tabla C.2. Pautas para la Excavación y el soporte de Túneles con espaciamiento de 10 m, de acuerdo con el Sistema RMR. Necesidades de Sostenimiento Aplicable a túneles con 5 a 12 m de luz; tensiones verticales inferiores a 300 Kp/cm<sup>2</sup> construcción tradicional.(Después de Bieniawski, 1989) (Fuente: HOEK, 2000)**

<sup>3</sup> Ver Tabla C.1

<sup>4</sup> Pernos con diámetro de 20 mm, inyectados con resina

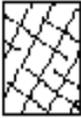
<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX</b></p> <p>A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Geological Strength Index (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.</p> <p>ESTRUCTURA</p>		<p>CONDICION DE LA SUPERFICIE</p> <p>Muy rugosa, superficies sin meteorización</p> <p>Rugosa, ligeramente meteorizada, superficies</p> <p>Plana, moderadamente meteorizada, superficies</p> <p>Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con rellenos duros o de fragmentos angulares</p> <p>Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con</p> <p>DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE →</p>				
 <p>INTACTA O MASIVA – rocas intactas o rocas masivas in situ con pocas discontinuidades separadas ampliamente</p>	90	80	N/A	N/A	N/A	
 <p>FRACTURADA – macizo rocoso poco perturbado consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas ortogonales de discontinuidades, muy bien unidos entre sí</p>	70	60				
 <p>MUY FRACTURADA – macizo rocoso parcialmente perturbado consistente de bloques angulares unidos entre sí, formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades</p>	50					
 <p>FRACTURADA/PERTURBADA – macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de varios sistemas de discontinuidades</p>	40	30				
 <p>DESINTEGRADA – macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente unidos entre sí</p>	20					
 <p>FOLIADA/LAMINADA – macizo rocoso foliado, plegado y cizallado tectónicamente. La esquistosidad prevalece sobre cualquier sistema de discontinuidades, completamente carente de bloques</p>	N/A	N/A	10	5		

Tabla C.3. Estimación del GSI, basado en descripciones geológicas (Fuente: TRUZMAN, 2000)

## CRITERIO HOEK-BROWN

A continuación se describe el criterio de rotura propuesto por Hoek y Brown tanto para roca intacta como en macizos que exhiben características dominantes de diaclasamiento y meteorización.

Este criterio, está definido por la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c * \left( m_b * \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad [C.1]$$

donde:

$\sigma_1$ : Esfuerzo principal mayor en la falla

$\sigma_3$ :Esfuerzo principal menor

$\sigma_c$ : Resistencia a la compresión simple en roca “intacta”

$m_b$ : es el valor de la constante de Hoek-Brown para Macizo rocoso

$s$  y  $a$  son constantes que depende de las características del Macizo rocoso

En la Tabla C.4, se pueden apreciar los diferentes valores de  $m_i$ , dependiendo del grado de diaclasamiento y de meteorización del macizo.(HOOKE, 2000)

La envolvente de Mohr (Fig. C.1), que relaciona los esfuerzos normal y de corte, puede determinarse por el método propuesto por Hoek-Brown (1980<sup>a</sup>). Esto puede aproximarse según la ecuación C.2 que se utiliza para generar una serie de valores de ensayo triaxial, simulando el ensayo, y puede utilizarse un proceso de aproximación

estadístico adecuado para derivar una envolvente de Mohr equivalente, definida por la siguiente ecuación:

$$\tau = A \sigma_{ci} \left( \frac{\sigma'_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)^B \quad [C.2]$$

donde,

A y B son constantes del material

$\sigma_n$  es el esfuerzo normal efectivo, y

$\sigma_{tm}$  es el esfuerzo “tensil” de la masa rocosa.

El esfuerzo “tensil”, que refleja los intersticios de las partículas de roca cuando estas no están libres, es dado por:

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left( m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad [C.3]$$

A fin de utilizar el criterio de Hoek-Brown para estimar el esfuerzo y la deformación de masas rocosas fracturadas, deben estimarse tres “propiedades” de la masa rocosa, a saber: Esfuerzo de Compresión Uniaxial ( $\sigma_{ci}$ ) de roca intacta, Valor de la constante de Hoek-Brown  $m_i$ , para roca intacta, y Valor del GSI para masa rocosa.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Traducido de Hoek-(2000)

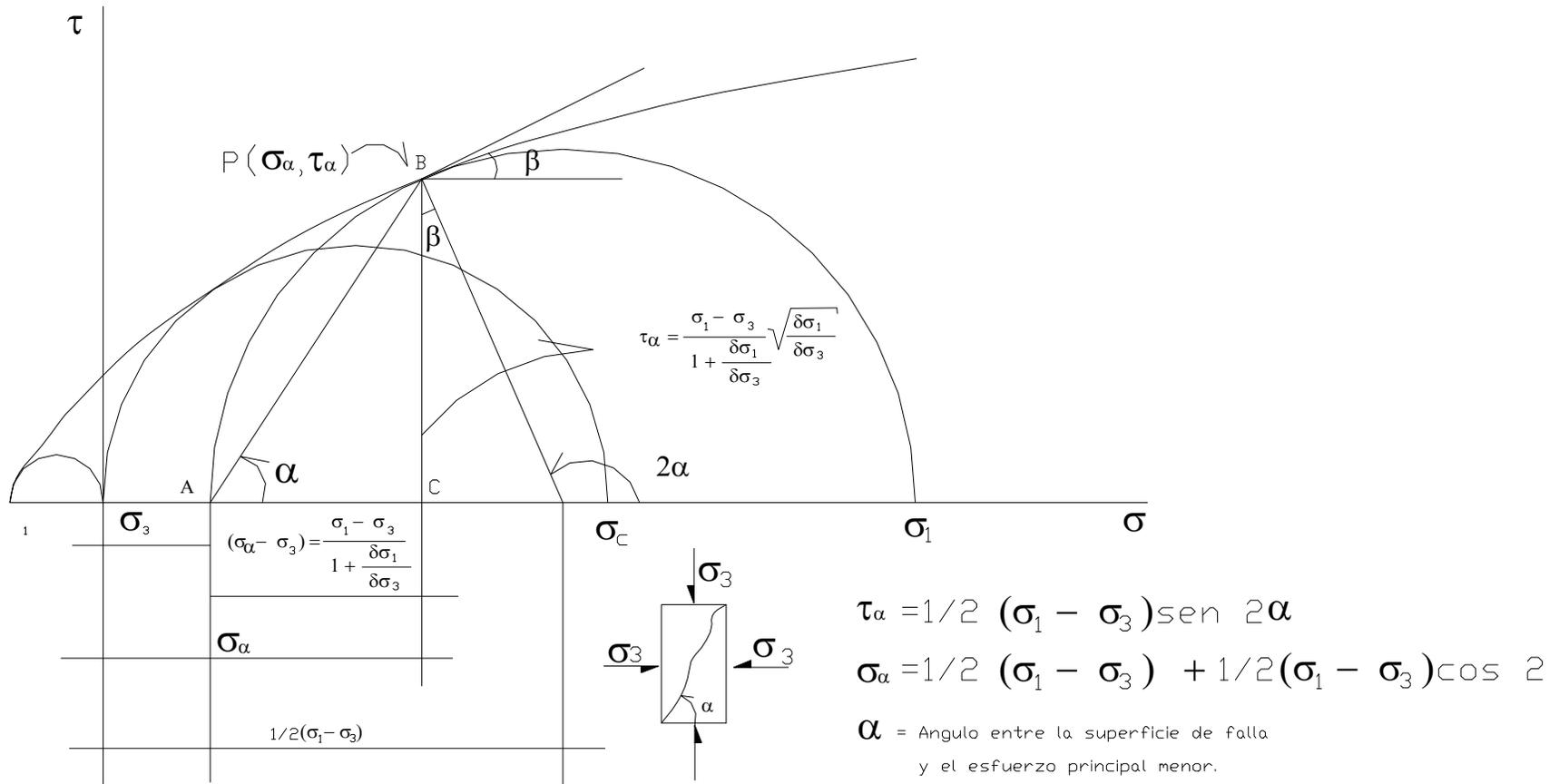


Fig. C.1. Envolvente de Rotura por cizallamiento en roca intacta (Fuente: UCAR, Sin Fecha)

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Grueso	Medio	Fino	Muy fino
S E D I M E N T A R I A S	Clastica		Conglomerado 22	Arenisca 19	Limolita 9	Arcilla 4
				Grauvaca 18		
		Orgánico		Tiza 7 Carbón 8 -21		
	No Clastica	Carbonato	Brecha 20	Caliza Espática 10	Caliza Micritica 8	
		Quimico		Yeso 16	Anhidrita 13	
METAMORFICAS	No Foliada		Marmol 9	Hornfels 19	Cuarcita 24	
	Ligeramente foliada		Migmatita 30	Anfibolita 25-31	Milonita 6	
	Foliada		Gneiss 33	Esquistos 4-8	Filita 10	Pizarra 9
I G N E A S	Claros		Granito 33 Granodiorita 30 Diorita 28		Riolita 16 Dacita 17 Andesita 19	Obsidiana 19
	Oscuros		Gabro 27 Norita 22	Diabasa 19	Basalto 17	
	Tipo Piroclastico Extrusivo		Aglomerado 20	Brecha 18	Toba 15	

Tabla C.4 Valores de mi (Fuente: Hoek, 2000)

## Anexo D: DIMENSIONES DE MUESTRAS A ENSAYAR

UNIDAD	MUESTRA	UBICACIÓN		DIAMETRO SUPERIOR (cm)	DIAMETRO MEDIO (cm)	DIAMETRO INFERIOR (cm)	DIAMETRO PROMEDIO (cm)	LONG 1 (cm)	LONG 2 (cm)	LONG PROMEDIO (cm)	CONSIDERACIONES				
		ESTE	NORTE								2,5'd	3'd	L/D	0,5'd	
4	M10U4P50	346,312	1063,645	6,18	6,33	6,33	6,28	16,52	16,68	16,60	15,70	18,84	2,64	3,14	
	M12U4P50	346,312	1063,645	6,34	6,34	6,35	6,34	15,80	15,80	15,80	15,86	19,03	2,49	3,17	
	M12U4P51	346,422	1063,605	6,32	6,32	6,32	6,32	16,70	16,75	16,73	15,80	18,96	2,65	3,16	
	M13U4P51	346,422	1063,605	6,33	6,34	6,32	6,33	17,42	17,55	17,49	15,83	18,99	2,76	3,17	
	M5U4P50	346,312	1063,645	6,33	6,33	6,32	6,33	16,76	16,75	16,76	15,82	18,98	2,65	3,16	
	M8U4P51	346,422	1063,605	6,33	6,33	6,33	6,33	15,90	15,80	15,85	15,83	18,99	2,50	3,17	
	M11U4P50	346,312	1063,645	6,27	6,33	6,34	6,31	10,78	10,86	10,82	15,78	18,94	1,71	3,16	
	M6U4P50	346,312	1063,645	6,32	6,32	6,32	6,32	6,64	6,65	6,65	15,80	18,96	1,37	3,16	
	M9U4P51	346,422	1063,605	6,29	6,30	6,29	6,29	11,90	11,93	11,92	15,73	18,88	1,89	3,15	
	M12U4P50	346,312	1063,645	6,33	6,34	6,34	6,34	6,60	6,60	6,60	15,84	19,01	1,04	3,17	
	M4U4P51	346,422	1063,605	6,32	6,32	6,32	6,32	7,50	7,50	7,50	15,80	18,96	1,19	3,16	
	M13U4P50	346,312	1063,645	6,33	6,31	6,31	6,32	9,97	9,96	9,97	15,79	18,95	1,58	3,16	
	M1U4P50	346,312	1063,645	6,32	6,32	6,32	6,32	6,42	6,48	6,45	15,80	18,96	1,02	3,16	
	M3U4P50	346,312	1063,645	6,32	6,32	6,33	6,32	12,42	12,38	12,40	15,81	18,97	1,96	3,16	
	M9U4P50	346,312	1063,645	6,32	6,32	6,32	6,32	7,70	7,10	7,40	15,80	18,96	1,17	3,16	
	M11U4P51	346,422	1063,605	6,39	6,33	6,30	6,34	7,13	7,10	7,12	15,85	19,02	1,12	3,17	
	M1U4P51	346,422	1063,605	6,31	6,31	6,31	6,31	3,85	3,87	3,86	15,78	18,93	0,61	3,16	
	M11U4P50	346,312	1063,645	6,34	6,33	6,33	6,33	5,04	5,15	5,10	15,83	19,00	0,80	3,17	
	M2U4P51	346,422	1063,605	6,31	6,31	6,32	6,31	7,35	7,40	7,38	15,78	18,94	1,17	3,16	
	M2U4P50	346,312	1063,645	6,29	6,29	6,29	6,29	2,53	2,50	2,52	15,71	18,86	0,40	3,14	
	M3U4P51	346,422	1063,605	6,37	6,37	6,37	6,37	5,73	5,73	5,73	15,93	19,11	0,90	3,19	
	M12U4P50	346,312	1063,645	6,35	6,35	6,35	6,35	1,97	1,96	1,96	15,88	19,05	0,31	3,18	
	M8U4P51	346,422	1063,605	6,31	6,31	6,30	6,31	2,75	2,75	2,75	15,77	18,92	0,44	3,15	
	M10U4P51	346,422	1063,605	6,3	6,30	6,30	6,30	2,82	2,88	2,85	15,75	18,90	0,45	3,15	
	M11U4P50	346,312	1063,645	6,30	6,31	6,30	6,30	3,04	3,06	3,05	15,76	18,91	0,48	3,15	
	M4U4P51	346,422	1063,605	6,30	6,32	6,30	6,31	2,90	2,90	2,90	15,77	18,92	0,46	3,15	
	M9U4P51	346,422	1063,605	6,27	6,26	6,29	6,27	2,80	2,80	2,80	15,68	18,82	0,45	3,14	
	M6U4P50	346,312	1063,645	6,40	6,33	6,33	6,35	3,00	3,00	3,00	15,88	19,06	0,47	3,18	
	M7U4P51	346,422	1063,605	6,32	6,32	6,32	6,32	4,96	4,96	4,96	15,80	18,96	0,78	3,16	
	M13U4P50	346,312	1063,645	6,32	6,33	6,32	6,32	3,66	3,67	3,66	15,81	18,97	0,58	3,16	
	M4U4P50	346,312	1063,645	6,31	6,32	6,32	6,32	5,85	5,90	5,88	15,79	18,95	0,93	3,16	
	M8U4P50	346,312	1063,645	6,31	6,35	6,31	6,32	6,06	6,05	6,06	15,81	18,97	0,96	3,16	
	M12U4P51	346,422	1063,605	6,32	6,32	6,32	6,32	4,40	4,46	4,43	15,80	18,96	0,70	3,16	
	M10U4P51	346,422	1063,605	6,3	6,30	6,30	6,30	3,38	3,38	3,38	15,75	18,90	0,54	3,15	
	M9U4P50	346,312	1063,645	6,30	6,30	6,30	6,30	3,20	3,20	3,20	15,75	18,90	0,51	3,15	
	M12U4P50	346,312	1063,645	6,34	6,34	6,33	6,34	3,40	3,42	3,41	15,84	19,01	0,54	3,17	
	M10U4P51	346,422	1063,605	6,30	6,30	6,30	6,30	3,50	3,50	3,50	15,75	18,90	0,56	3,15	
	M10U4P51	346,422	1063,605	6,30	6,30	6,30	6,30	3,63	3,65	3,64	15,75	18,90	0,58	3,15	
	M6U4P50	346,312	1063,645	6,30	6,30	6,30	6,30	3,24	3,30	3,27	15,75	18,90	0,52	3,15	
	7	MAU7A	346494,580	1064349,922								0,00	0,00	0,00	0,00
MAU7D		346494,580	1064349,922	6,33	6,33	6,33	6,33	18,15	18,03	18,09	15,83	18,99	2,86	3,17	
MBU7(*)		346551,166	1064401,472				6,32			0	15,8	18,96	0	3,16	
MCU7(*)		346570,781	1064423,316				5,75			0	14,375	17,25	0	2,875	
MDU7(*)		346588,456	1064436,96				5,75			0	14,375	17,25	0	2,875	
MAU7C		346494,580	1064349,922									0	0	0	0
9	M5U9P48B	346529,784	1064417,430	6,32	6,33	6,33	6,33	14,50	14,50	14,50	15,82	18,98	2,29	3,16	
	M2U9P48B	346529,784	1064417,430	6,32	6,34	6,32	6,33	14,58	14,52	14,55	15,82	18,98	2,30	3,16	
	M2U9P48A	346529,784	1064417,430	6,32	6,32	6,32	6,32	5,68	5,60	5,64	15,80	18,96	0,89	3,16	
	M10U9P48G	346529,784	1064417,430	6,30	6,30	6,30	6,30	7,30	7,26	7,28	15,75	18,90	1,16	3,15	
	M8U9P48B	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33	6,27	6,27	6,27	15,83	18,99	1,31	3,17	
	M11U9P48C	346529,784	1064417,430	6,32	6,32	6,32	6,32			0,00	15,80	18,96	0,00	3,16	
	M11U9P48D	346529,784	1064417,430	6,35	6,35	6,30	6,33	9,51	9,59	9,55	15,83	19,00	1,51	3,17	
	M11U9P48E	346529,784	1064417,430	6,30	6,30	6,30	6,30	6,14	6,10	6,12	15,75	18,90	0,97	3,15	
	M7U9P48C	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,32	6,33	12,48	12,40	12,44	15,82	18,98	1,97	3,16	
	M9U9P48B	346529,784	1064417,430	6,27	6,25	6,22	6,25	12,46	12,51	12,49	15,62	18,74	2,00	3,12	
	M4U9P48C	346529,784	1064417,430	6,33	6,35	6,33	6,34	6,90	6,96	6,93	15,84	19,01	1,09	3,17	
	M6U9P48	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33	13,36	13,20	13,28	15,83	18,99	2,10	3,17	
	M1U9P48	346529,784	1064417,430	6,20	6,20	6,26	6,22	12,72	12,63	12,68	15,55	18,66	2,04	3,11	
	M4U9P48B	346529,784	1064417,430	6,33	6,34	6,29	6,32	6,09	6,16	6,13	15,80	18,96	0,97	3,16	
	M3U9P48(*)	346529,784	1064417,430				6,60			0,00	16,50	19,80	0,00	3,30	
	M10U9P48D	346529,784	1064417,430	6,30	6,30	6,30	6,30		3,03	3,00	3,02	15,75	18,90	0,48	3,15
	M10U9P48E	346529,784	1064417,430	6,30	6,30	6,30	6,30				2,70	15,75	18,90	0,43	3,15
	M10U9P48F	346529,784	1064417,430	6,35	6,35	6,35	6,35				3,14	15,88	19,05	0,49	3,18
	M8U9P48A	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33				4,13	15,83	18,99	0,65	3,17
	M8U9P48C	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33				0,00	15,83	18,99	0,00	3,17
	M8U9P48D	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33				2,20	15,83	18,99	0,35	3,17
	M5U9P48C	346529,784	1064417,430	6,35	6,35	6,35	6,35				0,00	15,88	19,05	0,00	3,18
	M11U9P48A	346529,784	1064417,430	6,35	6,35	6,35	6,35				0,00	15,88	19,05	0,00	3,18
	M11U9P48B	346529,784	1064417,430	6,29	6,29	6,29	6,29				3,29	15,73	18,87	0,52	3,15
	M7U9P48E	346529,784	1064417,430	6,34	6,34	6,34	6,34				3,14	15,85	19,02	0,50	3,17
	M10U9P48A	346529,784	1064417,430	6,30	6,30	6,30	6,30	4,34	4,30	4,32	15,75	18,90	0,69	3,15	
	M10U9P48B	346529,784	1064417,430	6,30	6,30	6,30	6,30				4,63	15,75	18,90	0,72	3,15
	M10U9P48C	346529,784	1064417,430	6,30	6,30	6,30	6,30				3,72	15,75	18,90	0,59	3,15
	M8U9P48E	346529,784	1064417,430	6,36	6,36	6,36	6,36				3,84	15,90	19,08	0,60	3,18
	M5U9P48A	346529,784	1064417,430	6,33	6,30	6,31	6,31	4,20	4,18	4,19	15,78	18,93	0,66	3,16	
	M7U9P48A	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33				4,05	15,83	18,99	0,64	3,17
	M7U9P48B	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33				4,13	15,83	18,99	0,65	3,17
M7U9P48D	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33				3,85	15,83	18,99	0,61	3,17	
M9U9P48A	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33				4,35	15,83	18,99	0,69	3,17	
M4U9P48A	346529,784	1064417,430	6,33	6,33	6,33	6,33				3,22	15,83	18,99	0,51	3,17	

Muestra Compresión Uniaxial
Muestra Carga Puntual Diametral
Muestra Carga Puntual Axial
Muestra Tracción Indirecta
Muestra Difícil de ensayar

Tabla D.1. Clasificación preliminar de Muestras (Núcleos)

MUESTRAS CORTE DIRECTO			
UNIDAD	MUESTRA	UBICACION	
		ESTE	NORTE
4	M6U4	346531,273	1063851,080
	M1U4	346549,866	1063906,861
	M6U4P51		
	M7U4P50		
	M10U4P51		
7	MFU7	346429,799	1064239,051
	MIU7	346590,138	1064443,051
	MLU7	346552,522	1064412,426
9	M2U9	346376,900	1064288,130
	M12U9	346494,645	1064390,497

**Tabla D.2. Clasificación preliminar de Muestras para ensayo de Corte Directo**

MUESTRAS DE MANO								
UNIDAD	MUESTRA	UBICACIÓN		W1 (cm)	W2 (cm)	W (cm)	D (cm)	W/D
		ESTE	NORTE					
4	M4U4.1	346387,216	1063864,534	5,850	5,820	5,835	5,870	0,99
	M4U4.2	346387,216	1063864,534	6,390	6,380	6,385	5,385	1,19
	M4U4.3	346387,216	1063864,534	6,800	6,720	6,760	5,090	1,33
	M2U4	346486,556	1063899,488	7,180	7,100	7,140	5,000	1,43
	M5U4	346387,572	1063844,580	6,860	7,170	7,015	5,590	1,25
	M3U4	346412,224	1063863,138	6,330	6,730	6,530	4,890	1,34
7	M1U7	346447,814	1064246,181	8,940	8,730	8,835	5,400	1,6361
	M2U7	346471,670	1064284,261	7,800	7,330	7,565	5,940	1,2736
	M3U7.2	346470,471	1064333,087	5,970	5,670	5,820	5,090	1,1434
	M3U7.1	346470,471	1064333,087	8,560	8,730	8,645	5,450	1,5862
	MEU7	346608,738	1064447,670	11,160	11,375	11,268	8,750	1,2877
	MGU7	346406,506	1064207,454	53,800	54,900	54,350	51,950	1,0462
	MHU7	346598,197	1064448,224	58,800	63,550	61,175	50,100	1,2211
	MJU7	346575,432	1064434,990	57,700	60,900	59,300	61,100	0,9705
MKU7	346561,216	1064424,595	85,000	88,550	86,775	51,600	1,6817	
9	M4U9	346434,34	1064362,772	71,60	78,00	74,80	56,40	1,33
	M5U9	346450,824	1064382,754	9,84	11,63	10,74	8,23	1,31
	M1U9.1	346353,488	1064285,703	70	65,3	67,65	32,4	2,09
	M3U9.1	346403,419	1064328,311	6,38	5,83	6,11	4,44	1,375
	M11U9	346481,904	1064373,616	7,98	9,08	8,53	10,11	0,84
	M13U9	346506,771	1064420,412	5,35	6,72	6,04	5,20	1,16
	M14U9	???	???	8,84	9,96	9,40	5,30	1,77
	M15U9	???	???	5,05	5,00	5,02	5,64	0,89
	M16U9	???	???	9,03	8,99	9,01	6,48	1,39
	M9U9.1	346389,715	1064399,449	47,80	46,70	47,25	44,00	1,07
	M8U9.1	346359,394	1064385,647	5,17	5,55	5,36	4,94	1,09
	M8U9.2	346359,394	1064385,647	7,20	7,45	7,33	6,92	1,06
	M7U9	346332,984	1064343,701	8,23	8,56	8,40	5,72	1,47
	M6U9.1	346483,693	1064406,592	6,60	6,67	6,64	4,68	1,42
	M6U9	346483,693	1064406,592	6,17	5,96	6,07	5,94	1,02
	M10U9	346468,792	1064451,717	5,92	5,38	5,65	5,74	0,98
M8U9	346359,394	1064385,647	6,51	7,14	6,83	6,06	1,13	
M9U9	346389,715	1064399,449	7,10	7,24	7,17	7,44	0,96	

Tabla D.3. Clasificación preliminar de Muestras de mano (Cúbicas)

## Anexo E: MARTILLO DE SCHMIDT

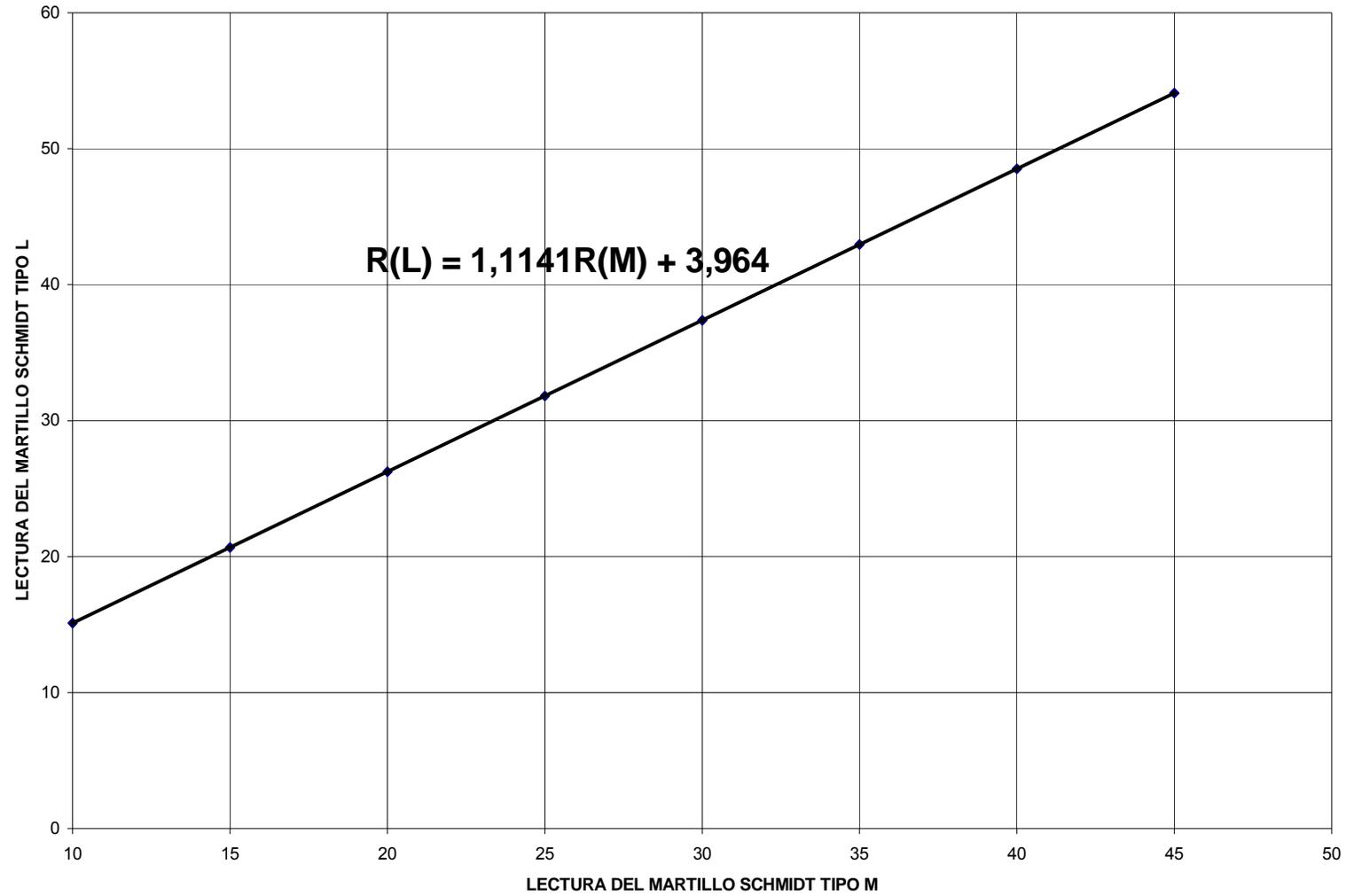


Fig. E.1 Gráfico de correlación entre el martillo Schmidt Tipo M y Tipo L

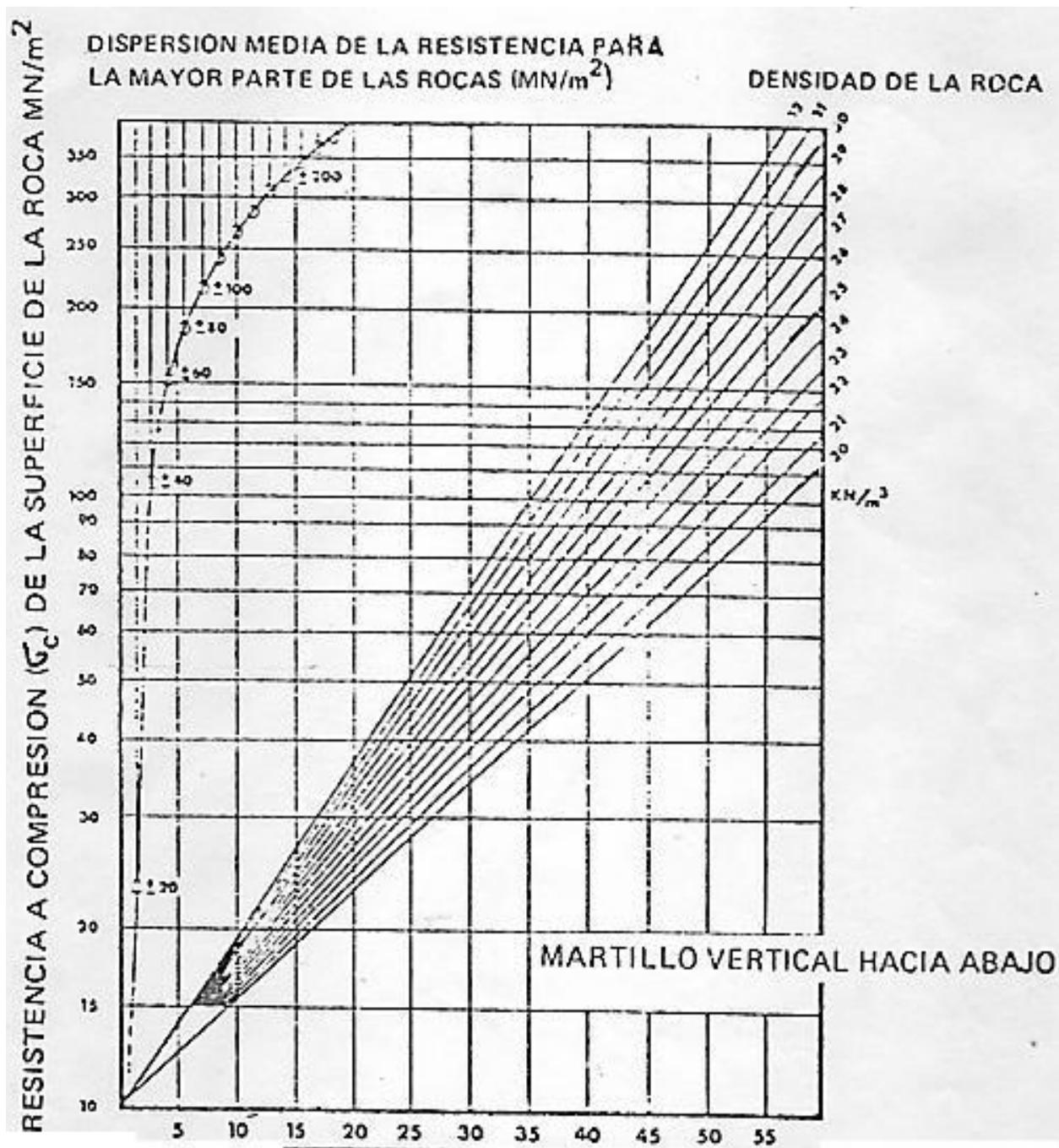


Fig. E.2 Gráfico de correlación para el martillo de Schmidt (L). Relación entre la densidad de la roca, la resistencia a compresión y el número de rebote (BROWN, 1965)

**Anexo F: COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS Y RQD**

**VER ARCHIVOS CORRESPONDIENTES EN ESTE CD**

**POZO 48.JPG  
POZO 50 (1/2).JPG  
POZO 50 (2/2). JPG  
POZO 51 (1/3).JPG  
POZO 51 (2/3).JPG  
POZO 51 (3/3).JPG**

## Anexo G: RESULTADOS DE ENSAYOS

UNIDAD	NÚMERO	MUESTRA	LITOLOGÍA	TIPO	W (mm)	D (mm)	A(mm <sup>2</sup> )	P (N)	D <sub>50</sub> (mm <sup>2</sup> )	D <sub>10</sub> (mm)	I <sub>c</sub> (Mpa)	F	I <sub>u(50)</sub>	Observaciones	
4	1	M1U4P51	Caliza gris con grietas rellenas de caliza micrítica	a	1	63,10	39,80	2.436,86	16.500,00	3.101,19	66,69	5,32	1,06	5,68	
	2	M11U4P50	Caliza gris micrítica con una película de calcita. Recristalización. Fragmentos fósiles re-trabajados pequeños.	a	1	63,33	50,95	3.226,03	10.300,00	4.109,53	64,10	4,45	1,12	4,80	
	3	M2U4P51	Caliza micrítica diacrasada con grietas rellenas de carbonato	a	1	63,13	73,75	4.666,08	5.700,00	5.926,31	77,00	0,96	1,21	1,17	Inválido
	4	M3U4P51	Caliza micrítica con estratificación plana paralela discordante. Presencia de nódulos de pirita, intercalación de láminas de carbonato y material Silico-carbonoso de color negro.	a	1	63,70	57,30	3.650,01	12.300,00	4.647,34	68,17	2,65	1,15	3,04	
	5	M12U4P50	Caliza micrítica gris con estratificación plana paralela continua y grietas delgadas rellenas de calcita	a	1	63,50	19,60	1.244,60	10.800,00	1.584,67	39,81	6,82	0,90	6,15	
	6	M8U4P51	Caliza micrítica con estructuras estiolíticas, fragmentos de fósiles y materia orgánica.	a	1	63,07	27,50	1.734,33	13.000,00	2.209,22	46,99	6,25	0,97	6,00	
	7	M10U4P51	Caliza gris con fragmentos fósiles pequeños. Estructuras estiolíticas fracturadas. Grietas rellenas de calcita. Posible falla o con tacto neto. Estratificación plana paralela discordante en la parte inferior.	a	1	63,00	28,60	1.796,60	9.600,00	2.266,10	47,81	4,20	0,98	4,12	
	8	M11U4P50	Caliza gris micrítica con una película de calcita. Recristalización. Fragmentos fósiles re-trabajados pequeños.	a	1	63,03	30,60	1.922,52	11.700,00	2.447,82	49,48	4,78	1,00	4,76	
	9	M11U4P50.1	Caliza gris micrítica con una película de calcita. Recristalización. Fragmentos fósiles re-trabajados pequeños.	a	1	62,73	56,40	3.475,43	17.700,00	4.425,06	66,52	4,00	1,14	4,56	
	10	M4U4P51	Caliza micrítica fracturada con vejas rellenas de calcita. Presencia de estructuras estiolíticas	a	1	63,07	29,00	1.828,93	11.100,00	2.328,67	48,26	4,77	0,98	4,69	
	11	M6U4P50	Caliza micrítica gris oscura. Presencia de microfósiles. Presenta grieta rellena de calcita.	a	1	63,53	30,00	1.906,00	11.400,00	2.426,79	49,26	4,70	0,99	4,67	
	12	M11U4P50	Caliza gris micrítica con una película de calcita. Recristalización. Fragmentos fósiles re-trabajados pequeños.	d	//	-	63,13	-	18.000,00	3.985,82	63,13	4,52	1,11	5,02	
	13	M6U4P50	Caliza micrítica gris oscura. Presencia de microfósiles. Presenta grieta rellena de calcita.	d	//	-	63,20	-	10.500,00	3.994,24	63,20	2,63	1,11	2,92	Fracturó por la discontinuidad
	14	M12U4P50.1	Caliza micrítica gris con estratificación plana paralela continua y grietas delgadas rellenas de calcita.	d	//	-	66,00	-	17.100,00	3.026,00	66,00	6,66	1,04	6,90	
	15	M13U4P50	Limolita calcárea negra. Presencia de pirita. Estratificación plana paralela discordante	d	//	-	63,17	-	3.000,00	3.990,03	63,17	0,75	1,11	0,84	
	16	M1U4P50	Caliza gris oscura con estratificación ondulada suave discontinua. Esporádicos cristales de calcita	d	//	-	63,18	-	14.700,00	3.992,13	63,18	3,88	1,11	4,09	Fracturó por la discontinuidad
	17	M3U4P50	Caliza micrítica gris oscura con pequeños fragmentos fósiles re-trabajados. Grietas rellenas de calcita. Estratificación discontinua	d	-	-	63,23	-	13.800,00	3.998,46	63,23	3,46	1,11	3,84	Fracturó por la discontinuidad
	18	M9U4P50	Caliza gris micrítica con fragmentos fósiles re-trabajados.	d	-	-	63,18	-	15.900,00	3.992,13	63,18	3,98	1,11	4,43	
	19	M11U4P51	Caliza micrítica (limolita calcárea) de color negro con algunos fragmentos fósiles concentrados hacia la parte superior.	d	//	-	63,40	-	18.900,00	4.019,56	63,40	4,70	1,11	5,23	
	20	M4U4.1	Caliza gris con grieta rellena de calcita.	i	1	58,35	58,70	3.425,15	18.300,00	4.361,03	66,04	4,20	1,13	4,76	
	21	M4U4.2	Caliza gris con grieta rellena de calcita.	i	1	63,86	63,86	3.438,32	9.300,00	4.377,81	66,17	2,12	1,13	2,41	Fracturó por la grieta rellena de calcita
	22	M4U4.3	Caliza gris con grieta rellena de calcita.	i	1	67,60	50,90	3.440,04	2.700,00	4.381,01	66,19	0,62	1,13	0,70	Fracturó por la grieta rellena de calcita
	23	M2U4	Caliza gris con tonos rosáceos. Estratificación ondulada suave discontinua. Pequeños fósiles. Intercalación de láminas de calcita y materia orgánica.	i	1	71,40	60,00	3.570,00	13.200,00	4.545,47	67,42	2,90	1,14	3,32	
	24	M5U4	Caliza gris rosácea con estratificación laminar paralela discontinua.	i	1	70,15	55,90	3.821,39	10.200,00	4.992,06	70,66	2,04	1,17	2,39	
	25	M3U4	Caliza micrítica con esporádicos cristales pequeños de calcita. Estratificación ondulada discontinua.	i	1	66,30	48,80	3.193,17	13.200,00	4.066,67	63,76	3,26	1,12	3,62	

d= Diametral  
a= Axial  
b= Bloque  
i= Irregular  
1= Perpendicular  
//= Paralelo

Tabla G.1 Resultados de Ensayo de Carga Puntual Para La Unidad 4

UNIDAD	NÚMERO	MUESTRA	LITOLOGÍA	TIPO	W (mm)	D (mm)	A(mm <sup>2</sup> )	P (N)	D <sub>50</sub> (mm <sup>2</sup> )	D <sub>10</sub> (mm <sup>2</sup> )	I <sub>c</sub> (Mpa)	F	f <sub>csd</sub>	Observaciones	
7 Y 9	1	M7U9P48E	Caliza azulosa, masiva	a	⊥	63,40	31,40	1.990,76	6.900,00	2.534,71	50,35	2,72	1,00	2,73	
	2	M10U9P48E	Caliza gris dura	a	⊥	63,00	27,00	1.701,00	10.200,00	2.165,78	46,54	4,71	0,97	4,56	
	3	M10U9P48D	Caliza gris dura	a	⊥	63,00	30,15	1.899,45	9.000,00	2.418,45	49,16	3,72	0,99	3,69	
	4	M11U9P48B	Caliza gris con cristales de calcita y algunos esporádicos de cuarzo	a	⊥	62,90	32,90	2.069,41	13.200,00	2.634,65	51,33	5,01	1,01	5,07	Revisar fractura
	5	M10U9P48F	Caliza gris dura	a	⊥	63,50	31,40	1.993,90	11.100,00	2.538,71	50,39	4,37	1,00	4,39	
	6	M8U9P48A	Caliza azulosa, masiva	a	⊥	63,30	41,30	2.614,29	10.500,00	3.328,62	57,69	3,15	1,07	3,36	
	7	M8U9P48D	Caliza azulosa, masiva	a	⊥	63,30	22,00	1.392,60	7.200,00	1.773,11	42,11	4,06	0,93	3,76	Revisar fractura
	8	M4U9P48B.1	Caliza gris dura masiva	a	⊥	63,40	30,31	1.921,02	10.500,00	2.445,92	49,46	4,29	1,00	4,27	
	9	M11U9P48C.1	Caliza gris con cristales de calcita y algunos esporádicos de cuarzo	a	⊥	63,30	36,00	2.278,80	16.500,00	2.901,46	53,67	5,69	1,03	5,68	
	10	MDU7.1	Caliza gris dura masiva	a	⊥	63,00	47,90	3.056,02	16.000,00	3.891,05	62,36	4,32	1,10	4,77	
	11	MDU7.2	Caliza gris dura masiva	a	⊥	63,00	49,20	3.136,96	15.300,00	3.996,65	63,22	3,83	1,11	4,25	
	12	M7U9P48C.1	Caliza azulosa, masiva	a	⊥	63,30	50,10	3.677,73	15.000,00	4.662,63	66,43	3,20	1,15	3,69	
	13	M3U9P48	Caliza gris, dura, masiva con tonos rosados (alteración). Fragmentos fósiles	d	//	-	60,60	-	17.400,00	3.672,36	60,60	4,74	1,09	5,17	
	14	M8U9P48B	Caliza azulosa, masiva	d	//	-	63,30	-	16.800,00	4.006,89	63,30	4,19	1,11	4,66	
	15	MDU7	Caliza gris dura masiva	d	//	-	57,50	-	10.500,00	3.306,25	57,50	5,90	1,06	6,28	
	16	MCU7	Caliza gris dura masiva	d	//	-	57,50	-	17.700,00	3.306,25	57,50	5,35	1,06	5,70	
	17	M4U9P48B	Caliza gris dura masiva	d	//	-	63,20	-	14.700,00	3.994,24	63,20	3,68	1,11	4,09	
	18	M4U9P48C	Caliza gris dura masiva	d	//	-	63,37	-	19.200,00	4.015,33	63,37	4,78	1,11	5,32	
	19	M7U9P48C	Caliza azulosa, masiva	d	//	-	63,27	-	14.700,00	4.002,67	63,27	3,67	1,11	4,08	
	20	M1U9P48	Caliza gris, dura, masiva con tonos rosados (alteración). Fragmentos fósiles	d	//	-	62,20	-	13.200,00	3.868,84	62,20	3,41	1,10	3,76	
21	MDU7	Caliza gris dura masiva	d	//	-	63,20	-	8.700,00	3.994,24	63,20	2,16	1,11	2,42	Inválido	
22	M11U9P48C	Caliza gris con cristales de calcita y algunos esporádicos de cuarzo	d	//	-	63,00	-	15.600,00	3.969,00	63,00	3,93	1,11	4,36		
23	M11U9P48E	Caliza gris con cristales de calcita y algunos esporádicos de cuarzo	d	//	-	63,00	-	11.700,00	3.969,00	63,00	2,95	1,11	3,27		
24	M10U9P48G	Caliza gris dura	d	//	-	63,00	-	14.400,00	3.969,00	63,00	3,63	1,11	4,03	Ensayo Inválido	
25	M2U9P48A	Caliza gris dura, masiva	d	//	-	63,20	-	10.500,00	3.994,24	63,20	2,63	1,11	2,92		
26	M3U9.1	Caliza gris dura masiva con tonos rosados (alteración). Fragmentos fósiles.	i	⊥	61,05	44,40	2.710,62	16.200,00	3.451,27	58,75	4,69	1,08	5,05		
27	M15U9	a gris dura masiva. Fragmentos de fósiles pequeños ret- pequeños retrabajados. Grietas de calcita fracturada.	i	⊥	50,23	56,40	2.832,69	10.200,00	3.606,69	60,06	2,83	1,09	3,07	Ensayo Inválido	
28	M2U7	Caliza gris dura masiva	i	⊥	75,65	59,40	4.493,61	9.300,00	5.721,44	75,64	1,63	1,20	1,96		
29	M8U9.1	Caliza gris oscura, dura, masiva, con granos de cuarzo Bioperturbada	i	⊥	63,60	49,40	2.647,84	12.000,00	3.371,33	58,06	3,96	1,07	3,81	Ensayo Inválido	
30	M4U9	Caliza gris, dura, masiva. Fragmentos fósiles. Bioperturbada	i	⊥	74,80	56,40	4.218,72	23.400,00	5.371,44	73,29	4,36	1,19	5,17		
31	M6U9.1	Caliza gris, dura, masiva con fragmentos fósi- les. Grietas rellenas de calcita.	i	⊥	66,35	46,80	3.105,18	18.600,00	3.953,64	62,88	4,70	1,11	5,22		
32	M3U7.1	Caliza gris dura masiva	i	⊥	66,45	54,50	4.711,53	29.700,00	5.996,90	77,45	4,95	1,22	6,03		
33	M13U9	Caliza gris dura, masiva con granos de calcita. Bioperturbada. Grietas rellenas de calcita.	i	⊥	60,35	51,95	3.135,10	19.200,00	3.991,04	63,10	4,81	1,11	5,34		
34	M6U7	Caliza gris dura masiva	i	⊥	54,35	51,95	2.823,40	13.000,00	3.594,97	69,96	3,84	1,09	4,17		
35	M3U7.2	Caliza gris dura masiva	i	⊥	58,20	50,90	2.962,38	22.500,00	3.771,82	61,42	5,97	1,10	6,54		
36	MKU7	Caliza gris dura masiva	i	⊥	66,78	51,60	4.477,59	13.200,00	5.701,04	75,51	2,32	1,20	2,79		
37	MJU7	Caliza gris dura masiva	i	⊥	59,30	61,10	3.623,23	18.000,00	4.613,24	67,92	3,90	1,15	4,48		
38	MHU7	Caliza gris dura masiva	i	⊥	61,18	50,10	3.064,87	26.100,00	3.902,31	62,47	6,69	1,11	7,39		
39	M1U9.1	Caliza gris masiva dura. Cristales de calcita	i	⊥	67,65	32,40	2.191,86	9.600,00	2.790,76	52,83	3,44	1,03	3,53		
40	M9U9.1	Caliza gris oscura masiva con grietas rellenas de calcita	i	⊥	47,38	44,00	2.080,10	16.800,00	2.648,47	51,46	6,34	1,01	6,43		

d= Diametral  
a= Axial  
b= Blique  
i= Irregular  
⊥= Perpendicular  
//= Paralelo

Tabla G.2 Resultados de Ensayo de Carga Puntual Para las Unidades 7 y 9

MUESTRA	R								
M10U4P51.3	26,00	M9U4P50	32,00	M6U4P50	24,00	M12U4P50	18,00	M8U4P51	22,00
	26,00		32,00		26,00		21,00		24,00
	28,00		32,00		26,00		23,00		30,00
	28,00		32,00		26,00		26,00		33,00
	28,00		33,00		26,00		27,00		33,00
	29,00		34,00		26,00		28,00		34,00
	29,00		34,00		26,00		28,00		34,00
	30,00		35,00		26,00		28,00		36,00
	30,00		35,00		28,00		29,00		36,00
	31,00		35,00		28,00		30,00		38,00
<b>PROM (RM)</b>	<b>28,50</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>33,40</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>26,20</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>25,80</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>32,00</b>
<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>35,72</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>41,17</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>33,15</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>32,71</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>39,62</b>

MUESTRA	R								
M11U4P50	16,00	M4U4.3	22,00	M4U4.1	18,00	M7U4P51	22,00	M5U4P51	22,00
	16,00		22,00		18,00		22,00		24,00
	18,00		22,00		18,00		23,00		24,00
	22,00		22,00		18,00		24,00		24,00
	22,00		22,00		20,00		24,00		24,00
	22,00		24,00		20,00		24,00		24,00
	22,00		24,00		22,00		28,00		25,00
	24,00		26,00		22,00		28,00		26,00
	24,00		26,00		24,00		28,00		26,00
	24,00		26,00		28,00		30,00		26,00
<b>PROM (RM)</b>	<b>21,00</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>23,60</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>20,80</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>25,30</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>24,50</b>
<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>27,36</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>30,26</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>27,14</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>32,15</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>31,26</b>

Tabla G.3 Resultados de Ensayo de Rebote de Schmidt Para La Unidad 4

MUESTRA	R	MUESTRA	R	MUESTRA	R	MUESTRA	R	MUESTRA
M6U9	20,00	M8U9	28,00	M6U9P48	28,00	M9U9.2	26,00	M7U9
	22,00		28,00		28,00		26,00	
	24,00		28,00		28,00		28,00	
	24,00		28,00		28,00		29,00	
	24,00		28,00		28,00		29,00	
	24,00		28,00		29,00		29,00	
	25,00		29,00		29,00		29,00	
	26,00		29,00		29,00		29,00	
	26,00		30,00		30,00		30,00	
	26,00		31,00		30,00		31,00	
<b>PROM (RM)</b>	<b>24,10</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>28,70</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>28,70</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>28,60</b>	<b>PROM (RM)</b>
<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>30,81</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>35,94</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>35,94</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>35,83</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>
MUESTRA	R	MUESTRA	R	MUESTRA	R	MUESTRA	R	MUESTRA
M9U9P48B	20,00	M1U7	23,00	MIU7	29,00	MLU7	24,00	MEU7
	22,00		23,00		30,00		26,00	
	22,00		24,00		31,00		26,00	
	22,00		24,00		32,00		26,00	
	22,00		24,00		32,00		26,00	
	22,00		24,00		33,00		27,00	
	22,00		24,00		34,00		29,00	
	24,00		24,00		34,00		29,00	
	24,00		25,00		34,00		29,00	
	26,00		27,00		35,00		30,00	
<b>PROM (RM)</b>	<b>22,60</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>24,20</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>32,40</b>	<b>PROM (RM)</b>	<b>27,20</b>	<b>PROM (RM)</b>
<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>29,14</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>30,93</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>40,06</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>	<b>34,27</b>	<b>EQUIVALENCIA (RL)</b>

Tabla G.4 Resultados de Ensayo de Rebote de Schmidt Para La Unidad 7 y 9

UNIDAD	MUESTRA	LONGITUD (cm)	DIAMETRO (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	PESO (g)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
4	M10U4P50	16,60	6,28	30,97	514,18	1367,00	2,66
	M10U4P51	2,85	6,30	31,17	88,84	227,10	2,56
	M11U4P50	10,82	6,31	31,30	338,72	893,20	2,64
	M11U4P50	3,05	6,30	31,21	95,18	249,50	2,62
	M11U4P51	7,12	6,34	31,57	224,78	508,30	2,26
	M12U4P50	1,96	6,35	31,67	62,07	161,40	2,60
	M12U4P50	15,80	6,34	31,60	499,32	1317,80	2,64
	M12U4P51	16,73	6,32	31,37	524,83	1421,30	2,71
	M13U4P51	17,49	6,33	31,47	550,41	1491,50	2,71
	M1U4P50	6,45	6,32	31,37	202,34	524,80	2,59
	M4U4P51	2,90	6,31	31,24	90,59	238,70	2,63
	M5U4P50	16,76	6,33	31,44	526,73	1414,70	2,69
	M6U4P50	8,65	6,32	31,37	271,36	702,90	2,59
	M6U4P50	3,00	6,35	31,70	95,11	244,10	2,57
	M8U4P51	2,75	6,31	31,24	85,91	229,40	2,67
	M8U4P51	15,85	6,33	31,47	498,80	1328,10	2,66
7	MAU7	18,09	6,33	31,47	569,29	1532,10	2,69
9	M2U9P48B	14,55	6,33	31,44	457,41	1218,40	2,66
	M5U9P48B	14,50	6,33	31,44	455,84	1216,20	2,67
	M6U9P48	13,28	6,33	31,47	417,76	963,00	2,31
	M9U9P48B	12,49	6,25	30,65	382,63	995,20	2,60
UNIDAD	MUESTRA	A (g)	B(g)	C(g)	E(cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	
4	M12U4P51.2	269,20	1284,10	1383,60	99,50	2,71	
	M13U4P51	165,80	692,00	754,70	62,70	2,64	
	M3U4P50	341,30	665,80	796,80	131,00	2,61	
	M11U4P50	167,20	754,60	817,60	63	2,65	
9	M11U9P48A	371,50	1304,00	1444,00	140,00	2,65	
	M11U9P48C	475,50	1301,10	1480,20	179,10	2,65	
	M4U9P48B	225,80	1306,20	1390,50	84,30	2,68	
	M5U9P48C	436,60	1302,40	1465,60	163,20	2,68	
	M6U9P48	208,30	1307,30	1384,90	77,60	2,68	
	M8U9P48C	279,10	1309,10	1413,60	104,50	2,67	
	M2U9P48	276,70	679,80	782,50	102,70	2,69	
	M4U9P48C	184,70	680,30	749,80	69,50	2,66	
	M3U9.1	210,00	682,10	761,20	79,10	2,65	
	M8U9.1	73,90	687,40	714,60	27,20	2,72	
	M8U9P48A	153,20	678,90	736,70	57,80	2,65	
	M15U9	193,10	684,80	757,40	72,60	2,66	
	M7U9P48E	105,60	677,40	717,10	39,70	2,66	
	M3U9.2	265,50	686,70	785,40	98,70	2,69	
	M11U9P48C.1	170,90	681,20	746,20	65,00	2,63	
	M10U9P48E	105,20	684,00	724,00	40,00	2,63	
7	MAU7B	207,40	1291,40	1371,00	79,60	2,61	
	MAU7C	289,20	1289,80	1398,60	108,80	2,66	
	MBU7.1	640,00	1286,60	1526,20	239,60	2,67	
	MBU7.2	457,20	1288,30	1458,30	170,00	2,69	
	MCU7.1	476,00	1299,00	1477,50	178,50	2,67	
	MCU7.2	474,20	1295,40	1473,30	177,90	2,67	
	MJU7.1	280,70	1294,20	1400,80	106,60	2,63	
	MJU7.2	138,40	1296,00	1349,20	53,20	2,60	
	MJU7.3	316,80	1293,10	1411,60	118,50	2,67	
	M3U7.2	421,60	1494,70	1653,74	159,04	2,65	
	MHU7	233,00	712,30	800,00	87,70	2,66	
	MGU7	186,70	713,50	781,30	67,80	2,75	
	M3U7.1	453,20	1392,30	1562,23	169,93	2,67	
	MKU7	374,10	1394,70	1533,90	139,20	2,69	
M2U7	424,90	1396,60	1554,70	158,10	2,69		
A Peso al aire							
E Peso al agua (Volumen de H <sub>2</sub> O Desplazado)							
B Peso del recipiente con agua							
C Peso del recipiente con agua + la muestra							

Tabla G.5. Resultados de Densidad en Unidades 4, 7 y 9

ESTERILES CON PARAFINA						
UNIDAD	MUESTRA	A (g)	D (g)	E(g)	F (g/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
9	M1ED	55,50	54,10	24,90	0,90	2,10
	M2ED	172,30	177,10	73,40	0,90	2,53
	M3ED	62,60	66,80	25,40	0,90	3,02
	M4ED	56,90	54,70	23,10	0,90	2,23
	M5ED	200,50	207,00	85,50	0,90	2,56
	M6ED	235,00	236,80	94,70	0,90	2,54
	M7ED	322,20	334,60	142,40	0,90	2,51
	M8ED	695,30	705,30	289,10	0,90	2,50
	M9ED	584,80	599,50	265,40	0,90	2,35
	M10ED	464,70	474,30	200,30	0,90	2,45
	M11ED	329,10	334,10	131,70	0,90	2,61
	M12ED	149,70	154,40	66,30	0,90	2,45
	M13ED	666,90	685,90	286,40	0,90	2,51
UNIDAD	MUESTRA	A (g)	D (g)	E(g)	F (g/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
9	M1EB	561,25	529,90	215,30	0,90	2,24
	M2EB	473,45	476,90	190,00	0,90	2,54
	M3EB	356,75	361,90	140,90	0,90	2,64
	M4EB	153,40	156,30	60,80	0,90	2,66
	M5EB	204,50	207,70	80,00	0,90	2,68
	M6EB	235,45	238,1	94,60	0,90	2,57
	M7EB	96,90	99,3	39,10	0,90	2,66
	M9EB	345,80	350,2	142,10	0,90	2,52
	M10EB	218,55	219	92,20	0,90	2,38
	M11EB	331,30	322,50	129,90	0,90	2,37
	M12EB	85,90	88,20	36,00	0,90	2,57
	M13EB	75,30	76,40	30,00	0,90	2,62
	M14EB	300,40	306,00	122,40	0,90	2,59
	M15EB	276,70	280,70	129,10	0,90	2,22
	M16EB	140,00	142,9	60,90	0,90	2,43
	M17EB	37,00	37,1	15,40	0,90	2,42
	M18EB	97,10	98,7	40,30	0,90	2,52
	M20EB	406,30	413,3	174,60	0,90	2,44
	M21EB	206,00	197,80	86,80	0,90	2,15
	M22EB	549,50	550,00	260,80	0,90	2,11
M23EB	194,80	200,30	86,60	0,90	2,42	
M24EB	266,80	275,10	115,10	0,90	2,52	
UNIDAD	MUESTRA	A (g)	D (g)	E(g)	F (g/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
9	M1EF	512,70	327,54	132,50	0,90	1,52
	M2EF	633,60	640,70	258,30	0,90	2,53
	M3EF	536,80	545,30	213,30	0,90	2,63
	M4EF	712,00	719,00	287,70	0,90	2,54
	M5EF	869,70	880,00	357,30	0,90	2,51
	M6EF	778,60	787,40	327,30	0,90	2,45
M10EF	495,50	518,30	213,60	0,90	2,63	
UNIDAD	MUESTRA	A (g)	D (g)	E(g)	F (g/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
3	M10EU3.1	241,20	248,00	103,50	0,90	2,51
	M10EU3.2	372,20	381,50	158,60	0,90	2,51
	M11EU3	212,90	216,50	144,40	0,90	1,52
	M11EU3.1	428,80	435,60	174,70	0,90	2,57
	M11EU3.2	327,60	332,30	132,20	0,90	2,58
	M12EU3.1	239,70	245,60	109,30	0,90	2,33
	M12EU3.2	206,20	210,60	92,50	0,90	2,35
	M12EU3.3	315,20	322,00	143,60	0,90	2,32
	M12EU3.4	339,60	346,30	154,70	0,90	2,31
	M13EU3.1	168,90	174,30	76,20	0,90	2,41
	M13EU3.2	268,80	276,20	119,20	0,90	2,42
	M1EU3.4	427,70	437,00	176,30	0,90	2,58
	M3EU3.1	296,20	302,30	124,40	0,90	2,52
	M3EU3.2	118,90	125,30	54,20	0,90	2,53
	M3EU3.3	128,20	133,30	56,60	0,90	2,52
	M3EU3.4	403,90	415,70	173,40	0,90	2,52
	M4EU3.2	608,40	619,20	248,40	0,90	2,57
	M5EU3	164,70	171,00	72,00	0,90	2,53
	M6EU3.1	300,20	307,20	126,50	0,90	2,53
	M6EU3.2	319,70	325,00	132,60	0,90	2,52
M7EU3	261,10	267,90	110,60	0,90	2,53	
M9EU3.1	289,40	293,10	119,70	0,90	2,50	
M9EU3.2	483,30	490,30	200,50	0,90	2,51	
A Peso, al aire, de la muestra seca						
D Peso, al aire de la muestra seca, con parafina						
E Peso, al agua de la muestra seca, con parafina						
F Peso específico de la Parafina						

Tabla G.6. Resultados de Densidad en muestras de estériles (Unidad 3 e intercalaciones de estériles Unidad 9). Uso de Parafina

ESTERILES SIN PARAFINA						
UNIDAD	MUESTRA	A (g)	B(g)	C(g)	E(cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
8	M4EU8	504,60	1273,80	1492,60	218,80	2,31
	M7EU8	598,80	1246,10	1498,40	252,30	2,37
	M10EU8	419,20	1263,30	1427,40	164,10	2,55
	M11EU8	502,40	1249,30	1450,80	201,50	2,49
	M12EU8	316,20	1097,70	1221,50	123,80	2,55
	M13EU8	363,90	1260,40	1400,40	140,00	2,60
	M1EU8P48.1	565,30	1258,30	1478,50	220,20	2,57
	M1EU8P48.2	573,50	1249,00	1471,70	222,70	2,58
	M2EU8P48	968,30	1150,00	1540,00	390,00	2,48
M3EU8P48	732,60	1254,90	1536,30	281,40	2,60	
<b>A</b>	<b>Peso al aire</b>					
<b>E</b>	<b>Peso al agua (Volumen de H<sub>2</sub>O Desplazado)</b>					
<b>B</b>	<b>Peso del recipiente con agua</b>					
<b>C</b>	<b>Peso del recipiente con agua + la muestra</b>					

Tabla G.7. Resultados de Densidad Unidad 8 (sin uso de parafina)