



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS  
VÍAS TERRESTRES**

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCA,  
MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN EN MATERIALES DE LA REGIÓN DE MORELIA.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS  
TERRESTRES**

**Presenta:  
Ing. Arturo Tosky Juárez.**

**Asesor:  
Dr. Carlos Chávez Negrete.**

**Co-asesor:  
Dr. Eleazar Arreygue Rocha.**

**MORELIA MICHOACÁN, FEBRERO DE 2012.**





## ÍNDICE.

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b> ....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO.....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	2
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>4</b>
2.1. CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA.....	4
2.1.1. LA TIERRA.....	4
2.1.2. CICLO GEOLÓGICO.....	4
2.1.3. CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA DE LAS ROCAS.....	6
2.1.3.1. Rocas ígneas.....	6
2.1.3.2. Rocas sedimentarias. ....	7
2.1.3.3. Rocas metamórficas. ....	8
2.2. INTEMPERISMO O METEORIZACIÓN. ....	10
2.2.1. PROCESOS EXTERNOS.....	10
2.2.2. METEORIZACIÓN FÍSICA - DESINTEGRACIÓN.....	11
2.2.2.1. Procesos más comunes de la desintegración.....	11
2.2.3. METEORIZACIÓN QUÍMICA – DESCOMPOSICIÓN .....	12
2.2.3.1. Agentes para meteorización química y sus efectos:.....	12
2.2.3.2. Factores de meteorización química.....	13
2.2.3.3. Procesos más comunes de la descomposición .....	13
2.2.4. METEORIZACIÓN BIOLÓGICA.....	14
2.2.4.1. Principales procesos de meteorización biológica.....	14
2.3. MECÁNICA DE ROCAS.....	15
2.3.1. MACIZO ROCOSO.....	15
2.3.2. MATRIZ ROCOSA.....	16
2.3.3. DISCONTINUIDADES.....	17
2.3.3.1. TIPOS DE DISCONTINUIDADES. ....	18
2.3.3.2. Características de las discontinuidades. ....	19
2.4. CRITERIOS DE ROTURA. ....	23
2.4.1. RESISTENCIA Y ROTURA.....	23
2.4.2. CRITERIOS DE RESISTENCIA.....	24
2.4.3. RESISTENCIA EN ROCAS.....	26
2.4.3.1. En rocas isotrópicas.....	26
2.4.3.2. En roca anisotrópica.....	26
2.4.4. ROTURA DEL MACIZO ROCOSO. ....	27
2.4.4.1. Criterio de rotura no lineal de Hoek y Brown. ....	27
2.4.4.2. Linealización del criterio de rotura de Hoek y Brown, a uno de rotura de Mohr-coulomb.....	30
2.4.4.3. Geological Strength Index (GSI) .....	32
2.4.5. ROTURA DE LA MATRIZ ROCOSA.....	33
2.4.5.1. Criterio de Mohr-Coulomb.....	34



2.4.5.2.	Criterio de Hoek y Brown.....	35
2.4.6.	RESISTENCIA AL CORTE DE DISCONTINUIDADES.....	37
2.4.6.1.	Resistencia en discontinuidades planas. ....	37
2.4.6.2.	Resistencia en discontinuidades dentadas.....	38
2.4.6.3.	Resistencia en discontinuidades rugosas.....	41
2.4.6.4.	Discontinuidades con relleno.....	44
2.5.	DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS PARA DETERMINAR, TANTO CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ ROCOSA COMO DE DISCONTINUIDADES PRESENTES EN EL MACIZO ROCOSO. ....	44
2.5.1.	ENSAYOS <i>IN SITU</i> .....	45
2.5.1.1.	Esclerómetro o martillo Schmidt. ....	45
2.5.2.	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	45
2.5.2.1.	Ensayo de densidad. ....	45
2.5.2.2.	Ensayo de absorción.....	47
2.5.2.3.	Ensayo de durabilidad (alterabilidad). ....	47
2.5.2.4.	Ensayo de intemperismo acelerado. ....	50
2.5.2.5.	Ensayo de carga puntual. ....	52
2.5.2.6.	Ensayo de compresión simple.....	56
2.5.2.7.	Ensayo de corte directo (aplicado a rocas). ....	57
2.5.2.8.	Ensayo de rozamiento (Tilt Test). ....	59
<b>3.</b>	<b>MARCO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>61</b>
3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA.....	61
3.1.1.	LOCALIZACIÓN.....	61
3.1.2.	GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE MORELIA. ....	62
3.1.3.	LUGARES DE MUESTREO.....	62
3.1.3.1.	El talud de La Paloma.....	62
3.1.3.2.	Tres Marías. ....	63
3.2.	DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES. ....	65
3.2.1.	ORIGEN DE LOS MATERIALES. ....	65
3.2.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	67
3.3.	ENSAYO DE LOS MATERIALES.....	68
3.3.1.	PROPIEDADES FÍSICAS.....	68
3.3.1.1.	Ensayo de Densidad y Absorción.....	68
3.3.1.2.	Ensayo de durabilidad.....	69
3.3.1.3.	Ensayo de intemperismo acelerado. ....	71
3.3.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS. ....	72
3.3.2.1.	Ensayo de esclerometría en campo. ....	73
3.3.2.2.	Ensayo de carga puntual. ....	73
3.3.2.3.	Ensayo de compresión simple.....	74
3.3.2.4.	Ensayo de corte directo.....	75
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS. ....</b>	<b>80</b>
4.1.	PROPIEDADES FÍSICAS. ....	80
4.1.1.	ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN.....	80
4.1.1.1.	La Paloma .....	80
4.1.1.2.	Tres Marías .....	81



4.1.2.	ENSAYO DE DURABILIDAD.....	84
4.1.2.1.	La Paloma .....	84
4.1.2.2.	Tres Marías .....	86
4.1.3.	ENSAYO DE INTEMPERISMO ACELERADO. ....	89
4.1.3.1.	La Paloma .....	89
4.1.3.2.	Tres Marías. ....	90
4.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	94
4.2.1.	ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA.....	94
4.2.1.1.	La Paloma. ....	94
4.2.1.2.	Tres Marías. ....	96
4.2.2.	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL.....	97
4.2.2.1.	La Paloma. ....	97
4.2.2.2.	Tres Marías. ....	98
4.2.2.3.	Ensayo de carga puntual en discontinuidades. ....	100
4.2.3.	ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE.....	104
4.2.3.1.	La Paloma. ....	104
4.2.3.2.	Tres Marías. ....	106
4.2.4.	ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	110
4.2.4.1.	La Paloma. ....	110
4.2.4.2.	Tres Marías. ....	119
4.3.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO CON EL CRITERIO DE BARTON Y CHOUBEY.....	131
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES. ....</b>	<b>134</b>
5.1.	LA PALOMA .....	134
5.2.	TRES MARÍAS .....	136
5.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	137
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS. ....</b>	<b>138</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS. ....</b>	<b>140</b>
7.1.	ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA.....	140
7.2.	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL.....	143
7.3.	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL – EN DISCONTINUIDADES.....	149
7.4.	ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	151
7.5.	CRITERIO DE BARTON Y CHOUBEY.....	163



## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura No. 1.- Esquema del ciclo de las rocas. (Martínez Pastor V., 2002) .....	5
Figura No. 2.- El ciclo de las rocas y factores que intervienen en el proceso. (Universidad Jesuita de Wheeling, 2005) .....	6
Figura No. 3.- Esquema de los tipos de metamorfismo. (Martínez Pastor V., 2002) .....	9
Figura No. 4.- Planos de esquistosidad. (Price, 1981; en Blyth and De Freitas, 1984) .....	19
Figura No. 5.- Bloque diagrama. (ISRM, 1981) .....	20
Figura No. 6.- Curva completa esfuerzo-deformación con los valores correspondientes a la resistencia de pico y a la resistencia residual. (González de Vallejo et al., 2002) .....	24
Figura No. 7.- Representación gráfica de un criterio de rotura general en dos dimensiones. (González de Vallejo et al., 2002) .....	25
Figura No. 8.- Criterio lineal de Mohr-Coulomb. (González de Vallejo et al., 2002) .....	25
Figura No. 9.- La resistencia de la roca varía en función del ángulo $\theta$ considerando. Una muestra de roca con superficies de laminación o esquistosidad presenta su mínima resistencia para planos de rotura correspondientes a planos de debilidad. (González de Vallejo L., 2002) .....	27
Figura No. 10.- Representación del criterio de rotura en términos bidimensionales. Modificada de Melentijevic, 2005. ....	28
Figura No. 11.- Método de la tangente y método de secante. (Puell Marín, et al., 2004) ....	30
Figura No. 12.- Método de bilinealización. (Puell Marín, et al., 2004) .....	31
Figura No. 13.- Método de regresión lineal y método de áreas equivalentes. (Puell Marín, et al., 2004) .....	32
Figura No. 14.- Envoltentes de Mohr.Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales a) y esfuerzos principales. b) Para un estado de esfuerzos situado por debajo de las rectas o envoltentes no se producirá la rotura. (González de Vallejo et al., 2002) .....	34
Figura No. 15.- Envoltentes de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b).Representación de las diferentes condiciones de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa. (González de Vallejo et al., 2002) .....	36
Figura No. 16.- a) Curvas esfuerzo tangencial – desplazamiento tangencial para discontinuidades planas.....	38
Figura No. 17.- Influencia del grado de rugosidad en la resistencia al corte de la discontinuidad. (González de Vallejo et al., 2002).....	38
Figura No. 18.- a) Curvas esfuerzo de corte – desplazamiento tangencial para discontinuidades rugosas. ....	39
Figura No. 19.- Representación del criterio lineal de Patton y del criterio no lineal de Landanyi y Archambault para estimar la resistencia de planos de discontinuidad rugosos en función de los esfuerzos normales actuantes.....	40
Figura No. 20.- Influencia de la rugosidad en la resistencia de las discontinuidades según la dirección de corte (Brown et al., 1977; en Brandy y Brown, 1985). ....	41
Figura No. 21.- Perfiles tipo para estimar el coeficiente de rugosidad JRC (Barton y Choubey, 1977). ....	43
Figura No. 22.- Esquema de la máquina de durabilidad. ....	48



Figura No. 23.- Escalas de clasificación de acuerdo al desgaste que presentan en el segundo ciclo. (ASTM D 4644-04) .....	49
Figura No. 24.- Determinación de las dimensiones de los fragmentos. (ASTM D 5731-05) .....	52
Figura No. 25.- Modo de falla de especímenes de roca. (ASTM D 5731-05) .....	53
Figura No. 26.- Localización de la ciudad de Morelia y sitios de muestreo. ....	62
Figura No. 27.- Vista satelital del talud de La Paloma. (Google Earth, 2010). ....	63
Figura No. 28.- Vista satelital de los accesos a la ciudad de Tres Marías donde se realizaron los muestreos. (Google Earth, 2010).....	63
Figura No. 29.- Vista panorámica del primer sitio de muestreo en los accesos a ciudad Tres Marías. ....	64
Figura No. 30.- Vista panorámica del segundo sitio de muestreo de los accesos a la ciudad de Tres marías. ....	65
Figura No. 31.- Carta minera INEGI E14-1, correspondiente a la ciudad de Morelia, Edo de México y Guanajuato. ....	66
Figura No. 32.- Procedimiento y equipo para las pruebas de densidad y absorción. ....	69
Figura No. 33.- Procedimiento y equipo para la prueba de durabilidad. ....	70
Figura No. 34.- Procedimiento y equipo para la prueba de intemperismo desarrollado. ....	72
Figura No. 35.- Lecturas con esclerómetro sobre el macizo rocoso.....	73
Figura No. 36.- Desarrollo y equipo de la prueba de carga puntual en muestras irregulares. ....	74
Figura No. 37.- Procedimiento y equipo que se utiliza en la prueba de compresión simple para cubos de roca de 5x5x5 cm. ....	75
Figura No. 38.- Elementos que integran la máquina de corte directo para rocas. ....	76
Figura No. 39.-Equipo y procedimiento para la prueba de corte directo.....	77
Figura No. 40.- Gráfica de densidad y valores promedio con líneas punteadas de la zona de La Paloma.....	81
Figura No. 41.- Gráfica de absorción y valores promedio con líneas punteadas de la zona de La Paloma.....	82
Figura No. 42.- Gráfica de densidad y valores promedio con líneas punteadas de la zona de Tres Marías. ....	83
Figura No. 43.- Gráfica de absorción y valores promedio con líneas punteadas de la zona de Tres Marías. ....	83
Figura No. 44.- Gráfica de porcentajes del índice de durabilidad y rangos de calidad de La Paloma para el 1er ciclo.....	85
Figura No. 45.- Gráfica de porcentajes del índice de durabilidad y rangos de calidad de La Paloma para el 2do ciclo. ....	85
Figura No. 46.- Gráfica de porcentajes del índice de durabilidad y rangos de calidad de Tres Marías para el 1er ciclo.....	86
Figura No. 47.- Gráfica de porcentajes del índice de durabilidad y rangos de calidad de Tres Marías para el 2do ciclo. ....	87
Figura No. 48.- Material de la zona de Tres Marías después de dos ciclos de ensayo de durabilidad. ....	88
Figura No. 49.- Clasificación tipo I, II y III de acuerdo a la norma ASTM 4644-04.....	88
Figura No. 50.- Representación gráfica de los valores obtenidos del ensayo de intemperismo acelerado correspondientes a la zona alta de La Paloma. ....	90
Figura No. 51.- Resultados del primer sitio de muestreo durante cinco ciclos de ensayo.....	91



Figura No. 52.- Resultados del ensayo de intemperismo acelerado del segundo sitio de muestreo. ....	92
Figura No. 53.- Muestras de los dos sitios de muestreo en el primer ciclo del ensayo de intemperismo acelerado. ....	93
Figura No. 54.- Muestras de los dos sitios de muestreo al final del quinto ciclo del ensayo. .	93
Figura No. 55.- Resistencias a compresión simple obtenidas mediante lecturas con esclerómetro en la zona de La Paloma. ....	95
Figura No. 56.- Resistencias a compresión simple obtenidas con esclerómetro de la zona de Tres Marías. ....	96
Figura No. 57.- Representación gráfica de resistencia a compresión simple del talud de La Paloma obtenidos del ensayo de carga puntual. ....	97
Figura No. 58.- Valores de resistencia a compresión simple del ensayo de a carga puntual de la zona de Tres Marías. ....	98
Figura No. 59.- Especímenes después de ser ensayados a carga puntual correspondientes a la zona de Tres Marías. ....	99
Figura No. 60.- Resistencias a compresión simple obtenidas del ensayo de carga puntual en discontinuidades de La Paloma. ....	100
Figura No. 61.- Muestras de prueba antes y después del ensayo. ....	101
Figura No. 62.- Resistencias a compresión simple de discontinuidades de la zona de Tres Marías. ....	102
Figura No. 63.- Muestras antes y después del ensayo de carga puntual. ....	103
Figura No. 64.- Cubos de 5x5x5 cm antes y después de la prueba, segunda discontinuidad, de la zona de La Paloma. ....	105
Figura No. 65.- Cubos de 5x5x5 cm antes y después de la prueba, tercera discontinuidad de la zona de La Paloma. ....	105
Figura No. 66.- Cubos de 5x5x5 cm antes y después del ensayo, discontinuidad 1 de la zona de Tres Marías. ....	106
Figura No. 67.- Cubo de 5x5x5 cm antes y después del ensayo, se obtuvo de la discontinuidad no. 2 de la zona de Tres Marías. ....	107
Figura No. 68.- Resistencias a compresión simple obtenidas de los ensayos de carga puntual, esclerometría y compresión simple de cubos de 5 x 5 x 5 cm de la zona de La Paloma. ....	108
Figura No. 69.- Resistencias a compresión simple obtenidas de los ensayos de carga puntual, esclerometría y compresión simple de cubos de 5 x 5 x 5 cm de la zona de la zona de Tres Marías. ....	108
Figura No. 70.- Esfuerzos cortantes – desplazamientos tangenciales de la discontinuidad no 1 de La Paloma. ....	110
Figura No. 71.- Imágenes en 3D y fotografía de la discontinuidad no. 1 de la zona de La Paloma. ....	111
Figura No. 72.- Envoltente de falla a partir de los esfuerzos normales y tangenciales de la discontinuidad no. 1 de La Paloma. ....	112
Figura No. 73.- Discontinuidad no. 1. antes de ser ensayada. ....	112
Figura No. 74.- Gráfica esfuerzo – deformación de la discontinuidad no.2 de la zona de La Paloma. ....	113
Figura No. 75.- Gráfica de deformaciones horizontales – deformaciones verticales obtenidas del ensayo de La Paloma. ....	114



Figura No. 76.- Superficies en 3D a partir de los perfiles para determinar el JRC. ....	114
Figura No. 77.- Envoltente de falla obtenida del ensayo de la discontinuidad no. 2 de la zona de La Paloma.....	115
Figura No. 78.- Discontinuidad no. 2 antes y después del ensayo.....	116
Figura No. 79.- Gráfica de esfuerzo - deformación y gráfica deformación horizontal- deformación vertical de la discontinuidad no. perteneciente a la zona de La Paloma....	117
Figura No. 81.- Envoltente de falla obtenida del ensayo de corte directo de la discontinuidad no. 3 de la zona de La Paloma.....	118
Figura No. 80.- Superficies en 3D a partir de perfiles para determinar el JRC.....	118
Figura No. 82.- Etapas de la discontinuidad antes y después de sr ensayada.....	119
Figura No. 83.- Gráfica de esfuerzo – deformación y gráfica de desplazamiento horizontal – desplazamiento vertical. ....	120
Figura No. 85.- Envoltente de falla obtenida del ensayo de corte directo para la discontinuidad no. 1 de la zona de Tres Marías. ....	121
Figura No. 84.- Superficie en 3D generadas a partir de perfiles para determinar el valor de JRC. ....	121
Figura No. 86.- Discontinuidad no. 1 antes y después del ensayo de corte directo. ....	122
Figura No. 87.- Gráfica esfuerzo – deformación de la discontinuidad no. 2 de la zona de Tres Marías. ....	123
Figura No. 88.- Gráfica donde se presentan las deformaciones horizontales y verticales obtenidas del ensayo de corte directo de la zona de Tres Marías.....	124
Figura No. 89.- Superficies en 3D y discontinuidad natural. ....	125
Figura No. 90.- Envoltente de falla generada a partir del ensayo de corte directo para la discontinuidad no. de la zona de Tres Marías.....	126
Figura No. 91.- Discontinuidad no. 2 antes y después del ensayo de corte directo. ....	127
Figura No. 92.- Gráfica esfuerzo – deformación y gráfica de desplazamiento horizontales – desplazamiento verticales de la zona de Tres Marías.....	128
Figura No. 94.- Envoltente de falla de la discontinuidad no. 3 obtenida del ensayo de corte directo de la zona de Tres Marías.....	129
Figura No. 93.- Superficie en 3D de la discontinuidad no. 3. ....	129
Figura No. 95.- Discontinuidad antes y después del ensayo de corte directo.....	130
Figura No. 96.- Envoltentes de falla pertenecientes a la zona de La Paloma.....	131
Figura No. 97.- Envoltentes de falla de la zona de La Paloma. ....	132
Figura No. 98.- Envoltentes de falla de la zona de Tres Marías.....	132
Figura No. 99.- Envoltentes de falla de la zona de Tres Marías.....	133



## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla No. 1.- Características y propiedades a describir en campo para la caracterización del macizo rocoso. (González de Vallejo et al., 2002) .....	16
Tabla No. 2.- Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación. (González de Vallejo et al., 2002) .....	17
Tabla No. 3.- Clasificación de discontinuidades en macizos rocosos. (González de Vallejo et al., 2002) .....	18
Tabla No. 4.- Descripción del espaciado (ISRM, 1981) .....	20
Tabla No. 5.- Descripción de la continuidad (ISRM, 1981) .....	21
Tabla No. 6.- Descripción de la abertura (ISRM, 1981) .....	22
Tabla No. 7.- Tabla de índices de campo para rocas (ISRM, 1981) .....	22
Tabla No. 8.- Descripción de las filtraciones (ISRM, 1981) .....	23
Tabla No. 9.- Valores de la constante $m_i$ para la matriz rocosa. (González de Vallejo L., 2002) .....	29
Tabla No. 10.- Determinación del índice geológico de resistencia, GSI. (Hoek y Brown, 1997) .....	33
Tabla No. 11.- Clasificación de la durabilidad en base al índice $I_{D2}$ . (González de Vallejo et al., 2002) .....	49
Tabla No. 12.- Clasificación de la durabilidad en base al índice $I_{D1}$ . (González de Vallejo et al., 2002) .....	50
Tabla No. 13.- Cantidad de reactivo empleado para preparar la solución de prueba. (SCT) .....	51
Tabla No. 14.- Valor de "C" generalizado. (ASTM D 5731-05).....	56
Tabla No. 15.- Valores de los ensayos de densidad y absorción de La Paloma. ....	80
Tabla No. 16.- Valores de los ensayos de densidad y absorción de la zona de Tres Marías. ....	81
Tabla No. 17.- Valores del ensayo de durabilidad de la zona de La Paloma.....	84
Tabla No. 18.- Valores del ensayo de durabilidad de la zona de Tres Marías. ....	86
Tabla No. 19.- Resultado del ensayo de intemperismo acelerado de la zona alta de La Paloma.....	89
Tabla No. 20.- Resultados del ensayo de intemperismo acelerado de la zona de Tres Marías. ....	91
Tabla No. 21.- Resistencias a compresión simple obtenidas con el esclerómetro en la zona de La Paloma.....	94
Tabla No. 22.- Resistencias a compresión simple obtenidas con el esclerómetro de la zona de Tres Marías. ....	96
Tabla No. 23.- Valores promedio de resistencia a compresión simple del talud de La Paloma obtenidos del ensayo de carga puntual.....	97
Tabla No. 24.- Valores promedio de resistencia a compresión simple obtenidos del ensayo de carga puntual de la zona de Tres Marías. ....	98
Tabla No. 25.- Valores promedio de resistencia a compresión simple obtenidas del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma. ....	100
Tabla No. 26.- Resistencias a compresión simple promedio de las discontinuidades de la zona de Tres Marías. ....	102
Tabla No. 27.- Resistencia a compresión de cubos de 5x5x5 cm correspondientes a La Paloma .....	104



Tabla No. 28.- Resistencia a compresión simple de cubos de 5x5x5 cm de la zona de Tres Marías. ....	106
Tabla No. 29.- Esfuerzos normal y cortante. ....	112
Tabla No. 30.- Esfuerzos normal y cortante. ....	115
Tabla No. 31.- Esfuerzos normal y cortante. ....	118
Tabla No. 32.- Esfuerzos normal y cortante. ....	122
Tabla No. 33.- Esfuerzos normal y cortante. ....	126
Tabla No. 34.- Esfuerzos normal y cortante. ....	130
Tabla No. 35.- Resumen de los criterios para determinar el ángulo de fricción y la cohesión. ....	131
Tabla No. 36.- Lecturas y cálculo del ensayo de esclerometría en la zona alta de La Paloma ....	140
Tabla No. 37.- Lecturas y cálculo del ensayo de esclerometría en la zona media de La Paloma ....	141
Tabla No. 38.- Lecturas y cálculo del ensayo de esclerometría en la zona baja de La Paloma ....	141
Tabla No. 39.- Lecturas y cálculo del ensayo de esclerometría en la zona de Tres Marías	142
Tabla No. 40.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma. ....	143
Tabla No. 41.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma. ....	144
Tabla No. 42.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma. ....	145
Tabla No. 43.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de Tres Marías. ....	147
Tabla No. 44.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma en discontinuidades. ....	149
Tabla No. 45.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de Tres Marías en discontinuidades. ....	150
Tabla No. 46.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo ....	151
Tabla No. 47.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo. .	152
Tabla No. 48.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo ....	153
Tabla No. 49.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo ..	154
Tabla No. 50.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo. ....	155
Tabla No. 51.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo .	156
Tabla No. 52.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo ....	157
Tabla No. 53.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo ..	158
Tabla No. 54.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo ....	159
Tabla No. 55.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo ..	160
Tabla No. 56.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo ....	161
Tabla No. 57.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo ..	162
Tabla No. 58.- Datos para el criterio de Barton y Choubey, de las discontinuidades en estudio. ....	163
Tabla No. 59.- Cálculo del criterio de Barton y Choubey para las discontinuidades de la zona de La Paloma.....	164



Tabla No. 60.- Cálculo del criterio de Barton y Choubey para las discontinuidades de la zona de Tres Marías. .... 165



## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo estudiará los materiales rocosos de la región de Morelia, realizando una caracterización de las discontinuidades en macizos rocosos de rocas representativas de la ciudad (andesita y riolita) en discontinuidades ya que son las que condicionan el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos.

Para realizar la caracterización se requerirá realizar ensayos In situ y en laboratorio. Los ensayos In situ medirán las propiedades de los macizos rocosos en su estado y condiciones naturales y los ensayos en laboratorio nos permitirán cuantificar las propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa que definen su comportamiento mecánico.

Primeramente se realizará la búsqueda y análisis de información referente al estudio de rocas e igualmente la búsqueda y análisis de información correspondiente a la zona de estudio como son, datos geológicos, hidrológicos, uso de suelo, etc.

Se realizará y estudiarán los materiales de la región caracterizando los materiales y las discontinuidades que estudiemos. Para ello, se obtendrán mediante ensayos In situ y de laboratorio, la aplicación de criterios y correlaciones empíricas. Los ensayos que se emplearán serán pruebas para determinar las propiedades físicas y mecánicas.

Para determinar las propiedades físicas se realizará ensayo de durabilidad, ensayo de densidad, ensayo de absorción y ensayo de intemperismo acelerado. Para las propiedades mecánicas se realizarán ensayos de corte directo, ensayo con esclerómetro en superficies planas de la matriz rocosa, ensayo de compresión simple y ensayo de carga puntual.

Finalmente se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos y se determinará la calidad de los materiales que determinará la estabilidad de los taludes estudiados, y determinaremos si las inclinaciones son o no son susceptibles de falla en esas zonas de estudio.

Los fenómenos de inestabilidad de taludes (tanto en rocas como para suelos) tienen una importante repercusión económica dado que los daños que se producen son importantes, ya que genera costos de reparación, personal, maquinaria, etc., que no son contemplados a primera instancia por no considerar la inestabilidad que se pudiera presentar en un talud.



Además de daños económicos, cabe mencionar que en ocasiones se presentan casos desafortunados en los que hay pérdidas de vidas humanas debido a estas inestabilidades.

Por lo cual es de suma importancia generar conocimiento para que los ingenieros viales cuenten con las herramientas necesarias para diseñar y ejecutar acciones que contribuyan a prevenir y asegurar el bienestar de los caminos para que la operación vehicular sea segura y eficiente.

### **1.1. OBJETIVO.**

La finalidad de estudiar los macizos rocosos es conocer y predecir el comportamiento de los materiales rocosos de la región de Morelia, ante la actuación de fuerzas internas y externas que se ejerzan sobre ellos, mediante la caracterización de la matriz rocosa y el comportamiento de discontinuidades rugosas. Con esta información se podrá determinar si los taludes estudiados en ciertas zonas son susceptibles a falla o no, para que los que se pretendan construir dentro de la localidad de Morelia y cerca de las zonas de estudio no sean inestabilidades.

Se construirá y utilizará una máquina de corte directo para determinar el ángulo de fricción básico de los materiales a estudiar.

### **1.2. JUSTIFICACIÓN**

En lo que respecta a la zona de estudio, Morelia, se describe a continuación su orografía para entender el porqué y la importancia del desarrollo del presente tema.

La superficie del municipio de Morelia es muy accidentada, ya que se encuentra sobre el Eje Neovolcánico Transversal, que atraviesa el centro del país, de este a oeste. En el municipio se encuentran tres sistemas montañosos: por el Este diversas montañas que forman la sierra de Otzumatlán o mil Cumbres y las cuales se extienden desde el Norte hacia el Suroeste, destacando el cerro "Peña Blanca" (2760 msnm) y el "Punhuato" (2320 msnm), que marca el límite oriental de la ciudad de Morelia, así como el cerro "Azul" (2625 msnm) y el cerro "Verde" (2600 msnm) un poco más hacia el sureste. Por lo tanto esta ciudad se encuentra, en su mayoría, sobre un material poco estudiado en cuanto a la caracterización y entendimiento de su comportamiento. Se generará una pequeña base de datos sobre el material de la región.

Cabe mencionar que dentro de la bibliografía para llevar a cabo la construcción de taludes en México, se encuentra lo referente al Manual de Proyecto



Geométrico de la SCT, en el capítulo IX – Sección Transversal, apartado 9.2.4.- Taludes, se encuentra la tabla 9-D. (taludes recomendables en cortes), esta tabla muestra diferentes tipos de inclinación para un talud determinado, dependiendo del material y la altura con la que se vaya a proyectar, sin embargo, no se toma en cuenta las distintas condiciones en las que se encuentre el material (meteorización, grado de fracturación, etc.), siendo esta información muy general sin tomar en cuenta las condiciones y los factores internos y externos que actúan en los macizos rocosos.



## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA.

#### 2.1.1. LA TIERRA.

La Tierra es un complejo sistema integrado por la geosfera, la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera, que interaccionan e intercambian energía. Estos intercambios de energía dan lugar a numerosos procesos geológicos endógenos (agentes geológicos internos, energía interna de la Tierra) y exógenos (agentes geológicos externos, energía procedente del Sol) en los que el relieve terrestre y las rocas que lo constituyen se forman, se transforman y se destruyen. Todos estos cambios se explican en el llamado ciclo de las rocas o ciclo litológico o geológico.

***“Las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes que habitualmente se consideran un sistema continuo. La proporción de diferentes minerales, la estructura granular, la textura y el origen de la roca sirven para su clasificación geológica.”***(González de Vallejo *et al.*, 2002).

Un criterio ampliamente extendido en Ingeniería geológica para definir los límites entre un suelo y una roca es mediante el valor de la resistencia a compresión simple, o máximo esfuerzo que soporta una probeta antes de romper al ser cargada axialmente en laboratorio. Los límites sugeridos por diferentes clasificaciones y autores han ido variando de 1 ó 1.25 MPa debido a que rocas muy blandas presentan resistencias de este orden. (Martínez Pastor V., 2002)

Existen tres clases principales de rocas, clasificadas de acuerdo a la forma en que se originaron, primero encontramos las rocas ígneas, formadas a partir del enfriamiento del magma. Con el tiempo, los distintos procesos de meteorización y erosión de las rocas dan lugar a partículas que pueden asentarse, luego son comprimidas y cimentadas dando lugar a las rocas sedimentarias. Si estas rocas son enterradas, calentadas y altamente comprimidas, se transformarían en rocas metamórficas. Si estas rocas siguen siendo calentadas y comprimidas hasta el punto en que se funden, entonces la roca fundida podría eventualmente formar otra roca ígnea. Esto se conoce con el nombre del ciclo de las rocas o ciclo geológico.

#### 2.1.2. CICLO GEOLÓGICO.

Como se ha visto, las rocas son materiales sólidos que hacen parte fundamental de la superficie terrestre de la tierra. Las rocas se pueden clasificar atendiendo a

---

sus propiedades, como la composición química, la textura, la permeabilidad, entre otras. En geología las rocas se clasifican debido a sus orígenes en ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Estas clasificaciones se dan a su vez por que las rocas están sometidas a continuos cambios por las acciones de los agentes geológicos que se llevan a cabo en el interior y exterior de la estructura terrestre por lo que son llamados los ciclos geológicos.

El ciclo de las rocas se resume en la Figura No. 1 y Figura No. 2 y en los siguientes pasos para su descripción:

1. Formación de una cordillera por el choque de dos placas tectónicas.
2. Las altas temperaturas generan magmas.
3. Los magmas se enfrían y solidifican originando las rocas ígneas.
4. Las aguas superficiales, las aguas marinas, el hielo, el viento, etc., erosionan los relieves terrestres.
5. Los productos de la erosión son transportados hasta el océano, forman las cuencas sedimentarias.
6. Se depositan capas de sedimentos.
7. En zonas profundas, los sedimentos se transforman en rocas sedimentarias.
8. La convergencia de placas genera fuertes presiones y temperaturas que transforman las rocas ígneas y sedimentarias en rocas metamórficas.
9. El choque de placas origina una nueva cordillera con rocas de todos los tipos.

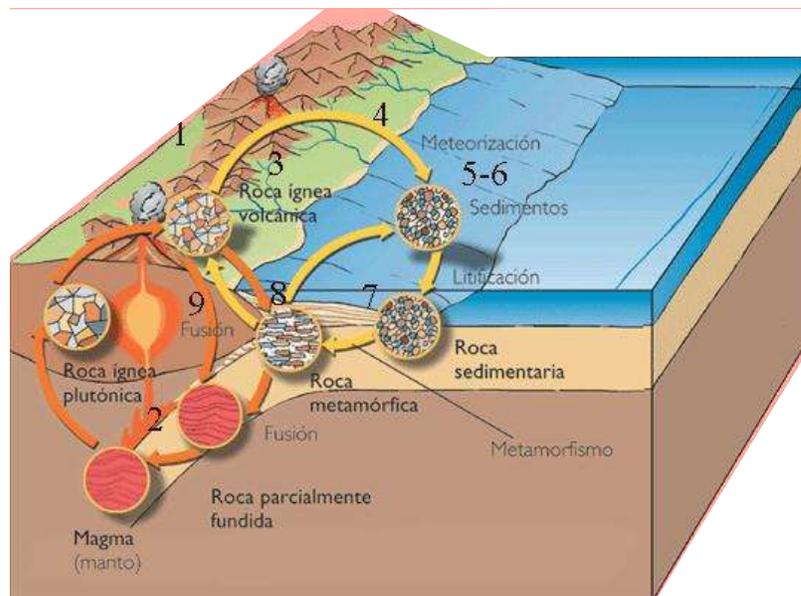


Figura No. 1.- Esquema del ciclo de las rocas. (Martínez Pastor V., 2002)

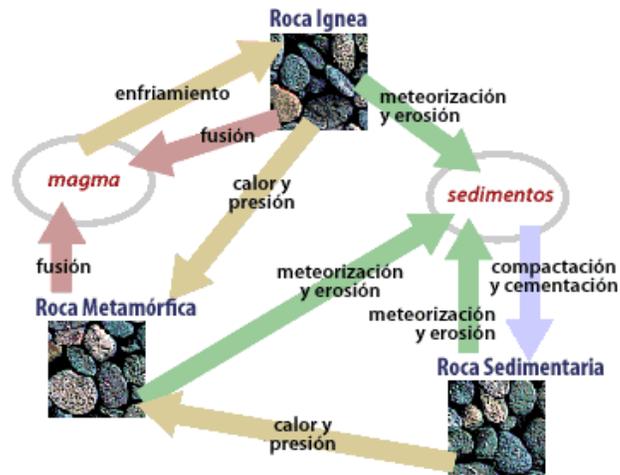


Figura No. 2.- El ciclo de las rocas y factores que intervienen en el proceso. (Universidad Jesuita de Wheeling, 2005)

### 2.1.3. CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA DE LAS ROCAS.

#### 2.1.3.1. Rocas ígneas

Las elevadas temperaturas del interior de la geosfera pueden provocar la fusión de las rocas en algunas zonas profundas y formar magmas.

Los magmas son masas de minerales fundidos, generalmente de composición silicatada (que tienen Silicio, Si, y oxígeno, O<sub>2</sub>, SiO<sub>3</sub>), que contienen algunos cristales sólidos y gases (sobre todo, vapor de agua). (Martínez Pastor V., 2002)

Los magmas tienden a ascender a la superficie debido a las grandes presiones a los que están sometidos y a que, al estar fundidos, son menos densos que las rocas sólidas que van atravesando, llamadas rocas encajantes. Con el paso del tiempo, el magma se enfría; los minerales cristalizan y se forman las rocas ígneas o magmáticas.

- Tipos de rocas ígneas.

Según el lugar donde se consolida el magma las rocas ígneas se clasifican en:

- Rocas intrusivas o plutónicas. Se originan cuando el magma se enfría lentamente en el interior de la geosfera. Las rocas intrusivas suelen desarrollar cristales grandes y bien formados.
- Rocas extrusivas o volcánicas. Se generan cuando el magma alcanza la superficie terrestre y se transforman en lava. Se enfría rápidamente, por lo que solo se forman cristales muy pequeños. A veces, no llegan a cristalizar y se originan los vidrios volcánicos.



- Principales rocas ígneas.

Intrusivas.

- Granito.
- Sienita.
- Peridotita.
- Pegmatita.
- Pórfido cuarcífero.
- Aplita.

Extrusivas.

- Basalto.
- Andesita.
- Vidrios volcánicos.

### **2.1.3.2. Rocas sedimentarias.**

Son rocas formadas en un ambiente exógeno (exterior), por desechos provenientes de otras rocas. Estas pueden ser de origen: a) químico, b) orgánico, o bien c) detrítico (descomposición de una masa sólida en partículas). En este tipo de roca se encuentran diferentes tipos de fósiles de plantas y animales.

El cemento en las rocas se ha formado por precipitación de aguas cargadas de agentes químicos, y por cristalización de minerales debido a altas presiones. Los tipos de cementos naturales son: arcillas, sílice, carcáreo; de los cuales el de sílice es el que tiene mejor resistencia y calidad. (Martínez Pastor V., 2002)

- Formación de las rocas sedimentarias.
  - Por deposición de restos provenientes de la desintegración de las rocas preexistentes.
  - Por la precipitación de sales inorgánicas contenidas en el agua.
  - Por la deposición de sustancias orgánicas (vegetales y animales).
  - Por la condensación de gases que contienen partículas minerales.
- Compactación de las rocas sedimentarias
  - Cuando un depósito queda enterrado por la acumulación de nuevos materiales depositados, tiene lugar un asentamiento local bajo la carga, con expulsión del exceso de agua. Finalmente se establece una ligazón o se



fortalece la que ya existía y el sedimento adquiere un grado apreciable de solidez.

- Por la compactación, el agua es expulsada y las partículas individuales quedan más juntas por el peso sobreyacentes de los sedimentos.
  - La cementación es un proceso por el cual la materia mineral llevada en solución por las aguas subterráneas, se deposita en granos para mantenerlos unidos. Entre muchas de las sustancias que cementan a las rocas sedimentarias se incluyen el carbonato de calcio (cemento calcáreo) y la sílice (cemento silicio), así como cantidades menores de óxidos de hierro (cemento de ferruginos), arcilla y yeso.
- Principales rocas sedimentarias.
- Conglomerado.- Los intersticios entre los quijarros suelen rellenarse con arena o con materiales más finos. Las aguas que circulan a través de depósitos de grava pueden precipitar sílice, carbonato de calcio y óxidos de hierro, que actúan como cemento, para ligar las partículas de grava entre sí y formar conglomerados. Un contenido de tipo arcilloso puede endurecerse por compactación y deshidratación y constituir un material de cementación.
  - De granos gruesos y fragmentos de rocas bien redondeados, de textura detrítica o plástica. La grava cementada se llama conglomerado, el tamaño de los fragmentos varían ampliamente cuando la grava es cascajo sin desgastar relativamente, con aristas agudas y puntiagudas se denomina brecha sedimentaria.
  - Arenisca.- Los granos gruesos, finos o medianos, bien redondeados; de textura detrítica o plástica.

### **2.1.3.3. Rocas metamórficas.**

- El metamorfismo

En las zonas profundas de la litosfera y en los bordes de las placas, los valores de la presión y de la temperatura son muy diferentes de los que existen en la superficie. En estas condiciones de presión y temperatura, las rocas experimentan una serie de cambios, que reciben el nombre de metamorfismo, y se transforman en unas nuevas rocas que se llaman rocas metamórficas.

- Factores del metamorfismo

Los cambios que se producen en el metamorfismo están condicionados por dos factores: las presiones elevadas y las temperaturas altas.

Las presiones elevadas. Pueden ser originadas por el empuje de las dos placas que colisionan en un borde convergente, o por el peso de las rocas. La intensidad de estas últimas aumenta con la profundidad.

Las temperaturas altas. Pueden deberse a la proximidad de magmas o a la profundidad (la temperatura aumenta con la profundidad debido a la energía interna de la Tierra).

- Tipos de metamorfismo

En función de los factores que intervienen en el metamorfismo, se distinguen dos tipos como se muestra en la Figura No. 3:

- Metamorfismo dinamotérmico. Se produce en zonas amplias donde convergen dos placas tectónicas. Las rocas se transforman por presiones y temperaturas elevadas.
- Metamorfismo térmico. Se debe a las altas temperaturas que suministran los magmas. Alrededor del fundido se forma una aureola de rocas metamórficas. (Martínez Pastor V., 2002)

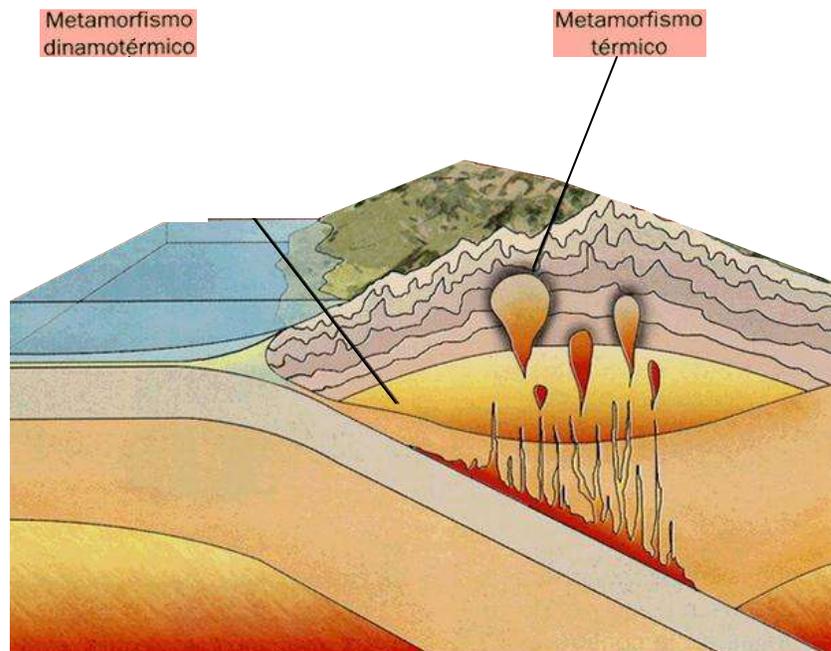


Figura No. 3.- Esquema de los tipos de metamorfismo. (Martínez Pastor V., 2002)

Principales rocas metamórficas.

- Pizarra.
- Filita.



- Mármol.
- Esquisto,
- Gneis.
- Cuarzita.

## **2.2. INTEMPERISMO O METEORIZACIÓN.**

Intemperismo o meteorización es la alteración de los materiales rocosos expuestos al aire, la humedad y al efecto de la materia orgánica; puede ser intemperismo mecánico o de desintegración, y químico o de descomposición, pero ambos procesos, por regla general interactúan. Las variaciones de humedad y temperatura inciden en ambas formas de intemperismo toda vez que afectan la roca desde el punto de vista mecánico, y que el agua y el calor favorecen las reacciones químicas que la alteran.

Distintos factores ambientales físicos y químicos atacan a las rocas y las cuartean, disgregan y descomponen, y según el carácter de los factores que produzcan la meteorización se distinguen la meteorización física y la meteorización química.

### **2.2.1. PROCESOS EXTERNOS**

Estos procesos comprenden la meteorización, erosión, transporte y deposición. Para el transporte la energía potencial que provee la gravedad se transforma en cinética. Otra fuente de energía es el Sol responsable del movimiento del aire y formación de lluvias. A la denudación o acción niveladora se oponen otras fuerzas internas que emergen los continentes.

La faz de la Tierra cambia, es dinámica, pues hay dos factores principales que dan forma al terreno: los procesos constructivos que crean accidentes orográficos nuevos y las fuerzas destructivas, como la erosión, que van desgastándolos poco a poco.

Muchas rocas y minerales se forman en profundidad, dentro de la corteza terrestre, donde la temperatura y presión son notablemente diferentes a las que se registran en la superficie. Así, los materiales formados en el interior de la corteza se encuentran en desequilibrio con respecto a las condiciones superficiales. La meteorización involucra entonces a todos los procesos que tienden a poner a las rocas y a los minerales en equilibrio con los ambientes que se encuentran en o cerca de la superficie de la Tierra.

La meteorización es el primero de los procesos que opera en un ciclo sedimentario. Sus productos sólidos o detríticos y iónicos son la fuente principal de



los materiales que, como consecuencia de la erosión, transporte y depositación/precipitación, pasarán a formar parte de las rocas sedimentarias. Los productos de la meteorización contribuyen también a la formación de los suelos, proveen los componentes detríticos de los mismos y muchos de los nutrientes asimilados por las plantas.

## **2.2.2. METEORIZACIÓN FÍSICA - DESINTEGRACIÓN**

Consiste en la desintegración de las masas de rocas y de los minerales por procesos mecánicos. Los esfuerzos que conducen a la ruptura pueden provenir del interior de la masa rocosa o ser aplicados externamente. Los procesos más comunes de desintegración son el crecimiento cristalino, la insolación, el alivio de presión, y los procesos alternantes de humectación y desecación. Además, el debilitamiento de las rocas a causa de la desintegración genera abundantes superficies a lo largo de las cuales se vuelve mucho más efectiva la meteorización por procesos químicos.

### **2.2.2.1. Procesos más comunes de la desintegración.**

#### **a) Crecimiento cristalino.**

El crecimiento cristalino puede causar esfuerzos que conducen a la ruptura de la masa de roca. Este proceso ocurre a temperaturas normales de la superficie terrestre, por lo que las causas más comunes son el pasaje de líquido a sólido del agua y la precipitación de sales.

- **Crecimiento cristalino por gelifracción.**

El pasaje de agua en estado líquido a hielo implica un aumento de volumen de 9 %, lo que tiene un efecto de ruptura altamente eficiente (gelifracción), sobre todo cuando se alcanzan temperaturas inferiores a  $-5^{\circ}\text{C}$ , (Martínez Pastor V., 2002). El nuevo abastecimiento de agua penetra en el material a través de diaclasas y poros, el hielo actúa en forma semejante a una cuña, lo que hará progresar las disyunciones afectando sucesivamente el material.

- **Crecimiento cristalino por precipitación de sales.**

Por su parte, la cristalización de sales produce cambios volumétricos entre 1 y 5 %; este proceso ocurre más eficientemente en condiciones áridas y cálidas, (Martínez Pastor V., 2002), pero también sucede en regiones frías. La precipitación de sales por migración capilar de soluciones puede producirse en la superficie de



las rocas (eflorescencias), o en el interior a lo largo de fracturas o microfracturas (subflorescencia).

#### **b) Exfoliación por insolación**

Las rocas son muy pobres conductoras de calor, por lo que al ser calentadas por el sol la superficie expuesta se expande más que el interior. La sistemática repetición de este fenómeno de calentamiento genera un esfuerzo que conduce obviamente a la ruptura. El resultado es de una descamación concéntrica (similar a la de las sucesivas capas que forman las cebollas).

#### **c) Humectación y desecación.**

La reiteración de este proceso, en especial en minerales que son capaces de incorporar agua a su estructura, produce un efectivo proceso de desintegración por aumento del esfuerzo tensional.

#### **d) Alivio de presión**

Este proceso es muy efectivo cuando rocas generadas a profundidad y elevadas temperaturas se acercan a la superficie por denudación de la cobertura. La eliminación de la carga litostática produce una fracturación por expansión o dilatación de las rocas a lo largo de superficies aproximadamente paralelas a las del terreno.

### **2.2.3. METEORIZACIÓN QUÍMICA – DESCOMPOSICIÓN**

La meteorización química está estrechamente relacionada con el clima, ya que éste regula las condiciones de humedad y temperatura que son esenciales para controlar las reacciones químicas que conducen a la descomposición de los minerales. El clima tropical, caracterizado por elevadas temperaturas y disponibilidad de agua, produce procesos de descomposición que son 3.5 veces más intensos que los que ocurren en condiciones de clima templado. (Martínez Pastor V., 2002)

#### **2.2.3.1. Agentes para meteorización química y sus efectos:**

- **El Agua:** actúa como disolvente, agente hidratante y fuente de H<sup>+</sup>. Las reacciones químicas se producen en su mayoría en medio acuoso. Su capacidad como disolvente facilita el transporte de los iones resultantes del proceso de meteorización.



- **Oxígeno:** agente responsable de las reacciones de oxidación. Afecta intensamente a los iones polivalentes (ejemplo el hierro).

### 2.2.3.2. Factores de meteorización química.

- **Profundidad.** Los materiales de la superficie están más expuestos a las variaciones de temperatura y humedad y por consiguiente al aire y la materia orgánica.
- **La composición del mineral original.** Este es un factor que alude a la génesis y tipo de roca, a su textura. Por ejemplo, entre los metales el hierro se oxida más rápidamente y entre los silicatos, el cuarzo resiste más que otros. (Martínez Pastor V., 2002)
- **La temperatura y la humedad.** Son dos factores climáticos que condicionan la velocidad e intensidad de las reacciones químicas; la humedad favorece la producción de ácido carbónico, además de proveer otros ácidos de reacción. Las rocas se degradan por ciclos de humedecimiento y secado antes que por una humedad y temperaturas fijas; la intensidad en la variación de ambos factores es el aspecto fundamental.

### 2.2.3.3. Procesos más comunes de la descomposición

#### a) Disolución.

Es la forma más sencilla de ataque químico y consiste en disociar moléculas de rocas por ácidos como el carbónico y el húmico. Rocas solubles son las calizas y las evaporitas.

#### b) Carbonatación.

El  $\text{CO}_2$  del aire reacciona con el agua de lluvia formando el débil ácido carbónico que ataca químicamente la roca someténdola a una acción definitiva de largo plazo. (Martínez Pastor V., 2002)

Se produce al combinar el dióxido de carbono con ciertos minerales como el carbonato de calcio que se transforma en bicarbonato el primero es insoluble al agua pero el segundo no lo es, por lo que es arrastrado por ella.

#### c) Oxidación.

Consiste en la reacción química que se produce entre un mineral y el oxígeno. Ello implica la remoción de uno o más electrones del componente original, lo que favorece la formación de una estructura menos rígida y crecientemente inestable. Los óxidos son los productos comunes de la oxidación, y entre los más



importantes están los de hierro y aluminio donde es más visible por los colores rojizos y amarillentos del Oxido e hidróxido férrico, respectivamente.

#### **d) Reducción.**

Disminuir o perder oxígeno, lo contrario de oxidación. Algunos minerales al sufrir reducción provocan la alteración de la roca.

#### **e) Hidratación.**

Fragmentación de la roca como consecuencia del aumento de volumen producido por el agua de cristalización. Se explica porque algunos minerales pueden incorporar agua a su estructura cristalina, en proporción definida. Ej., yeso y anhidrita

#### **f) Hidrólisis.**

Consiste en la reacción química que se produce entre los iones de los minerales (químicamente una sal constituida por una base débil o un ácido débil) y los iones del agua ( $H^+$  y  $OH^-$ ), lo que conduce a la formación de nuevos componentes. Este proceso es el más efectivo en la alteración de minerales aluminosilicáticos debido a la presencia de cargas eléctricas en la superficie de los cristales.

### **2.2.4. METEORIZACIÓN BIOLÓGICA.**

Consiste en el proceso de transformación de las rocas y minerales por acción de los organismos, desde las bacterias a las plantas y animales. Estos procesos pueden ser de descomposición o de desintegración.

#### **2.2.4.1. Principales procesos de meteorización biológica.**

- **Bioturbación.** Es el proceso de ruptura por actividad orgánica que lleva a la fracturación y remoción de rocas, sedimentos o suelos.
- **Disolución.** Por la producción de  $CO_2$  debido a la respiración conduce a la formación de ácido carbónico y reducción de pH del medio.
- **Intercambio catiónico.** Reacciones por las cuales las plantas absorben nutrientes que pueden producir cambios en el pH, dado que por lo común se absorben cationes básicos y se elimina hidrógeno con la consecuente acidificación del medio.



- **Quelación.** Los procesos biológicos producen sustancias orgánicas denominadas quelatos que descomponen las rocas y los minerales por remoción de sus cationes metálicos.

Otro de los factores ambientales es el fisiográfico, en especial la topografía. En este caso, los afloramientos de rocas en regiones de relieve moderado (sierras bajas, colinas, lomadas) son los más susceptibles a la meteorización. En relación con el factor climático, tanto la ubicación latitudinal como la altura absoluta desempeñan roles fundamentales en la intensidad y en los tipos de procesos de meteorización.

### 2.3. MECÁNICA DE ROCAS

La finalidad de la mecánica de rocas es predecir y conocer el comportamiento de las rocas ante la presencia de fuerzas externas que modifiquen y alteren el comportamiento natural de las fuerzas internas que se ejercen en ellas, esto debido a que se desplanten, construyan o utilice este mineral para otros fines. Para ello es necesario conocer tanto sus propiedades físicas como mecánicas.

Las **propiedades físicas** controlan las características resistentes y deformacionales de la **matriz rocosa** (densidad, porosidad, permeabilidad, alterabilidad y dureza, por mencionar algunas), y son el resultado de la génesis, condiciones y procesos geológicos y tectónicos sufridos por las rocas a lo largo de su historia.

En el **comportamiento mecánico** de los **macizos rocosos** influyen las características geológicas (geología, estratigrafía, estructura geológica, discontinuidades tectónicas estados de esfuerzos *In situ*, etc.)

Para determinar estas propiedades se deben llevar a cabo ensayos tanto en el sitio de estudio (*In situ*), como en el laboratorio, con muestras representativas del lugar.

Los **ensayos *in situ*** miden las propiedades de los **macizos rocosos** en su estado y condiciones naturales y a escalas representativas.

Los **ensayos de laboratorio** permiten cuantificar las propiedades físicas y mecánicas de la **matriz rocosa**.

#### 2.3.1. MACIZO ROCOSO.

Las masas de rocas aparecen en la mayoría de los casos afectados por discontinuidades o superficies de debilidad que separan bloques de matriz rocosa (roca intacta) constituyendo en conjunto los **MACIZOS ROCOSOS**. Los planos de



discontinuidades hacen que la mecánica del medio rocoso presente un carácter discontinuo y anisotrópico.

Para el predecir el comportamiento del macizo rocoso deben estudiarse las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, tanto en campo como en el laboratorio.

A continuación en la Tabla No. 1, se indican las características y propiedades que se deben describir en campo, de la matriz rocosa y de las discontinuidades, para la caracterización del macizo rocoso.

*Tabla No. 1.- Características y propiedades a describir en campo para la caracterización del macizo rocoso. (González de Vallejo et al., 2002)*

Ámbito de estudio	Características o propiedades	Método	Clasificación
Matriz rocosa	Identificación	Observaciones de visu y con lupa	Clasificación geológica y geotécnica
	Meteorización	Observaciones de visu	Índices estándar
	Resistencia	Índices y ensayos de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
Discontinuidades	Orientación	Medida directa con brújula de geólogo	
	Espaciado	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Continuidad		
	Rugosidad	Observaciones y medidas de campo	Comparación con perfiles estándar
	Resistencia en paredes	Martillo Schmidt. Índices de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
	Abertura	Observaciones y medidas de campo	Índices estándar
	Relleno		
Filtración			
Macizo rocoso	Número de familias de discontinuidades	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Tamaño de bloque		
	Intensidad de fracturación		
	Grado de meteorización	Observaciones de campo	Clasificaciones estándar

### 2.3.2. MATRIZ ROCOSA.

Es el material exento de discontinuidades, o bloques de roca intacta que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente queda caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad.



Para la descripción y obtención de las propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa, se maneja la Tabla No. 2, donde se indican y agrupan las propiedades y los métodos para su determinación.

Tabla No. 2.- *Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación. (González de Vallejo et al., 2002)*

	Propiedades	Métodos de determinación
Propiedades de identificación y clasificación	Composición mineralógica	Descripción visual
	Fábrica y textura	Microscopia óptica y electrónica
	Tamaño de grano	Difracción de rayos X
	Color	
	Porosidad	Técnicas de laboratorio
	Peso específico	
	Contenido de humedad	
	Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad)	Ensayo de permeabilidad
	Durabilidad. Alterabilidad (índice de alterabilidad)	Ensayos de alterabilidad
Propiedades mecánicas	Resistencia a compresión simple	Ensayo de compresión uniaxial
		Ensayo de carga puntual
		Martillo Schmidt
	Resistencia a tracción	Ensayo de tracción directa
		Ensayo de tracción indirecta
	Velocidad de ondas sísmicas	Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio
	Resistencia (parámetros $c$ y $\phi$ )	Ensayo de compresión triaxial
Deformabilidad (módulos de deformación elástica estático o dinámico E,v)	Ensayo de compresión uniaxial	
	Ensayo de velocidad sísmica	

En el apartado, 2.5 Descripción de ensayos para determinar, tanto características de la matriz rocosa como de discontinuidades presentes en el macizo rocoso, se profundizará el manejo de la Tabla No. 2 para mejor comprensión.

### 2.3.3. DISCONTINUIDADES.

Son cualquiera de los planos de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa de un macizo rocoso. Generalmente la resistencia a la tracción de los planos es muy baja o nula. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte o en su caso, por la del material de relleno.

Las discontinuidades condicionan las propiedades del macizo rocoso y su comportamiento resistente, deformacional e hidráulico. A su vez imprimen un comportamiento discontinuo y anisotrópico, haciendo de éste, débil y susceptible



a falla. Son planos de alteración, meteorización y fractura, y permiten el flujo de agua en ellas (González de Vallejo *et al.*, 2002).

La presencia de varias familias de discontinuidades, con diferente orientación, define el grado de fracturación del macizo rocoso, y a su vez la forma y el tamaño de los bloques de matriz rocosa (Gonzales de Vallejo *et al.*, 2002).

La resistencia al corte de las discontinuidades es el factor más importante para determinar la resistencia de los macizos rocosos duros fracturados, para su estimación es necesario describir las características físicas y geométricas de los planos.

### 2.3.3.1. TIPOS DE DISCONTINUIDADES.

Las discontinuidades se han agrupado en dos grandes grupos, sistemáticas y singulares. **Sistemáticas**, cuando aparecen en familia, y **singulares**, cuando aparecen en un único plano que atraviesa el macizo rocoso. Las discontinuidades sistemáticas quedan referidas a una orientación media con respecto al total que se presenta en el macizo rocoso, a diferencia de las discontinuidades singulares, que requieren un estudio y tratamiento individual. (González de Vallejo *et al.*, 2002). La Tabla No. 3 se clasifica y subclasifica las discontinuidades, en sistemáticas y singulares, como en planares y lineales.

Tabla No. 3.- Clasificación de discontinuidades en macizos rocosos. (González de Vallejo *et al.*, 2002)

Discontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	Planos de estratificación Planos de laminación Diaclasas o juntas Planos de esquistosidad	Fallas Diques Discordancias
Lineales	Intersección de discontinuidades planares Lineaciones	Eje de pliegues

A continuación se describen algunos de estos tipos.

- **Diaclasas o juntas.** Son las más frecuentes y corresponde a superficies de fracturación y rotura de la roca, en las cuales no ha habido desplazamiento o si lo hubo fue muy pequeño. De acuerdo a su origen se distinguen tres tipos:
  - De origen tectónico, debido a plegamientos y fallas.
  - En rocas ígneas, por contracción durante o después de la expulsión de estas a la superficie.
  - De relajación, debido a la disminución de la carga litostática. Se presentan paralelas a la superficie topográfica y su persistencia disminuye con la profundidad.

- **Planos de estratificación.** Dividen en capas o estratos a las rocas sedimentarias, su separación puede variar de unos centímetros a unos metros. (González de Vallejo *et al.*, 2002)
- **Superficies de laminación.** Discontinuidades sistemáticas, aparecen en rocas sedimentarias, se caracterizan por un espaciado muy pequeño de orden milimétrico a centimétrico. (González de Vallejo *et al.*, 2002)
- **Planos de esquistosidad.** Son de origen tectónico, sufren una deformación importante de tipo compresiva, generándose las discontinuidades, perpendicular a la fuerza de acción de deformación. Su frecuencia es alta y están espaciadas al milímetro. (Figura No. 4.) (González de Vallejo *et al.*, 2002).

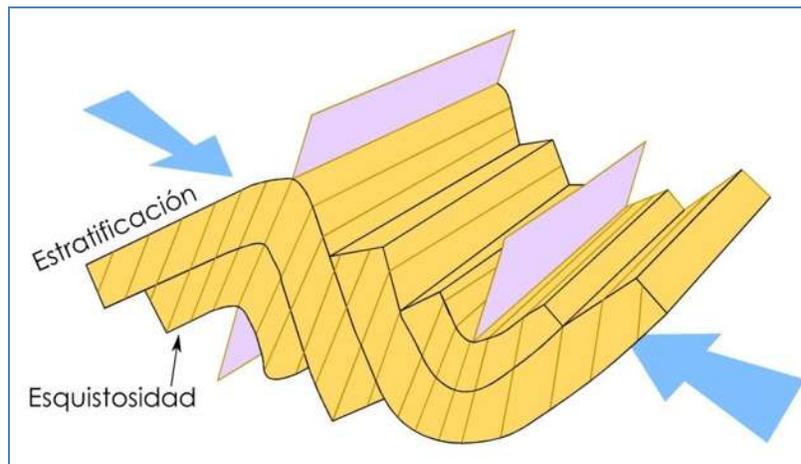


Figura No. 4.- Planos de esquistosidad. (Price, 1981; en Blyth and De Freitas, 1984)

- **Superficies de contacto litológico.** Son planos de separación entre diferentes litologías del macizo rocoso. (González de Vallejo *et al.*, 2002)
- **Fallas.** Son planos de rotura con desplazamiento entre los bloques, y pueden tener extensiones de considerable longitud de centenares de kilómetros. (González de Vallejo *et al.*, 2002)

### 2.3.3.2. Características de las discontinuidades.

Algunas de las características de las discontinuidades, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia de los planos de discontinuidad, por mencionar algunas que condicionan estos aspectos, se mencionan las siguientes: rugosidad, abertura, relleno y resistencia de las paredes. También hay que considerar la orientación, espaciado y filtraciones, que también intervienen en el comportamiento del macizo rocoso.

Se describirán algunos de estos parámetros para mejor entendimiento.

- **Orientación.** La orientación de una discontinuidad queda definida por su buzamiento y su dirección de buzamiento. Su medida se realiza mediante brújula con clinómetro y su representación gráfica puede realizarse mediante proyección estereográfica, diagramas de rosetas, bloques diagrama o símbolos en mapas geológicos. Los bloques diagrama representan tridimensionalmente la distribución de los planos, y se puede visualizar de forma sencilla la orientación de la fracturación con respecto a una estructura u obra, como se muestra en la Figura No. 5.

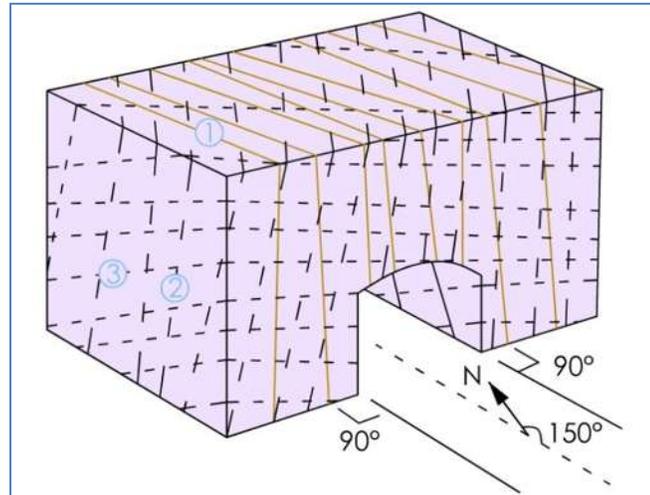


Figura No. 5.- Bloque diagrama. (ISRM, 1981)

**Espaciado.** Es la distancia media perpendicular entre los planos de discontinuidad entre una misma familia. Este parámetro define el tamaño de los bloques de matriz rocosa, entre menor sea su espaciado, menor será su resistencia y presentará mayor permeabilidad. La medida del espaciado se realiza con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de discontinuidades, al menos de tres metros. Como norma general, la longitud de medida debe ser unas diez veces superior al espaciado. La cinta debe colocarse perpendicularmente a los planos, registrándose la distancia entre discontinuidades adyacentes. Dependiendo del espaciado que se presente, a este se le asigna una clase de acuerdo a la Tabla No. 4.

Tabla No. 4.- Descripción del espaciado (ISRM, 1981)

Clase	Descripción	Espaciado (mm)
I	Extremadamente junto	< 20
II	Muy junto	20 - 60
III	Junto	60 - 200
IV	Moderadamente junto	200 - 600
V	Separado	600 - 2000
VI	Muy separado	2000 - 6000
VII	Extremadamente separado	> 6000



- **Continuidad.** Es la extensión del plano de discontinuidad. La medida de la continuidad se realiza con una cinta métrica. Las discontinuidades pueden o no terminar contra otra discontinuidad, debiendo indicarse en la descripción. Por lo general, las discontinuidades singulares, como las fallas y los diques, suelen ser muy continuas, y representan los mayores planos de debilidad en el macizo rocoso, por lo que deben ser caracterizadas y descritas con especial atención como se presenta en la Tabla No. 5

*Tabla No. 5.- Descripción de la continuidad (ISRM, 1981)*

Clase	Descripción	Longitud
I	Muy baja continuidad	< 1
II	Baja continuidad	"1 - 3"
III	Continuidad media	"3 - 10"
IV	Alta continuidad	"10 - 20"
V	Muy alta continuidad	> 20

- **Rugosidad.** Esta determina su resistencia al corte, entre más rugoso sea el plano de discontinuidad, mayor será su resistencia. Las irregularidades dificultan el desplazamiento tangencial de corte en la discontinuidad, también pueden controlar la dirección del desplazamiento.

El término rugosidad se emplea para hacer referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidad, como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala de los planos. La descripción de la rugosidad requiere dos escalas de observación:

- Escala decimétrica y métrica para la ondulación de las superficies: superficies planas, onduladas o escalonadas.
- Escala milimétrica y centimétrica para la rugosidad o irregularidad: superficies pulidas, lisas o rugosas.

Se estima de manera visual mediante perfiles lineales (perfiles estándar) y método de los discos.

- **Abertura.** Es la distancia entre las paredes de la discontinuidad, sin relleno, esta puede variar en diferentes zonas del macizo rocoso, puede ir reduciéndose en función de la profundidad, llegando hasta cerrarse.

Su medida se realiza con una regla graduada en milímetros. Cuando la separación es muy pequeña se puede emplear un calibre que se introduce en la abertura. Debe indicarse si la abertura presenta variaciones, realizándose



medidas a lo largo de 3 m, como mínimo. La descripción se realiza según le la Tabla No. 6.

*Tabla No. 6.- Descripción de la abertura (ISRM, 1981)*

Clase	Descripción	Abertura
I	Muy cerrada	< 0.1 mm
II	Cerrada	0.1 - 0.25 mm
III	Parcialmente cerrada	0.25 - 0.5 mm
IV	Abierta	0.5 - 2.5 mm
V	Moderadamente abierta	2.5 - 10 mm
VI	Ancha	> 1 cm
VII	Muy ancha	1 - 10 cm
VIII	Extremadamente ancha	10 > 100 cm
IX	Cavernosa	> 1 m

- **Resistencia de las paredes de la discontinuidad.** Su resistencia depende del tipo de matriz rocosa, del grado de alteración y de la existencia o no de relleno. En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma a la de la matriz rocosa, pero generalmente es menor debido a la meteorización de las paredes. Por este motivo, debe ser estimado el grado de meteorización.

La resistencia puede estimarse en campo con el martillo Schmidt, aplicándolo directamente sobre la discontinuidad, o a partir de índices de campo que se indican en la Tabla No. 7.

*Tabla No. 7.- Tabla de índices de campo para rocas (ISRM, 1981)*

Clase	Descripción	Identificación de campo	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
R0	Extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	(2.55 - 10.20)
R1	Muy blanda	Se desmenuza con el martillo, se talla con navaja.	(10.20 - 50.99)
R2	Blanda	Se marca con martillo cuesta tallar con navaja	(50.99 - 254.93)
R3	Moderadamente dura	No puede tallarse con navaja, se rompe con martillo	(254.93 - 509.85)
R4	Dura	Se requiere más de un golpe para romperla	(509.85 - 1019.70)
R5	Muy dura	Se requieren muchos golpes	(1019.70 - 2549.25)
R6	Extremadamente dura	Al golpear solo saltan esquirlas	> 2549.25

- **Relleno.** En ocasiones las discontinuidades presentan relleno de material blando arcilloso o con material rocoso de naturaleza distinta a la de las paredes. Las características del relleno pueden ser muy variables, sin embargo estas controlan el comportamiento de la discontinuidad. Las características



principales del relleno son su naturaleza, espesor, resistencia al corte y permeabilidad. (Gonzales-Vallejo, *et al.*, 2002)

- **Filtraciones.** El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en rocas sedimentarias puede haber también filtración a través de la matriz rocosa (permeabilidad primaria). Las observaciones respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto rellenas como limpias, se describen en la Tabla No. 8. (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Tabla No. 8.- Descripción de las filtraciones (ISRM, 1981)

Clase	Junta sin relleno	Junta con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. La junta aparece seca y no parece posible que circule agua	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua	Relleno húmedo pero sin agua libre
III	Junta seca pero con evidencia de haber circulado ocasionalmente agua	Relleno mojado con goteo ocasional
IV	Junta húmeda pero sin agua libre	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (l/min)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo, pero sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerablemente según canales preferentes (l/min y presión)
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min y la presión)	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas

## 2.4. CRITERIOS DE ROTURA.

### 2.4.1. RESISTENCIA Y ROTURA.

Los esfuerzos generados por la aplicación de fuerzas externas, pueden producir deformaciones y rotura, dependiendo de la resistencia de la roca y de otras características que presente el material rocoso.

La **resistencia** se define como el esfuerzo que la roca puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación. La *resistencia de pico*, ( $\sigma_p$ ), es el esfuerzo máximo que puede alcanzar la roca y se produce para cierta deformación a la que se denomina deformación de pico. La *resistencia residual*, ( $\sigma_r$ ), es el valor al que cae la resistencia de algunas rocas para deformaciones elevadas. Se produce después de sobrepasar la resistencia de pico, como se muestra en la Figura No. 6. (González de Vallejo *et al.*, 2002).

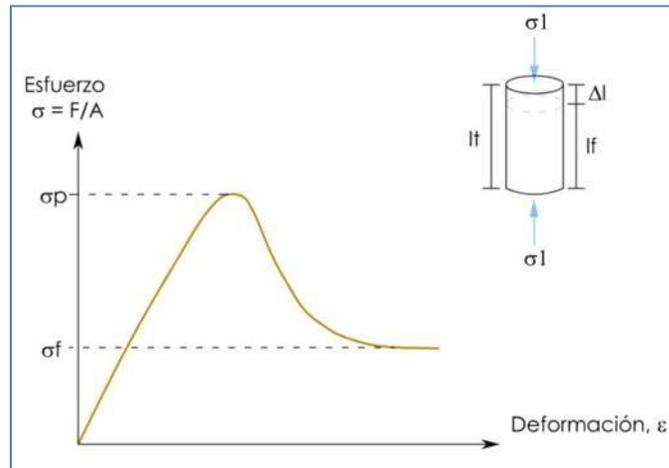


Figura No. 6.- Curva completa esfuerzo-deformación con los valores correspondientes a la resistencia de pico y a la resistencia residual. (González de Vallejo et al., 2002)

Hay que tomar en cuenta que en condiciones naturales, la resistencia depende de las propiedades intrínsecas de la roca, así como de la cohesión y ángulo de fricción, y de factores externos como la magnitud de las fuerzas que se ejercen, etc.

La **rotura** es un fenómeno que se produce al momento en que la roca no puede soportar las fuerzas que se están aplicando, alcanzando un esfuerzo máximo o de pico. Aunque no necesariamente al llegar a la rotura se ha llegado a la resistencia de pico, esto es una simplificación que se maneja. (González de Vallejo et al., 2002). Tampoco la rotura de la roca tiene por qué coincidir con el inicio de la generación de planos de fractura.

La **fractura** es la formación de planos de separación de la roca, rompiendo los enlaces de las partículas y crear nuevas superficies. (González de Vallejo et al., 2002). Se anulan las fuerzas cohesivas y permanecen las fuerzas friccionales.

#### 2.4.2. CRITERIOS DE RESISTENCIA.

El comportamiento mecánico de los materiales rocosos depende principalmente de su resistencia y de las fuerzas aplicadas, dando un determinado estado de esfuerzos. Sin embargo, hay que considerar que el comportamiento de las rocas no se puede predecir con facilidad debido a que estas están constituidas por diferentes materiales y aun en el caso de que fueran lo más homogéneas e isotrópicas posible, estas presentan variabilidad en sus propiedades físicas y mecánicas.

Por lo que para predecir de cierta forma su comportamiento, se emplean criterios de rotura y resistencia, obtenidos empíricamente a partir de ensayos de laboratorio. Estos criterios son expresiones matemáticas que representan modelos simples que permiten estimar la resistencia del material en base a los esfuerzos aplicados y a sus propiedades resistentes.

Los criterios de resistencia pueden ser desarrollados en términos de esfuerzo normal y tangencial, actuando en un plano, de acuerdo a la Figura No. 7.

$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3, K_i) \text{ ó } \tau = f(\sigma_n, K_i) \quad (1)$$

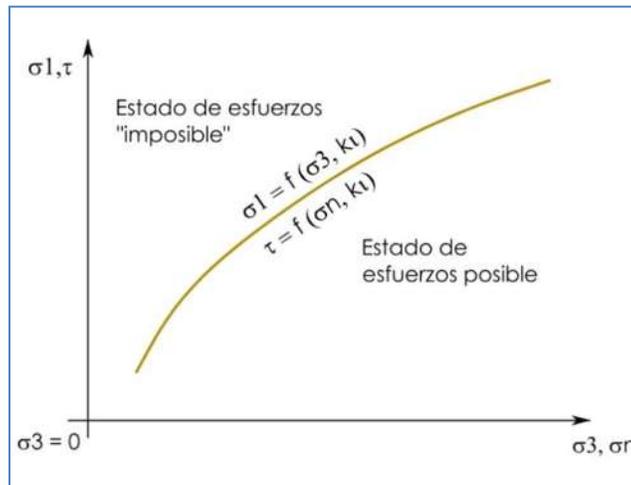


Figura No. 7.- Representación gráfica de un criterio de rotura general en dos dimensiones. (González de Vallejo et al., 2002)

De los criterios que considera la resistencia de pico del material, el más extendido de mecánica de rocas es el criterio de rotura lineal propuesto por Coulomb a fines del siglo XVIII, como se ilustra en la Figura No. 8. (González de Vallejo et al., 2002).

$$\tau = c + \sigma_n \text{tag}\phi \quad (2)$$

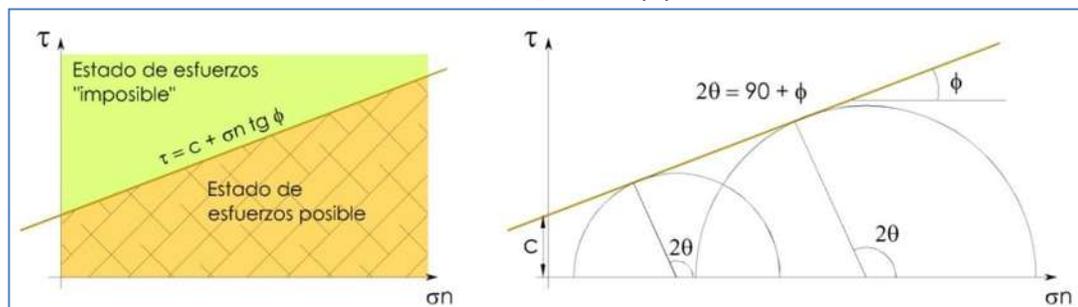


Figura No. 8.- Criterio lineal de Mohr-Coulomb. (González de Vallejo et al., 2002)



Donde “c” es la cohesión y “ $\phi$ ” el ángulo de resistencia interna del material. Este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado de triaxial de esfuerzos, obteniendo la relación lineal, entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes.

Las rocas, a diferencia de los suelos, no presentan un comportamiento lineal, por lo que los criterios lineales, a pesar de su ventaja de simplicidad, no son adecuados ya que pueden proporcionar datos erróneos al evaluar el estado de deformaciones de la roca. Por lo que el criterio de Mohr-Coulomb no se ajusta al comportamiento real de los materiales rocosos. Por lo tanto en mecánica de rocas son más adecuados los modelos no lineales, resultando una representación gráfica de la rotura del material rocoso en una curva cóncava.

### 2.4.3. RESISTENCIA EN ROCAS.

#### 2.4.3.1. En rocas isotrópicas.

Según el círculo de Mohr, la rotura se producirá en una dirección tal que  $2\theta = 90^\circ + \phi$  ó  $\theta = 45^\circ + \phi/2$ , sin embargo no siempre se cumple esto en los ensayos de laboratorio, debido a que la resistencia está en función de las fuerzas cohesivas y fricciónales de la roca; la cohesión es la fuerza de unión entre las partículas que forman la roca y el **ángulo de fricción interno**,  $\phi$ , es el **ángulo de rozamiento** entre dos planos de la misma roca (discontinuidad); este ángulo varía en la mayoría de las rocas entre  $25^\circ$  y  $45^\circ$ . (González de Vallejo *et al.*, 2002).

#### 2.4.3.2. En roca anisotrópica.

Su resistencia a la compresión para una misma fuerza, varía según el ángulo “ $\beta$ ” ( $\beta = 90 - \theta$ ) entre la dirección de los planos de anisotropía y la dirección de la carga aplicada. Figura No. 9. (González de Vallejo *et al.*, 2002).

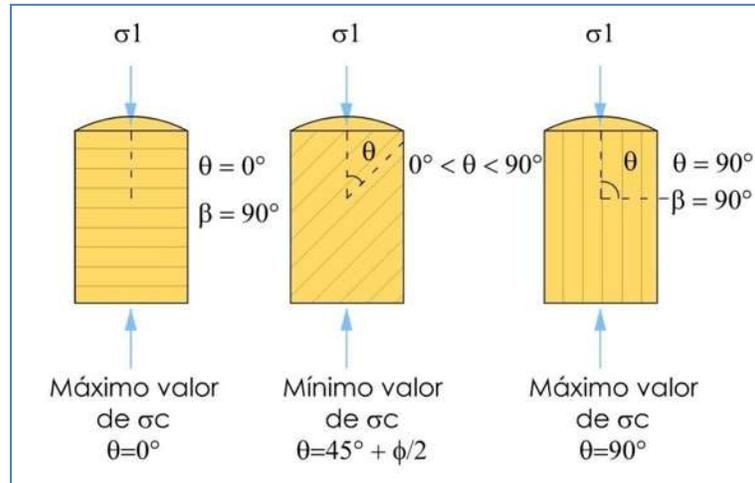


Figura No. 9.- La resistencia de la roca varía en función del ángulo  $\theta$  considerando. Una muestra de roca con superficies de laminación o esquistosidad presenta su mínima resistencia para planos de rotura correspondientes a planos de debilidad. (González de Vallejo L., 2002)

La dirección más desfavorable a la rotura corresponde al ángulo  $\theta = 45^\circ + \phi/2$ , ya que es la que opone menor resistencia o de cierta forma está a favor de la fuerza, sin embargo en los dos casos en que el ángulo  $\theta = 90^\circ$  y  $\theta = 0^\circ$ , ahí los esfuerzos tangenciales son nulos. (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Las rocas anisótropas son difíciles de ensayar por la variabilidad de su resistencia debido a los planos de anisotropía, por lo que se requiere numerosos ensayos para obtener parámetros representativos de resistencia.

## 2.4.4. ROTURA DEL MACIZO ROCOSO.

### 2.4.4.1. Criterio de rotura no lineal de Hoek y Brown.

El criterio de rotura de Hoek y Brown, su versión original fue introducida en el 1980, desde entonces su uso se ha generalizado en el ámbito de la mecánica de rocas, traspasando los límites para los que fue propuesto (diseño de excavaciones subterráneas en macizos rocosos). Debido a esto, y con el fin de mejorar el criterio, ha sufrido varias modificaciones así como la introducción de nuevos parámetros para definir el estado del material, y nuevas propuestas para obtener la caracterización del macizo, la última fue en 2002. (Hoek *et al.*, 2002).

Se trata de un criterio no lineal, puramente empírico, que permite valorar, de manera sencilla, la rotura de un medio rocoso mediante la introducción de las principales características geológicas y geotécnicas.

En la Figura No. 10 se representa los esfuerzos de rotura para el criterio de rotura de Hoek y Brown. En la Figura No. 10 se aprecia que la función que define el dominio elástico es no lineal. Los estados de esfuerzo encima de la curva están en rotura, mientras que los interiores están en el dominio elástico, y los estados de esfuerzo por encima de la curva son inaccesibles.

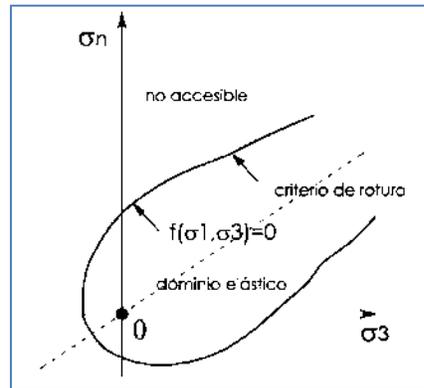


Figura No. 10.- Representación del criterio de rotura en términos bidimensionales. Modificada de Melentijevic, 2005.

El criterio de Hoek y Brown ha sufrido ligeras modificaciones en su formulación. De acuerdo con la última modificación (Hoek et al., 2002), es expresa a continuación:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3)$$

Donde:

- $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  = esfuerzos principales mayor y menor en el momento de la rotura.
- $\sigma_{ci}$  = resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.
- $m_b$ ,  $a$  y  $s$  = constantes que dependen de las propiedades del macizo rocoso de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$m_b = m_i \exp \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \quad (4)$$

$$s = \exp \frac{GSI - 100}{9 - 30} \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/30} \right) \quad (6)$$



Donde:

- $m_i$  = constante que depende de las propiedades de la matriz rocosa. Se obtiene a partir de ensayos triaxiales ó de la Tabla No. 9 según la litología que presente la roca en estudio.
- GSI = índice de resistencia geológica (Hoek y Brown, 1997). Similar en valor al índice RMR, (Bieniawski, 1976), cuando es mayor de 25. (Se explica más adelante en el apartado 2.4.4.3 esta clasificación).
- D = factor de alteración. Es un factor reductor de la resistencia, que depende del grado de alteración que haya sufrido el macizo rocoso por efecto de voladuras o por descompresión. Varía entre D=0, para macizos no alterados, hasta D=1 para los muy afectados. Los autores del criterio aportan una tabla para su estimación (Se presenta en los anexos).

Tabla No. 9.- Valores de la constante  $m_i$  para la matriz rocosa. (González de Vallejo L., 2002)

Tipo de roca y valor de la constante $m_i$				
Sedimentarias clásticas	Conglomerado	-22	Lutita	4
	Arenisca	19	Grauvaca	18
	Limolita	9		
Sedimentarias no clásticas	Caliza margosa	7	Caliza micrítica	8
	Brecha caliza	20	Yeso	16
	Caliza esparítica	10	Anhidrita	13
Metamórficas	Mármol	9	Gneiss	33
	Cuarcita	24	Esquisto	48
	Migmatita	30	Filita	10
	Anfibolita	(25 - 31)	Pizarra	9
	Milonita	-6		
Ígneas	Granito	33	Diorita	28
	Riolita	16	Andesita	19
	Granodiorita	30	Gabro	27
	Dacita	17	Basalto	17
Ígneas extrusivas piroclásticas	Aglomerado	20	Toba	15
	Brecha	18		

La aplicación de este criterio se restringe a un comportamiento isótropo de la roca y del macizo rocoso. Habrá que valorar en cada caso la influencia de una anisotropía del macizo rocoso, el tamaño del bloque respecto al tamaño de la excavación y el modo posible de fallo.

Una dificultad de este criterio es la envolvente de rotura que no es lineal, por lo que se genera una dificultad en el cálculo del factor de seguridad, por lo que se debe realizar una linealización previa de la envolvente y transformarla en una de tipo de Mohr-Coulomb.

#### 2.4.4.2. Linealización del criterio de rotura de Hoek y Brown, a uno de rotura de Mohr-coulomb.

Es habitual la linealización del criterio de rotura de Hoek y Brown para obtener una envolvente de rotura tipo Mohr-Coulomb equivalente. A continuación se presentan los distintos métodos de linealización del criterio de rotura de Hoek y Brown que permiten la obtención del ángulo de fricción y el valor de la cohesión.

##### a) Método de la tangente.

Método desarrollado por J. W. Bray y descrito en (Hoek, 1983, citado por Puell Marín et al., 2004), determina la resistencia al corte del terreno para un determinado estado de esfuerzos mediante la correspondiente envolvente de Mohr-Coulomb, tangente a la envolvente de rotura de Hoek y Brown, como se muestra en la Figura No. 11.

Es un método difícil de aplicar, debido a que los programas de cálculo suelen caracterizar el terreno mediante un ángulo de fricción y una cohesión constantes, en vez de hacerlo para una pareja de valores que varían en función del esfuerzo normal en cada punto.

##### b) Método de la secante.

Método descrito por Galera (1996, citado por Puell Marín et al., 2004), consiste en linealizar la envolvente de Hoek y Brown por medio de una secante que corta la envolvente en  $\sigma_3=0$  y en  $\sigma_3=\sigma_{ref.}$ , siendo  $\sigma_{ref.}$  la presión de confinamiento del macizo rocoso en estudio. Esto se ilustra en la Figura No. 11.

Este método respeta la resistencia a compresión simple del macizo rocoso, pero se trata de un criterio de linealización bastante conservador, debido a que la recta de rotura estimada queda por debajo de la envolvente de Hoek y Brown.

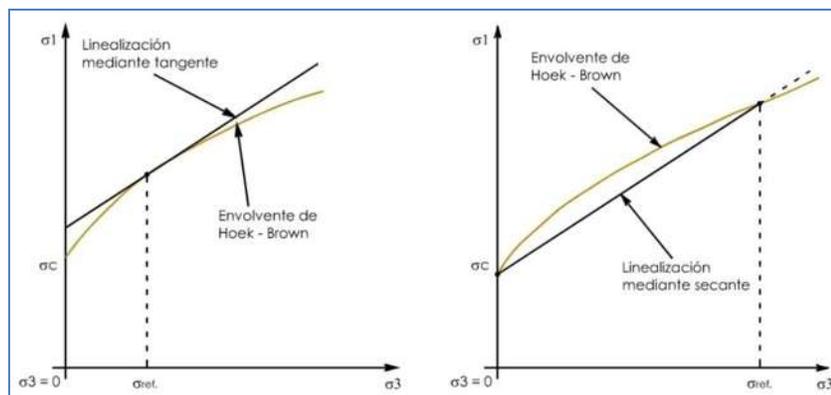


Figura No. 11.-Método de la tangente y método de secante. (Puell Marín, et al., 2004)

### c) Método de bilinealización.

Método comentado por Varona y Velasco (2000, citado por Puell Marín et al., 2004), consiste en sustituir la envolvente de rotura de Hoek y Brown por una envolvente de rotura bilineal que se ajusta a la envolvente curva. Cada uno de los dos segmentos rectos corresponde a una envolvente de Mohr-Coulomb, con su propia cohesión y ángulo de rozamiento, como se muestra en la Figura No. 12. Es necesario para este método definir un valor de esfuerzo de referencia,  $\sigma_3 = \sigma_{ref}$ . El punto intermedio para la bilinealización, se determina de tal forma que corresponda a la menor área entre la envolvente curva y los dos segmentos rectos.

Este método al igual que el anterior, resulta ser conservador, debido a que la nueva envolvente queda por debajo de la envolvente de Hoek y Brown, sin embargo se tiene una mejor aproximación que el método de la secante.

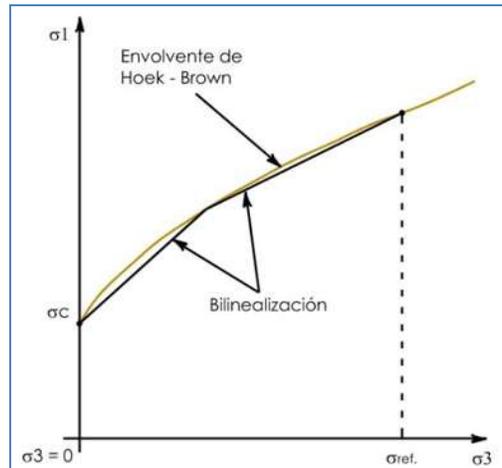


Figura No. 12.- Método de bilinealización. (Puell Marín, et al., 2004)

### d) Método de regresión lineal.

Método desarrollado por Hoek y Brown (1997, citado por Puell Marín et al., 2004), consiste en utilizar la envolvente de Hoek y Brown como generador de resultados de ensayos triaxiales a nivel de macizo rocoso, de manera que, para varios valores de  $\sigma_3$ , se obtienen sus respectivos valores de  $\sigma_1$ , con estas parejas de valores se realiza una regresión lineal. Este método es muy sensible a los valores de  $\sigma_3$  con los que se generan los puntos para la posterior regresión lineal. En la figura 13 se ilustra la linealización del método a la envolvente de Hoek y Brown.

Hoek y Brown (1997, citado por Puell Marín et al., 2004), encontraron que los mejores resultados se obtienen haciendo una regresión lineal sobre ocho parejas

de valores  $(\sigma_1, \sigma_3)$  equiespaciados, en un rango de  $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_{ci}$ , donde  $\sigma_{ci}$  es la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.

### e) Método de equivalencia de área.

Los autores Hoek, Carranza-Torres y Corkum (2002, citado por Puell Marín et al., 2004) proponen encajar una recta que equilibre las áreas que quedan entre la envolvente curva de Hoek y Brown y la linealizada de Mohr-Coulomb, para un determinado rango de esfuerzos,  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3m\acute{a}x}$ , siendo  $\sigma_t$  la resistencia a tracción y  $\sigma_{3m\acute{a}x}$  la tensión de confinamiento máxima que se espera, y que se determinará en cada caso. Esto se ilustra en la Figura No. 13.

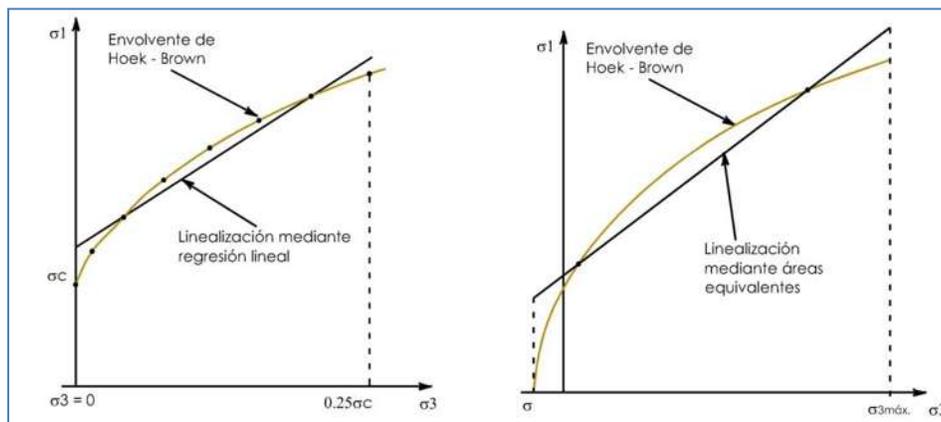


Figura No. 13.- Método de regresión lineal y método de áreas equivalentes. (Puell Marín, et al., 2004)

### 2.4.4.3. Geological Strength Index (GSI)

El GSI es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo. Las observaciones se basan en la apariencia del macizo a nivel de estructura y a nivel de condición de la superficie. A nivel de estructura se tiene en cuenta la alteración que sufren las rocas y la unión que existe entre ellas, que viene dada por las formas y aristas que presentan, así como su cohesión. Para las condiciones de la superficie, se tiene en cuenta si ésta alterada, si ha sufrido erosión o qué tipo de textura presenta, y el tipo de recubrimiento existente.

Una vez realizadas las observaciones se escoge en la Tabla No. 10 la situación que más se asemeje a la realidad del macizo rocoso en estudio, obteniendo de esta forma, el valor del GSI.

Los valores del GSI varían desde 1 hasta 100. Los valores cercanos al 1 corresponden a situaciones del macizo rocoso de menor calidad, con superficie



muy erosionada, con arcilla blanda en las juntas, y con una estructura poco resistente debido a las formas redondas, y a la gran cantidad de fragmentación que sufre el macizo. Por el contrario, valores de GSI cercanos a 100, implican macizos de gran calidad, ya que significa una estructura marcada por una pequeña fragmentación en la que abundan las formas prismáticas y superficies rugosas sin erosión.

Tabla No. 10.- Determinación del índice geológico de resistencia, GSI. (Hoek y Brown, 1997)

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (geological strength index)		CONDICIÓN DEL FRENTE				
A partir de la clasificación obtenida en la figura, seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patines de oxidación.	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas.	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos.	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos.
ESTRUCTURA						
	<b>BLOQUES REGULARES (BR)</b> Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70			
	<b>BLOQUES IRREGULARES (BI)</b> Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60	50		
	<b>BLOQUES Y CAPAS (BC)</b> Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	<b>FRACTURACIÓN INTENSA (FI)</b> Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.				20	10

#### 2.4.5. ROTURA DE LA MATRIZ ROCOSA.

La resistencia de la matriz rocosa isotrópica se puede evaluar mediante los criterios de rotura de Mohr Coulomb y de Hoek y Brown. Sin embargo cabe destacar que el primero es un criterio lineal y el segundo no lo es, pero este último es más cercano a un comportamiento real de las rocas.

### 2.4.5.1. Criterio de Mohr-Coulomb.

Este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de esfuerzos, obteniendo la relación entre los esfuerzos normal y tangencial al momento de la rotura con la siguiente expresión:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (7)$$

Donde:

- $\tau$  y  $\sigma$  = esfuerzos tangencial y normal sobre el plano de rotura.
- $C$  y  $\phi$  = cohesión y ángulo de rozamiento de la matriz rocosa.

El criterio puede expresarse en función de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , como se presenta en la Figura No. 14, permitiendo obtener la resistencia en cualquier plano definido por  $\theta$ .

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3 [\sin 2\theta + \tan \phi (1 - \cos 2\theta)]}{\sin 2\theta - \tan \phi (1 + \cos 2\theta)} \quad (8)$$

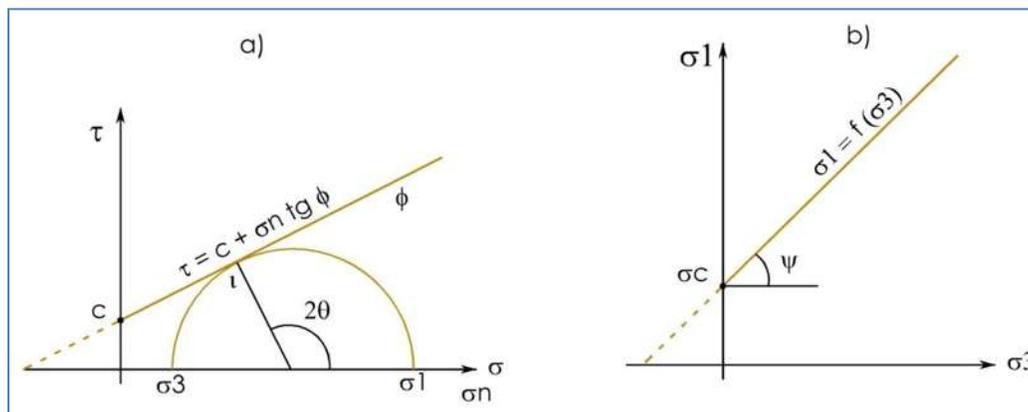


Figura No. 14.- Envolventes de Mohr-Coulomb en términos de esfuerzos tangenciales y normales a) y esfuerzos principales. b) Para un estado de esfuerzos situado por debajo de las rectas o envolventes no se producirá la rotura. (González de Vallejo et al., 2002)

Para el plano de rotura crítico,  $\theta = 45^\circ + \phi/2$ , la expresión anterior toma la siguiente forma:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi + \sigma_3 (1 + \sin \phi)}{(1 + \sin \phi)} \quad (9)$$

Si se da la condición  $\sigma_3 = 0$ ,  $\sigma_1$  será la resistencia a compresión simple de la roca estudiada, de acuerdo a la siguiente expresión:



$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (10)$$

Este criterio también proporciona la resistencia a tracción empleando la ecuación anterior, únicamente cambiando en el denominador el signo de menos, por un signo de más, como se muestra en la expresión siguiente:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (11)$$

Este criterio presenta inconvenientes debido a lo siguiente:

- Las envolventes de roca no son lineales; se ha comprobado experimentalmente que la resistencia aumenta menos con el incremento de la presión normal que lo obtenido al considerar una ley lineal, lo que puede implicar errores al considerar los esfuerzos actuantes.
- La dirección del plano de fractura según este criterio no siempre coinciden con los resultados experimentales.
- El criterio sobrevalora la resistencia a la tracción. (Gonzales de Vallejo *et al*, 2002)

Si se utiliza este criterio para evaluar la resistencia de la matriz rocosa, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El valor de la cohesión será un 10 % de la resistencia a compresión de la matriz rocosa.
- El ángulo de rozamiento interno será según el nivel de tensiones con el que trabaja, tomado de ensayos específicos o de tablas.

#### 2.4.5.2. Criterio de Hoek y Brown.

El criterio de Hoek y Brown (1980, citado por Hoek E., 2002) es un criterio empírico de rotura no lineal válido para evaluar la resistencia de la matriz rocosa isótropa en condiciones triaxiales:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2} \quad (12)$$

Donde:

- $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  = esfuerzos principales mayor y menor en el momento de la rotura.
- $\sigma_{ci}$  = resistencia a compresión simple de la matriz rocosa. Se determina a partir de ensayos en laboratorio ó del ensayo de carga puntual.

- $m_i$  = constante que depende de las propiedades de la matriz rocosa. Se obtiene a partir de ensayos triaxiales ó de la Tabla No. 9 anteriormente presentada, según la litología que presente la roca en estudio.

De la ecuación 12 se debe obtener una envolvente para la rotura como se muestra en la Figura No. 15.

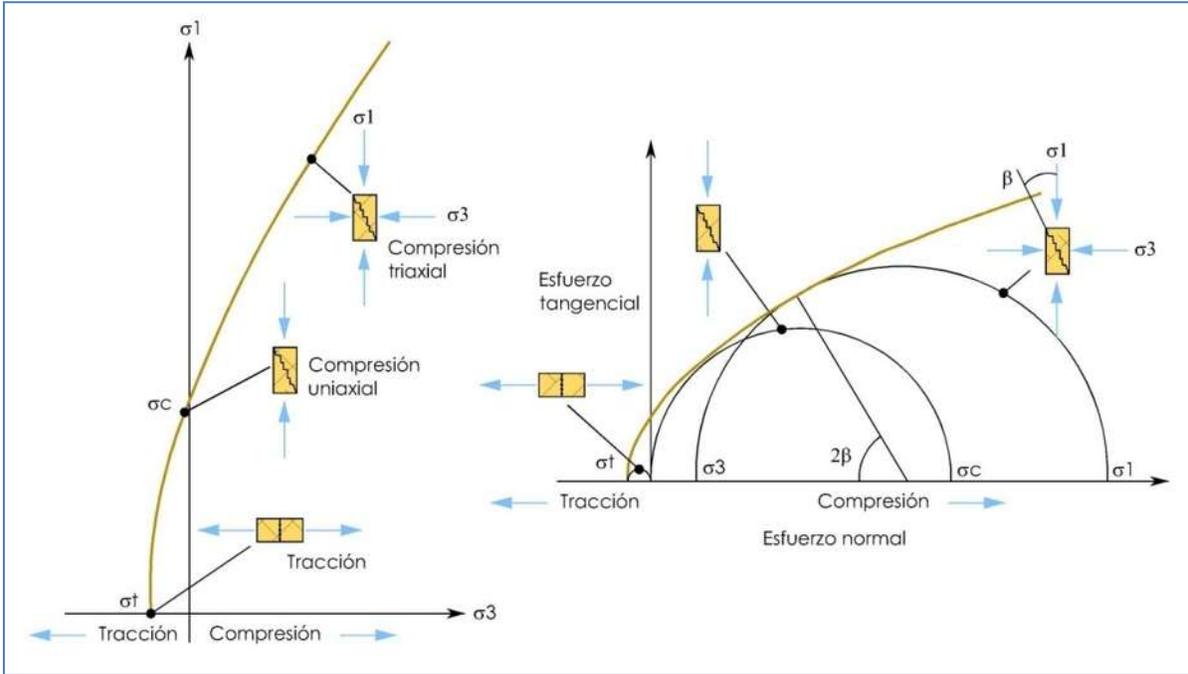


Figura No. 15.- Envolventes de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b). Representación de las diferentes condiciones de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa. (González de Vallejo et al., 2002)

Si expresamos el criterio de Hoek y Brown en términos de esfuerzos normalizados,  $\sigma_{ci}$ , obtenemos:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1} \quad (13)$$

A partir de la expresión anterior, se puede obtener la compresión simple de la matriz rocosa, sustituyendo  $\sigma_3 = 0$ , y la resistencia a tracción se obtiene resolviendo para  $\sigma_1 = 0$  y  $\sigma_3 = \sigma_t$ , como se muestra en la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_{ci} \left( m_i - \sqrt{m_i^2 + 4} \right) \quad (14)$$



## 2.4.6. RESISTENCIA AL CORTE DE DISCONTINUIDADES.

El estudio del comportamiento mecánico de las discontinuidades se basa en los esfuerzos de corte aplicados y los desplazamientos tangenciales producidos. Esta relación es la rigidez de la discontinuidad, la cual tiene unidades de esfuerzo/longitud. (Gonzales de Vallejo *et al*, 2002)

La resistencia al corte de las discontinuidades, depende, en gran medida, de la fricción que se genera por la rugosidad, que de la cohesión que presenta el material.

La resistencia al corte de los planos de discontinuidad, se determina mediante ensayos de corte directo, en laboratorio o *in situ*, y de pruebas triaxiales efectuadas en laboratorio. De manera empírica se puede estimar la resistencia al corte directo con el criterio de Barton y Choubey, descrito más adelante en el apartado 2.4.6.3.

### 2.4.6.1. Resistencia en discontinuidades planas.

En una discontinuidad plana, es decir sin rugosidad ni ondulación, el ángulo de fricción representa el incremento del esfuerzo de corte debido a la fricción producida entre las superficies de las discontinuidades al aumentar el esfuerzo normal. En una discontinuidad plana, cerrada y sin relleno, la resistencia al corte ( $\tau$ ) depende del esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y del ángulo de fricción básico ( $\phi_b$ ), como se muestra en la Figura No. 16.

La cohesión del material,  $c$ , está definida por el punto de corte de la envolvente de falla con la ordenada en el plano esfuerzo cortante-esfuerzo normal, y el ángulo de fricción interno, es el ángulo que se forma entre la envolvente de falla y la horizontal (Figura No. 16).

La resistencia al corte de pico,  $\tau_p$  para una discontinuidad plana viene dada por la expresión de Mohr-Coulomb, que se presenta a continuación:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi_p \quad (15)$$

Donde:

- $\sigma_n'$  = esfuerzo efectivo normal sobre el plano de la discontinuidad.
- $c$  = cohesión del material.
- $\phi_p$  = ángulo de fricción de pico.

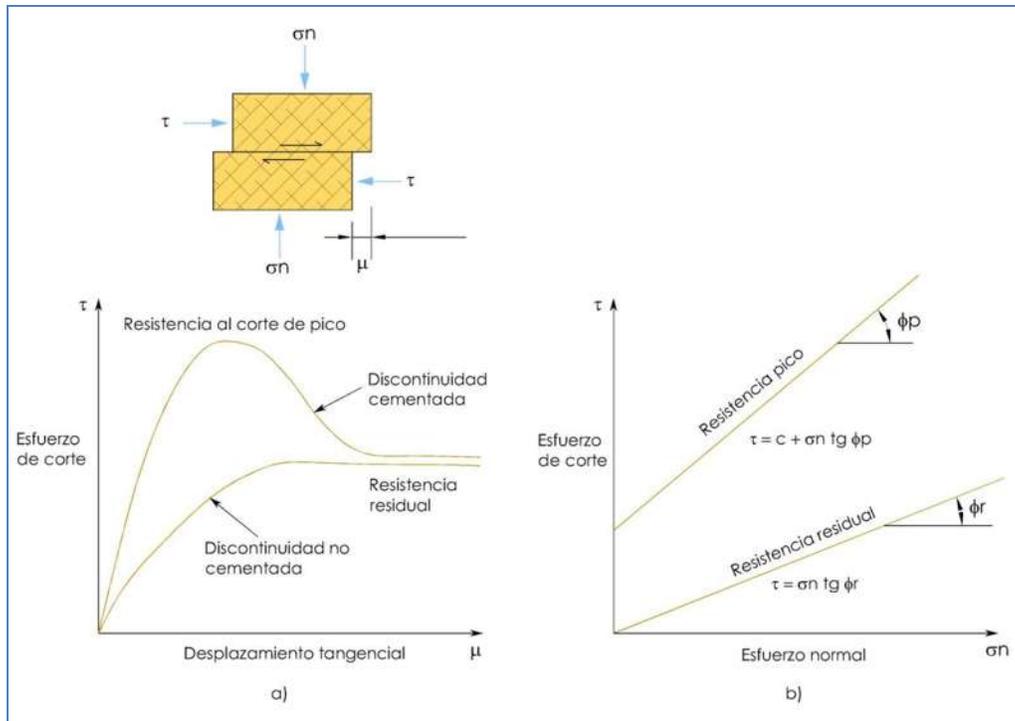


Figura No. 16.- a) Curvas esfuerzo tangencial – desplazamiento tangencial para discontinuidades planas. b) Resistencia al corte teórica de una discontinuidad plana. (González de Vallejo et al., 2002)

#### 2.4.6.2. Resistencia en discontinuidades dentadas.

Para iniciar el estudio del comportamiento mecánico de una discontinuidad que no sea plana, el modelo teórico que puede utilizarse es el de una discontinuidad cuyas superficies están conformadas por dientes triangulares que encajan perfectamente entre sí. (Figura No. 17)

Patton (1996, citado por González de Vallejo, et al., 2002) propuso un modelo de rotura bilineal, basado en la influencia de las rugosidades, en el que la irregularidad de una discontinuidad puede ser definida por un ángulo de rugosidad "i". El ángulo de rugosidad "i" es el que forma la irregularidad con respecto a la discontinuidad, como se muestra en la Figura No. 17.

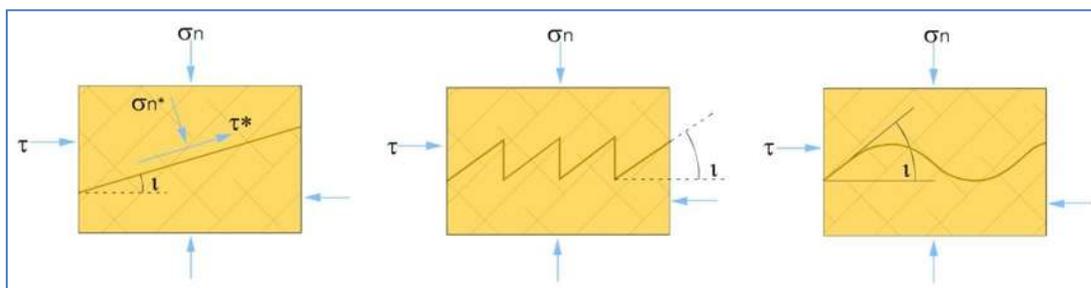


Figura No. 17.- Influencia del grado de rugosidad en la resistencia al corte de la discontinuidad. (González de Vallejo et al., 2002)

Sumando el ángulo de rugosidad, “ $i$ ”, y el ángulo de fricción básico,  $\phi_b$ , obtenemos el ángulo de fricción de pico,  $\phi_p$ .

$$\phi_p = \phi_b + i \quad (16)$$

- **Para esfuerzos normales bajos.**

Si aplicamos una fuerza tangencial en un plano de la discontinuidad y ejercemos fuerzas normales bajas a la discontinuidad, venciendo la rugosidad “ $i$ ”, y a su vez produciendo una dilatancia, opera entonces la fricción efectiva,  $\phi_b + i$ , por lo que obtenemos el valor de  $\phi_p$ , y a su vez el valor de  $\tau_p$ , considerando que la cohesión es igual a cero. (Figura No. 18)

$$\tau_p = \sigma'_n \tan(\phi_b + i) \quad (17)$$

- **Para esfuerzos normales elevados.**

Al progresar el desplazamiento tangencial, se va suavizando la irregularidad de la discontinuidad, prevaleciendo  $\phi_b$ . Si se sigue incrementando la fuerza normal, hasta un punto en el que la recta  $\tau$ - $\sigma_n$ , se aproxima al valor de  $\phi_r$ , tenemos la siguiente expresión para esfuerzos normales elevados, obteniendo las siguientes gráficas en la Figura No. 18.

$$\tau_p = \sigma'_n \tan \phi_r \quad (18)$$

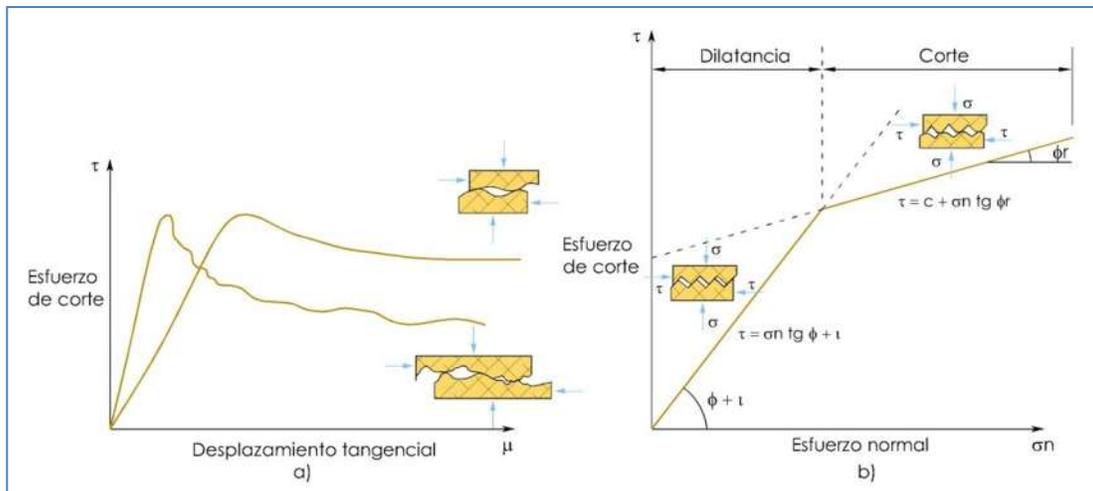


Figura No. 18.- a) Curvas esfuerzo de corte – desplazamiento tangencial para discontinuidades rugosas.  
b) Criterio de rotura bilineal para discontinuidades rugosas.  
(González de Vallejo et al., 2002)

Según Landanyi y Archambault, le envolvente bilineal es insuficiente por lo que ellos utilizan una envolvente curva. Para reproducir los valores que se obtienen tanto para esfuerzos normales altos como bajos, con el fin de definir la resistencia al corte, proponen la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{\sigma(1 - a_s)(v + \tan\phi) + a_s\tau_t}{1 - (1 - a_s)v + \tan\phi} \quad (19)$$

Donde:

- $a_s$  = área de corte
- $v$  = valor de la dilatación en la resistencia de pico.
- $\phi$  = ángulo de fricción a lo largo de la discontinuidad
- $\tau_t$  = resistencia al corte de la roca intacta.

En la Figura No. 19, se muestra la envolvente de rotura bilineal de Patton y la envolvente de rotura no lineal de Landanyi y Archambault.

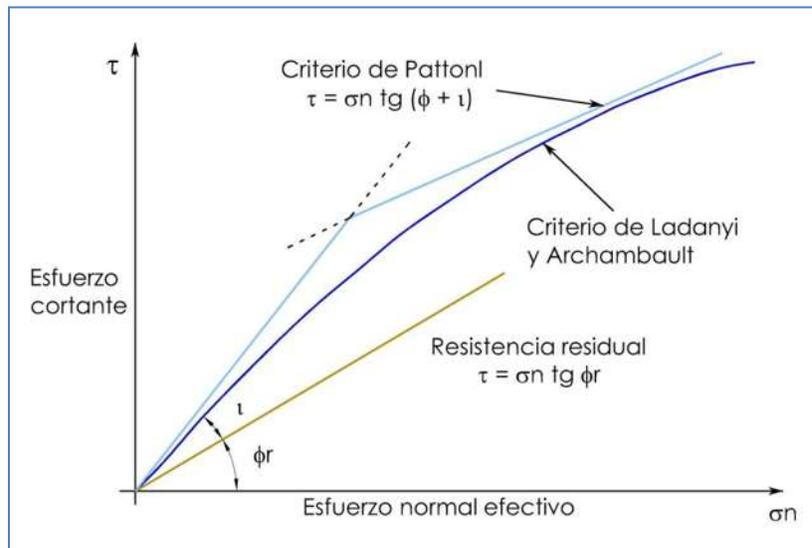


Figura No. 19.- Representación del criterio lineal de Patton y del criterio no lineal de Landanyi y Archambault para estimar la resistencia de planos de discontinuidad rugosos en función de los esfuerzos normales actuantes. (González de Vallejo et al., 2002)

Hay que tomar en cuenta la dirección de la rugosidad, de tal forma que se genere el mayor esfuerzo posible, pudiéndose tener en caso contrario, una resistencia al corte de la discontinuidad muy baja, como se puede apreciar en la Figura No. 20, debido a que la rugosidad de la discontinuidad está en dirección a favor de la fuerza tangencial, generando esfuerzos menores.

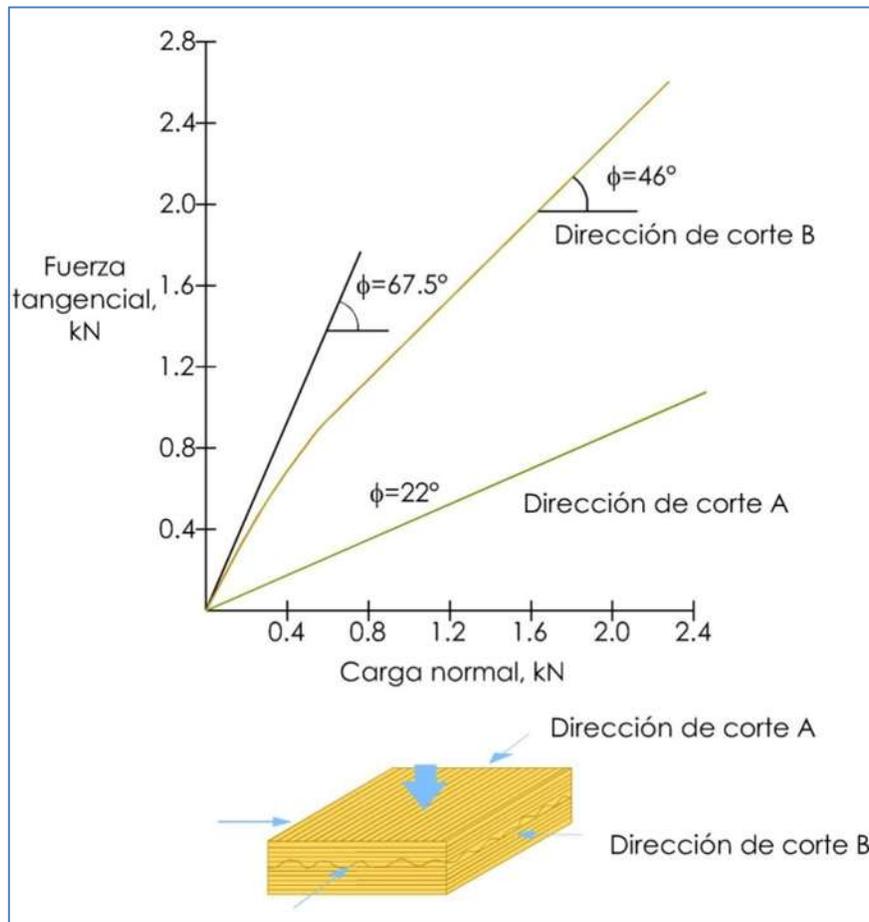


Figura No. 20.- Influencia de la rugosidad en la resistencia de las discontinuidades según la dirección de corte (Brown et al., 1977; en Brandy y Brown, 1985).

### 2.4.6.3. Resistencia en discontinuidades rugosas.

Barton y Choubey (1974, citado por González de Vallejo *et al.*, 2002), desarrollaron un modelo empírico para poder estimar la resistencia al corte para discontinuidades con cualquier tipo de rugosidad sin relleno. Este criterio es una forma sencilla para poder estimar la resistencia al corte de una discontinuidad mediante ensayos relativamente simples. Se basa en la siguiente expresión:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (20)$$

Donde:

- $\tau$  y  $\sigma_n$  = esfuerzo tangencial y normal sobre la discontinuidad.
- $\phi_r$  = ángulo de rozamiento residual.
- JRC = coeficiente de rugosidad de la discontinuidad.
- JCS = resistencia a compresión de las paredes de la discontinuidad.



La expresión anterior está conformada por tres componentes: geométrica,  $JRC$ , componente de aspereza,  $JCS/\sigma'_n$ , y componente friccional,  $\phi_r$ . Las dos primeras representan la rugosidad "i" de la discontinuidad. Si sumamos la rugosidad "i" y la componente friccional,  $\phi_r$ , obtenemos la resistencia friccional.

$$\tau = \sigma'_n \tan \left[ \underbrace{JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi_r}_{\text{rugosidad "i" + } \phi_r} \right] \quad (21)$$

$$\tau = \sigma'_n \tan(i + \phi_r) \quad (22)$$

En casos de que la relación  $JCS/\sigma_n$ , sea mayor a 50, se debe tomar un ángulo de rozamiento constante independiente de la carga, con un valor  $\phi_p$  igual a:

$$\phi_p = \phi_r + 1.7JRC \quad (23)$$

$$\tau = \sigma'_n \tan \phi_p \quad (24)$$

- **Estimación del ángulo de rozamiento residual,  $\phi_r$ .**

Si las paredes de la discontinuidad están sanas  $\phi_r = \phi_b$ .

Para estimar  $\phi_r$ , cuando las paredes de la discontinuidad están meteorizadas, se toma la siguiente expresión:

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R} \quad (25)$$

Donde:

- $R$  = lectura obtenida con el esclerómetro en una superficie de material sano.
- $r$  = lectura obtenida con el esclerómetro en la superficie de la junta en estado natural o intemperizada.

- **Resistencia de la pared de la junta,  $JCS$ .**

Si la pared de la junta de la discontinuidad no está meteorizada, se toma el valor a compresión de la matriz rocosa,  $\sigma_c$ . En caso contrario, el valor de  $JCS$  puede obtenerse con la expresión:

$$\log_{10} JCS = 0.0008 \gamma_{roca} r + 1.01 \quad (26)$$

$\gamma_{roca}$  = peso específico de la roca.

De acuerdo a estudios realizados en rocas la densidad es igual al peso específico para materiales de construcción. (Martínez Pastor V., 2002)

- **Coefficiente de rugosidad de la junta, JRC.**

El coeficiente JRC, depende de la rugosidad de las paredes de la discontinuidad y varía de 1 a 20. Se puede obtener de dos formas:

- Mediante perfiles de rugosidad estándar de 10 cm de longitud. (Propuesto por Barton y Choubey). Figura No. 21.
- Mediante la siguiente expresión:

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)} \quad (27)$$

$\alpha$  = ángulo de rozamiento, que se determina mediante el ensayo Tilt test.

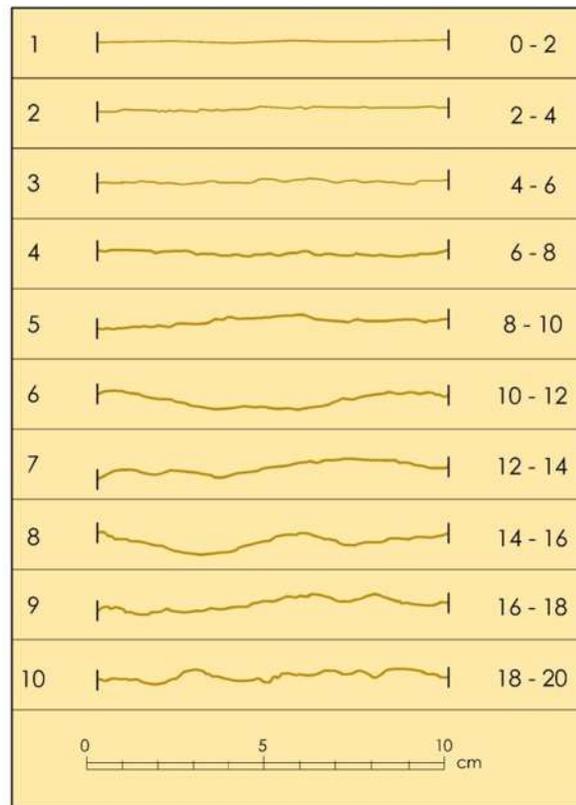


Figura No. 21.- Perfiles tipo para estimar el coeficiente de rugosidad JRC (Barton y Choubey, 1977).



- **Efecto de la escala.**

Para analizar el comportamiento de juntas de mayor longitud es necesario corregir los valores para otras escalas. Bandis (1981, citado por González de Vallejo *et al.*, 2002), propone adicionalmente un factor de corrección por escala, por lo que se han establecido las siguientes expresiones para obtener los parámetros en juntas de longitud real  $L_n$  ( $L_0=10$  cm):

$$JSC_n = JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03JCS_0} \quad (28)$$

$$JRC_n = JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} \quad (29)$$

La resistencia de las juntas a escala real se estima con la siguiente expresión (Barton, 1990):

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tag} \left[ JRC_n \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi r + i \right] \quad (30)$$

Donde "i" es el ángulo de ondulación a gran escala de las discontinuidades.

#### **2.4.6.4. Discontinuidades con relleno.**

En discontinuidades con relleno de material arcilloso o de otra naturaleza, su resistencia dependerá de las características del material que se encuentre y a un espesor considerable de este. Si el relleno es duro y consolidado, la ruptura puede producirse del contacto roca-relleno.

Dependiendo del espesor del material de relleno, puede provocar que la resistencia de las paredes de la discontinuidad tenga una influencia nula en la resistencia al corte.

### **2.5. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS PARA DETERMINAR, TANTO CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ ROCOSA COMO DE DISCONTINUIDADES PRESENTES EN EL MACIZO ROCOSO.**

La descripción de rocas con fines ingenieriles, requiere propiedades básicas y obtener parámetros (propiedades índice) para su clasificación geomecánica.

Las propiedades índice pueden ser obtenidas a partir de muestras ensayadas, en campo o laboratorio.



## **2.5.1. ENSAYOS *IN SITU*.**

### **2.5.1.1. Esclerómetro o martillo Schmidt.**

Ensayo sencillo de campo o laboratorio, permite estimar la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa y también de la junta de las discontinuidades:

- En roca matriz: evitar bloques pequeños o con discontinuidades cercanas.
- En superficies de discontinuidad: aplicar directamente sobre la superficie.

El aparato es sencillo y fácil de usar, similar al utilizado para realizar ensayos en concreto. Sólo se diferencian en el nivel de energía del impacto: 0.74 Nm (Manual de aparatos CONTROLS para ensayos en rocas). Es un cilindro de unos 6 cm de diámetro, con la masa y el muelle en su interior, el vástago retráctil en unos de sus extremos y una escala en su superficie lateral.

El ensayo consiste en lanzar una masa mediante un muelle sobre un vástago en contacto con la roca de forma perpendicular al plano de ensayo, al golpear el vástago la roca rebota la masa y queda registrado el número de rebote en una escala situada al costado del aparato.

Deben tomarse 10 lecturas en cada punto y eliminarse las 5 más bajas, realizando un promedio de las restantes. Este valor se introduce en una gráfica de Miller, entrando en el eje de las abscisas con el valor promedio de las lecturas y la posición con la que se realizó el ensayo, intersectando con una recta, una de las curvas que corresponde al valor de la densidad de la roca, obteniendo así la resistencia a compresión simple, de la matriz o junta de la discontinuidad.

## **2.5.2. ENSAYOS DE LABORATORIO**

### **2.5.2.1. Ensayo de densidad.**

Debemos diferenciar aquí el concepto de densidad de los establecidos en la física con relación a la densidad y peso específico. Cuando estudiamos materiales de construcción y atendemos a las propiedades físicas de los mismos, los conceptos de densidad o peso específico se refieren al mismo concepto, con independencia de lo que la física explica al respecto. (Martínez Pastor *et al*, 2002).

El objetivo de la prueba es determinar la densidad de la roca, para esto nos basaremos en la ASTM C127-04, Densidad relativa de materiales.



El procedimiento consiste en tomar tres muestras representativas, como mínimo, de tamaño suficiente, tal que puedan caber en el picnómetro (cilindro metálico de 163 mm de diámetro y 370 mm de altura, con un sifón colocado a 250 mm de su base), dando un peso mínimo de 500 g.

Este material se coloca en un recipiente lleno de agua, tal que lo cubra por completo, procurando dejar como mínimo un tirante de 3 cm, aunque es variable dependiendo del material que se maneje, por lo que se recomienda, que entre mayor sea el tirante entre la superficie del agua y la parte más alta de la roca sumergida, tendremos una saturación óptima. El tiempo que se deja saturar el material es de 24 hrs.

Una vez transcurrido las 24 hrs., se procede a retirar el material del agua y secarlo superficialmente con un lienzo, procurando eliminar únicamente el agua adherida en la superficie sin remover mediante presión el agua absorbida. Este se pesa inmediatamente y obtenemos su peso húmedo. La operación se realiza de manera rápida para no perder humedad.

Previamente Se coloca el picnómetro sobre una superficie horizontal y se llena con agua hasta el nivel de derrame. Junto al picnómetro, se coloca una probeta graduada en el extremo de desalojo, el cual registrará el volumen desalojado.

El material saturado y superficialmente seco se introduce en el picnómetro, el cual desaloja el agua contenida, esta se recolecta en la probeta y se procede a tomar su lectura.

Finalmente se extrae el material del picnómetro, este se coloca en una charola para secarlo en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 hrs. Transcurrido ese lapso de tiempo, se saca del horno y se deja enfriar por unos 10 a 15 minutos aproximadamente.

Se calcula y reporta la densidad relativa del material, mediante la siguiente expresión:

$$D = \frac{W}{V} \quad (31)$$

Donde:

- D = densidad de la muestra, g/cm<sup>3</sup>.
- W = peso de la muestra, g.
- V = volumen de agua desalojado por la muestra, cm<sup>3</sup>.



### 2.5.2.2. Ensayo de absorción.

Tomamos como referencia la norma ASTM C127-04, ya que se emplea para determinar la absorción del agregado grueso, de acuerdo a las especificaciones que deben cumplir los agregados para el diseño de mezclas asfálticas, sin embargo para este caso, es para conocer una de sus propiedades físicas.

Consiste en medir el incremento de masa del agregado, debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior, esto se logra llevando al material a saturación por 24 hrs., enseguida de transcurrido ese lapso de tiempo se procede a sacar y secar superficialmente el material con un lienzo y obtener su peso húmedo. Una vez registrado el peso se coloca en el material en un horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 hrs., suficiente tiempo para remover toda el agua. Se saca del horno y se deja enfriar por unos 5 a 10 minutos, enseguida se registra su peso seco.

Se calcula y reporta la absorción del material, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Absorción \%} = \left( \frac{B - A}{A} \right) 100 \quad (32)$$

Donde:

- A = peso de la muestra seca al horno, g.
- B = peso de la muestra saturada superficialmente seca, g.

### 2.5.2.3. Ensayo de durabilidad (alterabilidad).

La durabilidad de la roca es la resistencia que presenta ante los procesos de alteración y desintegración; como la hidratación, disolución, oxidación, etc., cambiando la estructura del material. En rocas con altos contenidos de minerales arcillosos, la exposición al aire o con presencia de agua degrada la resistencia, esto debe de considerarse al ponerse en contacto con la atmosfera.

El ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento (slake durability test, SDT), es el método que se utiliza para evaluar la durabilidad de las rocas, emplearemos la norma ASTM D 4644-04, Método de prueba estándar para reducir por durabilidad pizarras o rocas débiles similares (Standard Test Method for Slake of Shales and Similar Weak Rocks), para realizar el ensayo.

Este método de prueba se utiliza para estimar cualitativamente la durabilidad de las rocas débiles en el entorno, y asignarle valores cuantitativos de acuerdo al sistema de clasificación de Franklin (ASTM D 4644-04).

Emplearemos agua destilada en la prueba ya que esta no contiene sales disueltas o impurezas que afecten al material.

El aparato que utilizaremos para la prueba consta de una unidad de accionamiento de motor montada en una placa base que hace girar a dos o cuatro tambores a una velocidad de 20 rpm. El tambor está formado por una malla con abertura de 2 mm, es de forma cilíndrica, con un diámetro de 140 mm y una longitud de 100 mm. Las placas que soportan los tambores son desmontables para retirar estos.

La muestra de ensayo estará integrada por diez fragmentos, con un peso de 40 g hasta 60 g cada una. Pueden ser de origen natural o producido por un martillo mediante rotura. En el caso de ser obtenidos mediante rotura, las aristas que se generan se eliminan mediante una devastadora. El peso total de la muestra para la prueba deberá ser desde 450 g hasta 550 g.

Antes de iniciar la prueba se fotografiará la muestra y se introducirá al horno por 24 hrs. a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ , transcurrido ese tiempo se dejará enfriar de 10 a 15 minutos, y se registrará su peso.

La prueba consiste en someter al material, a dos ciclos de humedad-sequedad-desmoronamiento, montando el tambor en las placas, llenando hasta 20 mm por debajo del eje del tambor y dejando un espacio libre de 40 mm entre la parte más baja y la parte inferior de la malla, como se muestra en la Figura No. 22. Se hace girar el tambor a 20 rpm durante un período de 10 minutos. Transcurrido ese tiempo se desmonta el tambor y se observa el material dentro. Este se introduce al horno durante un período de 24 hrs. a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ , transcurrido ese tiempo se deja enfriar aproximadamente de 10 a 15 minutos y se registra su peso. Se vuelve a repetir el proceso para el segundo ciclo.

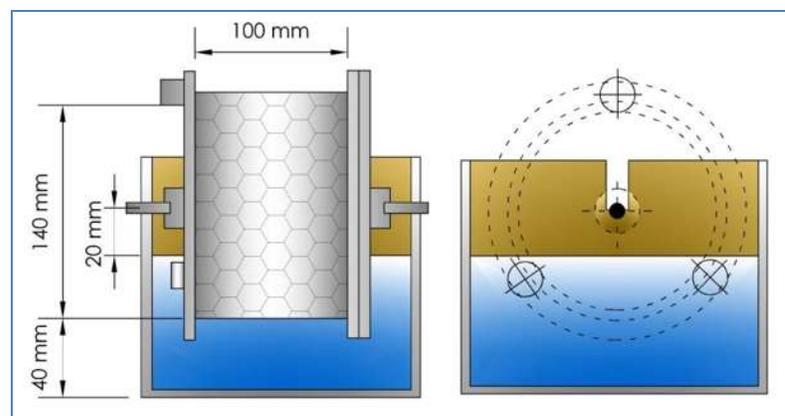


Figura No. 22.- Esquema de la máquina de durabilidad.

Al terminar el último ciclo, se toma una fotografía para comparar la muestra con las escalas que presenta la norma ASTM D 4644-04, que están en la Figura No. 23, y clasificarlo al tipo que corresponda, de acuerdo a la norma.

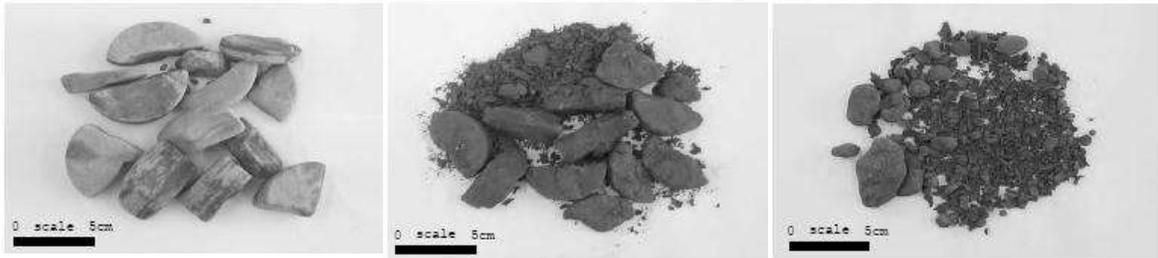


Figura No. 23.- Escalas de clasificación de acuerdo al desgaste que presentan en el segundo ciclo. (ASTM D 4644-04)

- Tipo I - permanece prácticamente sin cambios.
- Tipo II - consisten en fragmentos de grandes y pequeños.
- Tipo III - exclusivamente pequeños fragmentos.

Se calcula el índice de durabilidad de cada ciclo con la siguiente fórmula:

$$ID (\%) = \frac{\text{Peso seco después de uno o dos ciclo}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \quad (33)$$

Donde:

- ID (%) = índice de durabilidad de la roca, en porciento.

La clasificación estándar se establece en base al valor de  $I_{D2}$  (Ver Tabla No. 11). Cabe mencionar que en rocas arcillosas muy débiles en las que los valores de  $I_{D2}$  menores del 10% del peso retenido en el segundo ciclo, se recomienda emplear el índice correspondiente al primer ciclo de la prueba (Ver Tabla No. 12). (Gonzales – Vallejo et al, 2004).

Tabla No. 11.- Clasificación de la durabilidad en base al índice  $I_{D2}$ . (González de Vallejo et al., 2002)

Durabilidad	% peso retenido después de 2 ciclos
Muy alta	> 98
Alta	95 - 98
Media-alta	85 - 95
Media	60 - 85
Baja	30 - 60
Muy baja	< 30



Tabla No. 12.- Clasificación de la durabilidad en base al índice ID1. (González de Vallejo et al., 2002)

Durabilidad	% peso retenido después de 1 ciclo	
	1	2
Extremadamente alta		> 95
Muy alta	-	90 - 95
Alta	> 99	75 - 90
Media-alta	95 - 98	-
Media	85 - 95	50 - 75
Baja	60 - 85	25 - 50
Muy baja	< 60	< 25

1.- Gambie 1971 (en Godman, 1989)

2.- Frankling and Chandra, 1972 (en Johnson and De Graff, 1988)

#### 2.5.2.4. Ensayo de intemperismo acelerado.

Este ensayo describe la solidez de los agregados cuando se someten a la acción de la intemperie, simulando esto mediante la inmersión repetida en solución salina, seguida por secado al horno, para deshidratar parcial o totalmente la sal que se introdujo en los poros. La fuerza interna expansiva, se debe a la rehidratación de la sal en la re-inmersión, esto simula la expansión del agua al congelarse. Esta información es útil para evaluar la solidez de los agregados cuando no se cuenta con información sobre estos materiales ante la acción de la intemperie.

Aplicaremos la norma ASTM C 88-99a, Método de prueba estándar para determinar la solidez de los agregados por uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, para evaluar la solidez de los agregados.

Prepararemos una la solución de sulfato de sodio para la inmersión, en base a la norma, descartamos la solución de sulfato de magnesio, ya que esta utiliza porcentajes más altos para medir los límites de pérdida del agregado. Se prepara una solución saturada en un contenedor, de preferencia de plástico con forma cilíndrica, para facilitar el manejo, diluyendo en agua destilada el sulfato de sodio anhídrido ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) en polvo, a una temperatura de 25 a 30° C. Agregar suficiente sal, anhídrida o de agua de cristalización, para asegurar la saturación y la presencia de cristales en exceso, en proporción de acuerdo a la Tabla No. 13. Agitar la mezcla durante la adición de la sal, con el fin de disolver los cristales que se forman, al entrar en contacto el sulfato de sodio con el agua destilada. Mantener cubierta la solución para evitar la evaporación y contaminación. Dejar reposar la mezcla durante 48 horas a temperatura de  $21 \pm 1^\circ \text{C}$ , para saturar la solución. Antes de usar, romper los cristales formados y mezclar, hasta disolver los cristales, una vez logrado, medir la densidad debiendo ser entre 1.151 a 1.174.



Tabla No. 13.- Cantidad de reactivo empleado para preparar la solución de prueba. (SCT)

Reactivo		Cantidad (gr/L)
Solución de sulfato de sodio	de anhidro ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	350
	con agua de cristalización ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )	750
Solución de sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )		1400

Se emplearán agregados gruesos, de 8 x 8 x 8 cm de tamaño aproximadamente, formando una muestra de piezas 3 como mínimo, ó con un peso total de 500 g, también como mínimo.

Secar previamente cada muestra en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ , durante 24 horas, y registrar el peso.

Sumergir las muestras en la solución de sulfato de sodio, no menos de 16 horas ni más de 18 horas, de tal forma que la solución cubra las muestras, con un tirante mínimo de 3 cm, a una temperatura de  $21 \pm 1^\circ \text{C}$ . Cubrir el recipiente para reducir la evaporación y evitar la adición accidental de sustancias extrañas.

Una vez transcurrido el lapso de tiempo, retirar las muestras del período de inmersión y dejar drenar durante  $15 \pm 5$  minutos. Una vez drenadas colocar las muestras en el horno a temperatura de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ , durante 12 a 16 horas. En caso de que exista duda sobre la eficacia del secado, se recomienda dejar más tiempo en el horno, de 20 a 24 horas aproximadamente.

Al haber transcurrido el tiempo de secado, se registra su peso. Se repite el proceso de inmersión y secado para un total de cinco ciclos. Cabe mencionar que durante el período de secado, la solución de sulfato de sodio continua formando cristales, por lo que al volver a sumergir las muestras se tienen que disolver los cristales antes de ser usada de nuevo.

Al término de los cinco ciclos, hacer un examen cualitativo a partir de las muestras iguales o mayores a 19 mm, en base a la acción que presenten como desintegración, división, en ruinas, grietas, descamación, etc. Y las partículas menores se toman en cuenta para indicar si hubo una división excesiva.

Por último, se realiza una evaluación cuantitativa en base al por ciento de la pérdida de sólidos, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\% \text{ promedio de la pérdida de sólidos} = \frac{(C - D)}{C} 100 \quad (34)$$

Donde:

- C = secada al horno la masa de los bloques antes de la prueba, y
- D = secada al horno la masa acumulada de las piezas más grandes de todos los bloques restantes después de la prueba.

### 2.5.2.5. Ensayo de carga puntual.

Denominado también como PLT (Point Load Test) o ensayo Franklin. Se utiliza para determinar la resistencia a compresión simple de muestras irregulares o de testigos cilíndricos, a partir del índice de carga puntual,  $I_s$ , (resulta más confiable para testigos). Este índice de prueba caracteriza y clasifica la roca en base a su propiedad mecánica. Es un ensayo de campo o de laboratorio, que se aplica a especímenes de roca dura, con resistencia a compresión de 15 MPa (152.95 kg/cm<sup>2</sup>).

De forma general el ensayo consiste en someter a una muestra de roca a una carga creciente hasta la rotura donde se produce la división de la roca. La carga es aplicada a través de dos puntas cónicas, introduciendo la muestra en medio de las dos puntas hasta su falla.

- **Muestras de ensayo.**

Número de muestras de acuerdo a su forma. En forma de núcleo o bloque, se analizarán al menos 10 ejemplares. Cuando sean de forma irregular serán 20 ejemplares. Las muestras en forma de núcleo son las más recomendadas para una clasificación más precisa.

- **Dimensiones.** Las dimensiones exteriores no serán menores a 30 mm y no más de 85 mm. La dimensión recomendada es de 50 mm.
- **Tamaño y forma.** Para núcleos, bloques o muestras de forma irregular, deberán cumplir con las recomendaciones de la Figura No. 24, correspondientes a la norma ASTM D 5731-05. No se requiere preparación de las muestras.

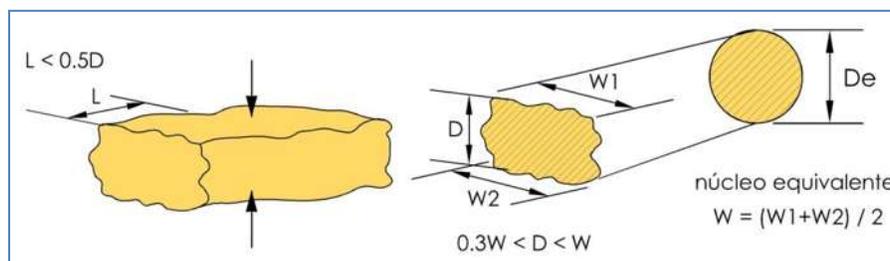


Figura No. 24.- Determinación de las dimensiones de los fragmentos. (ASTM D 5731-05)

- **Para muestras irregulares:**

Antes de introducir el espécimen en las puntas cónicas, se debe corroborar que la relación  $D/W$ , este entre los valores de  $1/3$  y  $1$ , de preferencia de  $1$ , y la distancia  $L$  debe ser al menos  $0.5W$ .

Una vez realizado esto, se introduce el espécimen en las puntas cónicas, haciendo contacto con la dimensión más pequeña de la roca, alejado de los bordes y las esquinas.

Registramos el ancho más pequeño del espécimen,  $W$ , perpendicular a la dirección de la carga que aplicaremos, si los lados no son paralelos, calculamos el ancho,  $W$ , como el promedio de la parte superior e inferior  $((W_1 + W_2)/2)$  como se muestra en la Figura No. 24. Este ancho,  $W$ , se utiliza en el cálculo de índice de resistencia de carga puntual con independencia del modo real de la falla, como se muestra en la Figura No. 25.

Procedemos a incrementar a carga constante hasta producir la falla en un lapso de 10 a 60 segundos, registrando la carga de rotura,  $P$ . Se rechaza la prueba en caso de que la superficie de falla pasa por un solo punto como se muestra en la Figura No. 25d.

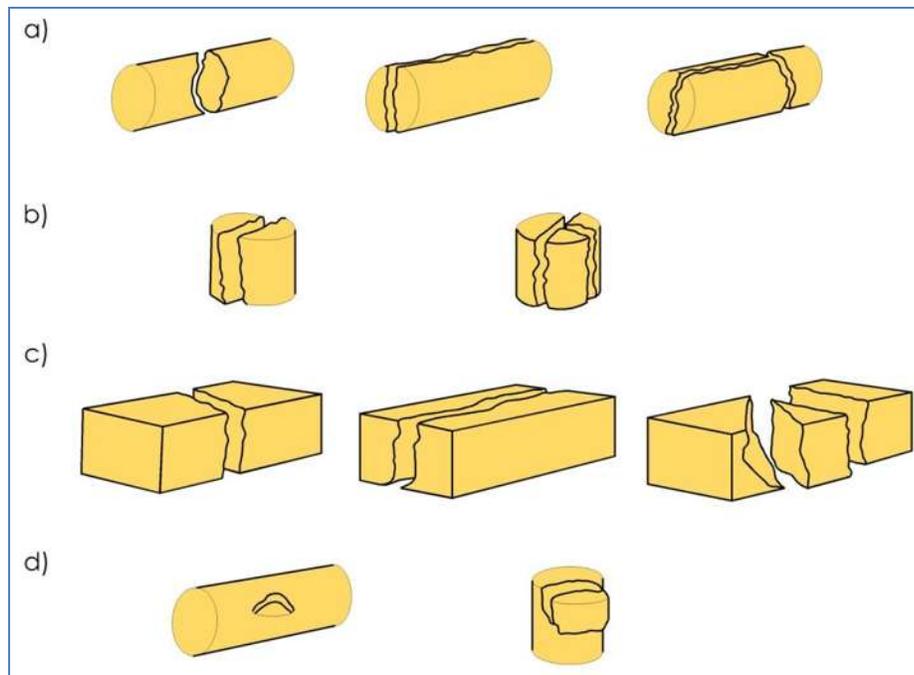


Figura No. 25.- Modo de falla de especímenes de roca. (ASTM D 5731-05)



- **Para rocas anisotrópicas:**

En caso de muestras que presenten alguna anisotropía, se deben probar los especímenes en una dirección, tal que se generen los mayores y menores esfuerzos de carga posibles, (paralelo y normal a los planos de anisotropía).

Los resultados más fuertes de la prueba se obtienen cuando el eje del núcleo es perpendicular a los planos de debilidad, por lo que el eje del núcleo y la normal a la dirección de menos resistencia preferiblemente no excederá de 30°.

Si la penetración de la prueba ocurre en la cercanía de los conos, la dimensión D que va a ser empleada para el cálculo de la fuerza de carga puntual será el valor D' medido al instante de la falla, este valor será menor al registrado antes de la prueba.

- **Cálculo.**

Una vez realizada la prueba y haber registrado toda la información necesaria de los especímenes, se procede a calcular el índice de resistencia de carga puntual mediante la siguiente expresión:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad (35)$$

Donde:

- P = carga de falla, Newtons.
- De = diámetro del núcleo, para núcleos con forma circular = D
- De<sup>2</sup> = D para núcleos, mm<sup>2</sup>.
- De<sup>2</sup> = 4A/π, para bloques y terrones ó muestras irregulares, mm<sup>2</sup>.

Donde:

- A = WD = superficie mínima de la sección transversal de un plano que pasa por los puntos de contacto de los conos. Figura No. 24, antes mostrada.

Factor de corrección por tamaño.

Este se aplica a bloques y muestras irregulares de roca, para aproximar el índice de carga puntual, I<sub>s</sub>, a un I<sub>s(50)</sub>, que corresponde a un núcleo diametral de 50 mm. Esto se logra mediante la siguiente expresión:

$$I_{s(50)} = F * I_s \quad (36)$$

El factor de corrección por tamaño, F, se obtiene mediante la siguiente expresión:



$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0.45} \quad (37)$$

Para muestras cerca del tamaño de 50 mm, se emplea:

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0.5} \quad (38)$$

- **Cálculo del valor medio.**

Se calculará suprimiendo los dos valores más altos y los dos más bajos, de diez o más pruebas realizadas, calculando la media a partir de los valores restantes. Si se probaron menos muestras, los valores máximo y mínimo son suprimidos, a partir de los que quedan, la media es calculada.

Para rocas anisotrópicas, se calcula a partir de la relación entre los dos índices promedio de carga puntual  $I_{s(50)}$ , que se han medido en las dos direcciones: paralelo y normal de los planos de debilidad.

$$I_A = \frac{I_{S(50)normal}}{I_{S(50)paralelo}} \quad (39)$$

- **Cálculo de la fuerza a compresión uniaxial (resistencia a compresión simple).**

Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\delta_{uc} = C * I_{s(50)} \quad (40)$$

Donde:

- $\delta_{uc}$  = fuerza de compresión uniaxial.
- C = factor que se obtiene de la Tabla No. 14, en base al tamaño del espécimen, D, en mm.
- $I_{s(50)}$  = índice de carga puntual corregido.

En caso de tener un espécimen con un valor con un 20 % inferior a la media, este deberá ser examinado por defectos.



Tabla No. 14.- Valor de "C" generalizado. (ASTM D 5731-05)

Tamaño del espécimen (mm)	Valor de "C" (Generalizado)
20	17.5
30	19
40	21
50	23
54	24
60	24.5

### 2.5.2.6. Ensayo de compresión simple.

Para llevar a cabo el ensayo tomaremos como referencia la normativa de la SCT, M-MMP-2-02-004/04, resistencia a la compresión del Cemento Pórtland, para la prueba de especímenes cúbicos de mortero.

Con esta prueba determinaremos la resistencia a la compresión simple de especímenes cúbicos labrados de roca.

Se labrarán especímenes de roca de 5 x 5 x 5 cm, de las muestras de roca recolectadas, debiendo obtener el máximo número posible y como mínimo 1 espécimen para determinar su resistencia.

Se verificará que los cubos no presenten defectos visibles como fisuras o despostilladuras sufridas al momento de ser labrados.

Una vez corroborada su calidad, se procede a ensayar los especímenes colocando previamente en la placa inferior de la maquina, una pequeña cama de arena con un espesor aproximado de 2 cm, que cubra toda la base del espécimen y en la parte superior del mismo, se colocará arena que cubra toda la superficie, esto con el fin de evitar un impacto directo. Se procede a colocar el cubo entre las dos placas centrándolo, e iniciando el proceso de carga sin interrumpir a una velocidad que produzca la ruptura en un tiempo de 20 a 80 segundos aproximadamente.

Se calcula y reporta como resultado de la prueba, la resistencia promedio a la compresión obtenida de los cubos probados, mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{P_{m\acute{o}x}}{A} \quad (41)$$

Donde:

- R = resistencia a la compresión, en kgf/cm<sup>2</sup>.
- P<sub>máx</sub> = Carga máxima del espécimen, en kgf.
- A = área de la sección transversal del cubo, en cm<sup>2</sup>.



### 2.5.2.7. Ensayo de corte directo (aplicado a rocas).

El ensayo determina la resistencia al corte de pico y residual, en función de esfuerzos normales aplicados, perpendicularmente sobre planos de discontinuidad, y a esfuerzos tangenciales aplicados, de forma transversal a una de las caras de la discontinuidad, hasta producir su desplazamiento. La fuerza normal es constante, mientras que la fuerza tangencial se va incrementando, repitiendo este proceso en varios ciclos. La información de esfuerzo y desplazamiento generados nos permiten determinar los parámetros  $c$  y  $\phi$  de la discontinuidad, tanto valores residuales como los de pico.

Este ensayo no considera la medición de la presión de poro, por lo que los valores se expresan en esfuerzos totales, sin incluir la corrección de la presión de poro.

En algunas ocasiones puede ser conveniente llevar a cabo pruebas in situ que en laboratorio, con el fin de determinar la fuerza representativa de corte de la masa de roca, y más aun cuando las discontinuidades están llenas de material de relleno que determinan su comportamiento.

- **El aparato.**

El dispositivo consiste en una caja de corte desmontable, en dos mitades en donde se introducen las partes de la muestra labrada, y en un marco de acero están montados dos gatos hidráulicos, los cuales aplican los esfuerzos normal y tangencial, a su vez están colocados los medidores de desplazamiento para tomar las lecturas durante el ensayo.

- **Las muestras.**

Tamaño y forma.

El tamaño de las muestras debe ser tal que, se puedan introducir en la caja de corte, dejando que sobresalga 1 cm por encima de la caja, al ser colada la muestra. La forma de las muestras puede ser la que mejor resulte para determinar el área de la superficie de contacto en la discontinuidad, siendo como mínimo 10 veces el tamaño del grano más grande en la muestra, ó teniendo una superficie mínima en el plano de prueba de 1900 mm<sup>2</sup>, de acuerdo a la norma de la ASTM D 5731-05.

Una vez labrada la muestra, previo a ser colada en la caja de corte directo para su ensayo, se determina el coeficiente de rugosidad con el peine de Barton, a escala milimétrica con detalle de 1 mm y con distancia de 10 a 15 cm, llevando a cabo varias lecturas sobre la superficie de la discontinuidad y comparando estos perfiles con la escala que marca la norma de acuerdo a la Figura No. 21, antes mostrada, para asignar el valor correspondiente.



- **Procedimiento.**

Colocar la muestra en la caja de corte directo, de tal forma que el plano de la discontinuidad quede de forma horizontal y sea paralela a la dirección de la fuerza de corte, una vez logrado esto, confinar la muestra con mortero y dejar fraguar para poder colar la mitad restante, esto con el fin de que al momento de fraguar una mitad, la otra se hace coincidir, esto para colarla y evitar que al montarlas estas no coincidan.

Una vez fraguadas ambas muestras, se colocan las cajas en la máquina de corte directo, y se aplica una carga normal de 40 kg sobre la superficie de la discontinuidad, no se aplica la fuerza de corte hasta que se haya estabilizado el desplazamiento vertical en un transcurso de 10 minutos y el desplazamiento normal consecuente sea inferior a 0.05 mm. Mantener la carga normal constante durante el ensayo.

Una vez estabilizada la carga normal, se aplica la fuerza de corte continuamente a una velocidad que nos permita tomar las lecturas, siendo un mínimo de 10 series de lecturas antes de alcanzar la máxima resistencia al esfuerzo cortante (momento en que falla la muestra), ó hasta conseguir un desplazamiento aproximado de 1.5 cm, que es lo máximo que se puede registrar en el manómetro. Este proceso se repite varias veces, retirando la carga de corte y aumentando la carga normal, sin embargo hay que tomar en cuenta que cada repetición de la prueba, la superficie está más dañada.

- **Cálculos.**

Cálculo de los esfuerzos.

Esfuerzo normal aparente.

$$\sigma = \frac{P_n}{A} \quad (42)$$

Esfuerzo cortante aparente.

$$\tau = \frac{P_s}{A} \quad (43)$$

Donde:

- $P_n$  = carga normal.
- $P_s$  = carga de corte.
- $A$  = área nominal inicial de la sección.



Hacer las siguientes gráficas.

- a) Las curvas para representar las relaciones de desplazamiento de corte debido al esfuerzo cortante versus desplazamiento de cortante, y la fuerza máxima de corte frente a la esfuerzo normal.
- b) Las curvas de esfuerzo normal preseleccionado para mostrar las relaciones entre el esfuerzo cortante versus desplazamiento de corte, y desplazamiento normal en comparación con el desplazamiento de corte.

### 2.5.2.8. Ensayo de rozamiento (Tilt Test).

Determina el ángulo de fricción básico y el ángulo de rozamiento.

El ensayo se llevó a cabo en base a lo que se indica en la bibliografía, Ingeniería Geológica. (Gonzales de Vallejo *et al*, 2002)

Este ensayo se realiza con el fin de obtener dos parámetros, el ángulo de rozamiento de la discontinuidad natural,  $\phi$ , y el ángulo de fricción básico,  $\phi_b$ , del mismo material sano y sin rugosidad alguna.

- a)** Ensayo para bloques de roca con discontinuidad:

Determina el ángulo de rozamiento de la discontinuidad ( $\phi$ ).

- Se toman dos fragmentos de roca delimitados por una superficie de discontinuidad.
- Los dos bloques se superponen en el aparato, quedando la discontinuidad entre ellos.
- Estos se van inclinando al subir lentamente la plancha, hasta que comienza a deslizarse uno sobre otro.
- Al momento de iniciar el desplazamiento, inmediatamente se mide el ángulo del plano de la discontinuidad con respecto de la horizontal ( $\alpha$ ).
- Este ángulo,  $\alpha$  se define como el ángulo de rozamiento de la discontinuidad estudiada.
- $\alpha$  está relacionado con el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y el esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ):

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right) = \phi \quad (44)$$

A partir de  $\alpha$  puede obtenerse el valor del parámetro JRC, para el criterio de rotura de Barton y Choubey y estimar su resistencia al corte, de acuerdo a la formula no. 27, antes mostrada.

**b) Ensayo para testigos cilíndricos:**

Determina el ángulo de fricción básico ( $\phi_b$ ).

- Se toman tres testigos de sondeos, se colocan en forma de pirámide, dos abajo y uno arriba y se inclinan hasta que el tercero se desliza sobre los otros dos, al iniciar el desplazamiento del tercer cilindro, se toma el valor del ángulo,  $\alpha$ , este valor se define como el ángulo de rozamiento básico de discontinuidades lisas ( $\phi_b$ ).
- Con este parámetro y la resistencia obtenida con el esclerómetro, se obtiene el ángulo residual,  $\phi_r$ , de acuerdo a la fórmula no. 25 antes mostrada.



### **3. MARCO EXPERIMENTAL.**

El objetivo del marco experimental es realizar la caracterización de la matriz rocosa de materiales de la región de Morelia y a su vez probar el funcionamiento de la máquina de corte directo que se ha implementado para determinar la resistencia al corte directo en discontinuidades rugosas. Se aplicarán los ensayos descritos en el apartado 2.5. y aplicaremos los criterios de rotura pertinentes en el caso de los ensayos de corte directo en discontinuidades naturales.

Se extraerán muestras de la zona de "La Paloma", debido a que es una zona de importancia, ya que atraviesa una falla geológica de tipo normal (Arreygue et al., 2002), produciendo deslizamientos, además de que en la falda del cerro se encuentran construcciones, en la mayoría del tipo de vivienda que pueden ser afectadas, por lo que es conveniente determinar las propiedades del material de esa zona.

Se extraerán muestras de la zona de "Tres Marías", ya que es una zona aledaña a la ciudad de Morelia donde se ha llevado a cabo un desarrollado urbano, sin embargo en los accesos o vías de comunicación hacia ese lugar, se han apreciado algunos casos en donde se ha presentado cierta inestabilidad en algunos taludes. Estudiaremos el material para ver en qué condiciones se encuentra.

#### **3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA.**

##### **3.1.1. LOCALIZACIÓN.**

La capital del Estado de Michoacán es la Ciudad de Morelia y su municipio, que se encuentra localizado al Norte-Oeste del Estado (Figura No. 26), tiene una extensión de 1,308 km<sup>2</sup>. Morelia se ubica en el antiguo valle de Guayangareo, tiene una extensión de 25 km de oriente a poniente y de 15 km de norte a sur. Rodeando a la ciudad se encuentran los volcanes de Atécuro y Punhuato de edad Mioceno-Plioceno y los volcanes Quinceo-Las Tetillas y El Águila de edad Cuaternaria. Estos últimos forman parte del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). La ciudad está ubicada en los 19°42' latitud Norte y los 101°11' de longitud Oeste, con una altura de 1,941 msnm. (Arreygue et al., 2002)

En la Figura No. 26, se muestra la localización de la ciudad de Morelia y con círculos rojos la ubicación de los sitios de estudio.

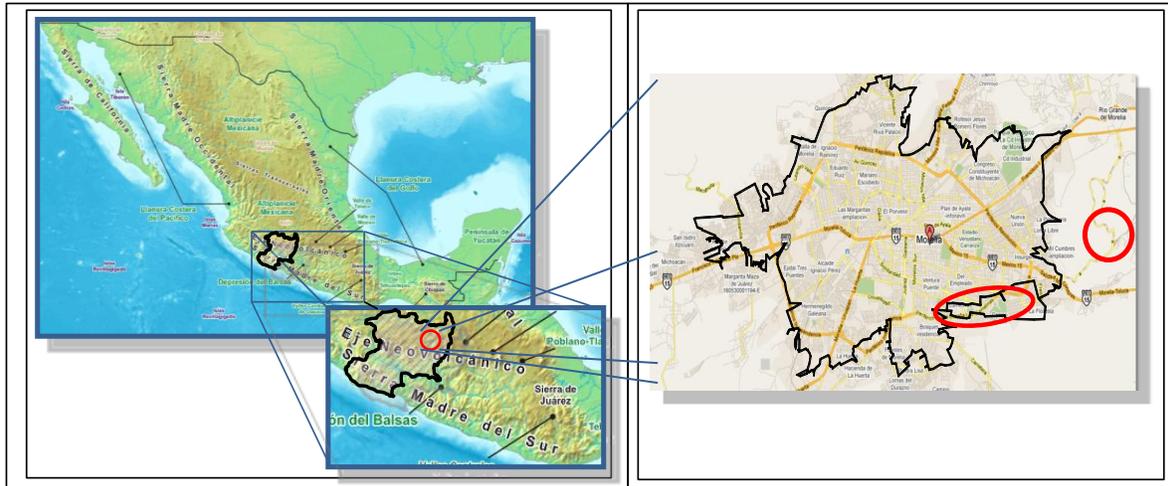


Figura No. 26.- Localización de la ciudad de Morelia y sitios de muestreo.

### 3.1.2. GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE MORELIA.

La ciudad de Morelia se localiza en la intersección de dos provincias geológicas. Al sur, el vulcanismo miocénico formó la Sierra de Mil Cumbres (SMC), que forma parte de la Sierra Madre del Sur (Pasquaré *et al.*, 1991; Silva Mora, 1995). Al norte se encuentran volcanes monogenéticos y conos de lavas pertenecientes al campo volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985), que forma parte del CVM.

### 3.1.3. LUGARES DE MUESTREO.

#### 3.1.3.1. El talud de La Paloma.

El talud de la falla La Paloma está situado en la parte sur de la ciudad de Morelia y se extiende con una dirección E-W. Su altura máxima es de aproximadamente de 200 m. La parte occidental está conformada por materiales piroclásticos (cantera de Morelia), y la parte oriental por material andesítico (andesita Mil Cumbres) (Gaduño *et al.*, 2000).

En esta zona las construcciones han alcanzado la base del talud de la falla La Paloma, como se puede observar en la Figura No. 27, la cual es una falla de tipo normal, donde se han presentado diferentes tipos de movimientos, debido al desarrollo urbano que modifica las condiciones naturales del escarpe.



Figura No. 27.- Vista satelital del talud de La Paloma. (Google Earth, 2010).

### 3.1.3.2. Tres Marías.

Ciudad Tres Marías es un desarrollo inmobiliario ubicado en la ciudad de Morelia, Michoacán. El desarrollo se localiza al oriente de Morelia, está situado en un área de valles, lomas y montañas, comprende 2.000 ha. En la Figura No. 28 se puede apreciar más su descripción.

Está separada físicamente de Morelia por una cordillera de lomas y cerros de vegetación semiárida entre los que destaca el Cerro del Punhuato como punto más alto.



Figura No. 28.- Vista satelital de los accesos a la ciudad de Tres Marías donde se realizaron los muestreos. (Google Earth, 2010).

Para acceder al desarrollo actualmente se puede hacer a través de dos accesos viales, el primero es una vialidad que parte desde la "Avenida Camelinas" en la zona conocida como salida a mil cumbres. Otro es el nuevo acceso que parte también del periférico de la ciudad, en la zona conocida como a Salida a Charo, este acceso es un tramo del inicio de la Nueva Autopista que comunicara con el Aeropuerto Internacional de Morelia.

En las Figura No. 29 y Figura No. 30, se observan los sitios de muestreo de donde se extrajeron los materiales para realizar las pruebas, de las vialidades que llevan a Ciudad de Tres Marías.



Figura No. 29.- Vista panorámica del primer sitio de muestreo en los accesos a ciudad Tres Marías.



Figura No. 30.- Vista panorámica del segundo sitio de muestreo de los accesos a la ciudad de Tres marías.

## 3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES.

### 3.2.1. ORIGEN DE LOS MATERIALES.

La estratigrafía de la región de Morelia está constituida por seis unidades (Garduño *et al.*, 2000) sin embargo, se describirán las dos unidades que nos interesan para su estudio.

#### **Ignimbrita de Morelia (Cantera de Morelia).**

Esta unidad consiste de varios horizontes de flujos piroclásticos de composición riolítica. Del nivel superior se obtiene la cantera y cerca de su zona de emisión se compone de una brecha de rezago constituida por material juvenil y fragmentos líticos accidentales de andesita del Mioceno. Siguen unidades de flujo piroclástico de color claro con bloques o lapilli de pómez alargados. En la cima hay una toba de flujo piroclástico soldada de color rosa, con fragmento de diferentes dimensiones de pómez. Este nivel, más resistente a la erosión, es el que controla la morfología de la zona de Morelia. El espesor de la secuencia varía desde pocos metros a más de 200 m. Su edad es Mioceno de acuerdo a la fecha de  $18 \pm 0.5$  Ma obtenida por Pasquaré *et al.* (1991, citado por Arreygue *et al.*, 2002) al oeste de Morelia.

Esto correspondería a la zona de La Paloma, siendo una riolita, sin embargo corroboraremos esto con una carta geológica de la zona de Morelia.

### Secuencia volcánica del Cerro Punhuato.

Esta secuencia de rocas está constituida por derrames de lava de composición andesítica y dacítica, asociados con domos expuestos en la zona del Cerro Punhuato, al oriente de Morelia. El complejo del Cerro Punhuato presenta una estructura en herradura y los productos piroclásticos asociados forman un abanico al oriente de la ciudad de Morelia, lo que se interpreta como evidencia de una explosión lateral. Su edad no se conoce, pero se podría ubicar dentro del Mioceno ya que subyace a los sedimentos lacustres del Mioceno superior-Plioceno (Israde, 1995, citado por Garduño *et al.*, 2000).

Esta unidad corresponde a la zona de Tres Marías, siendo una andesita dacita la que se trabajará, al igual que en La Paloma corroboraremos su veracidad en la carta geológica de la Figura No. 31.

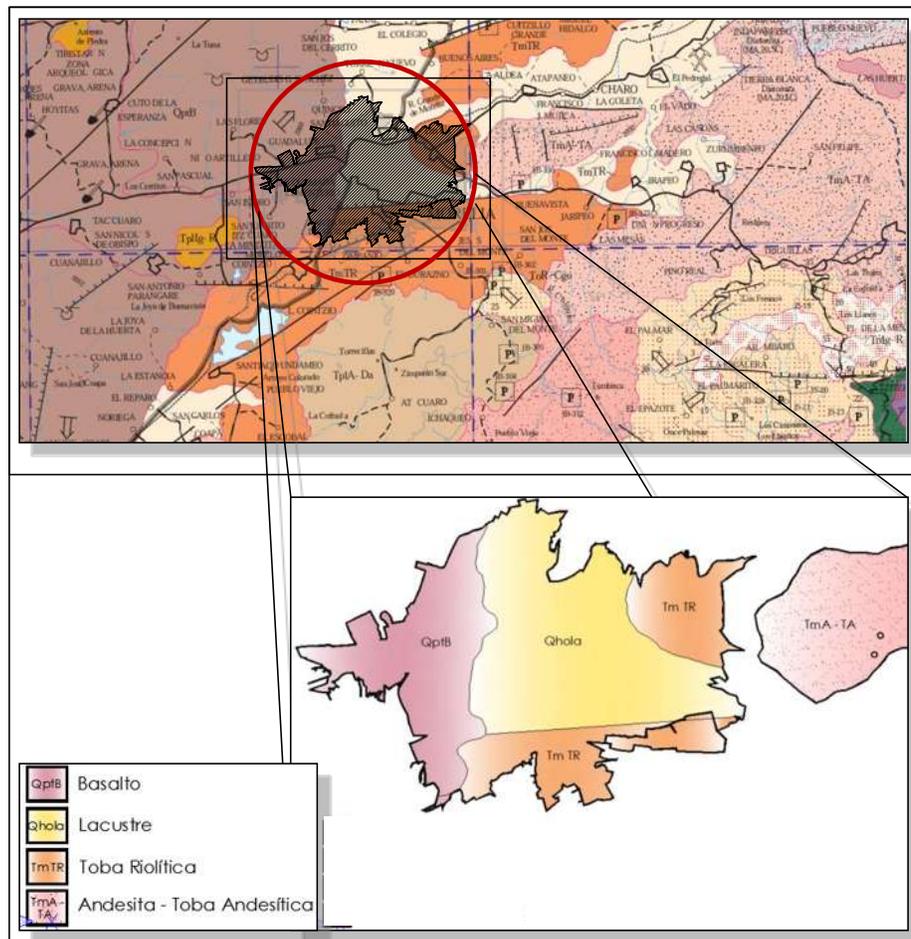


Figura No. 31.- Carta minera INEGI E14-1, correspondiente a la ciudad de Morelia, Edo de México y Guanajuato.



De acuerdo a la carta geológica del INEGI E14-1, que aparece en la Figura No. 31, en la zona de "La Paloma" tenemos que es un Tm TR, lo que quiere decir de acuerdo a su nomenclatura, corresponde a una toba riolítica, y para Tres Marías es un TmA-TA, que es una andesita-toba andesítica, las dos clases de material pertenecen al Cenozoico terciario, Neogeno del Mioceno, en base a la columna geológica de la carta de INEGI.

### 3.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.

- **Toba riolítica.**

Es una roca de grano fino densa, y el equivalente efusivo (volcánico) de un granito. Esencialmente está formada por feldespato alcalino y cuarzo, pero parte de la sílice puede presentarse como tridimita o cristobalita. Son frecuentes los fenocristales de cuarzo, sanidina y oligoclasa. Los minerales oscuros nunca son abundantes, pero la biotita de color castaño oscuro es muy común. En algunas riolitas se encuentra augita y hornablenda. (Cornelis *et al.*, 2003)

Las riolitas pueden ser de aspecto muy uniforme o presentar una estructura fluida, dando una apariencia de bandas o estrías a la roca. La masa puede ser parcial o totalmente vítrea. Cuando la roca es completamente vítrea y de naturaleza compacta, se denomina obsidiana, siendo generalmente negra. Rocas similares vítreas de aspecto pardo de pez se denominan pechstein o refinita. (Cornelis *et al.*, 2003)

En el caso particular de las ignimbritas de Morelia, de acuerdo a su mineralogía podemos decir que el contenido de pómez blanca le confiere un color rosáceo, esto va íntimamente relacionado con la resistencia del material ya que los fragmentos de pómez la alteran haciéndola susceptibles de ser atacada por factores medio-ambientales, por otro lado algunas variedades rosa con menor contenido de pómez son bastante compactas, y una considerable proporción de minerales de hierro y feldespato, es la principal causa de que adquiera su color rosáceo característico. (Felicitas García *et al.*, 2003)

- **Andesita.** Es el equivalente volcánico de la diorita; por lo tanto, está compuesta principalmente por oligoclasa o andesita. El feldespato potásico y el cuarzo no aparecen, o si lo hacen están en cantidades menores al 10%. Pueden presentarse hornablenda, biotita, augita o hiperestena, frecuentemente en fenocristales. Las andesitas se denominan,



generalmente, en base al componente negro: andesita hornabléndica, andesita hipersténica, etc. En algunas andesitas la masa es parcialmente vítrea y en ciertos tipos, muy raros, lo es completamente. (Cornelis *et al.*, 2003)

Las andesitas existen en gran cantidad en ciertas localidades, especialmente en los Andes de América del Sur, de cuyo nombre procede el de la roca.

- **Dacita.** Es la roca volcánica densa equivalente de la granodiorita. Contiene plagioclasa y cuarzo, y ambos pueden aparecer en fenocristales. El mineral oscuro es generalmente hornablenda; la biotita se encuentra en ciertas variedades. Puede hallarse presente algo de vidrio en la masa, pero son escasos los equivalentes vítreos de las dacitas. (Cornelis *et al.*, 2003)

### 3.3. ENSAYO DE LOS MATERIALES.

#### 3.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS.

##### 3.3.1.1. Ensayo de Densidad y Absorción.

El escarpe de La Paloma se estudió en tres zonas, alta, media y baja, de cada una se extrajeron muestras para cada prueba. En campo tomamos lecturas con esclerómetro y determinamos su resistencia a compresión simple, sin embargo para obtener esta resistencia tenemos que determinar su densidad para poder utilizar el gráfico de Miller.

El ensayo se desarrolló en base al apartado 2.5.2.1. y 2.5.2.2. El procedimiento experimental consta de los siguientes pasos, cada uno de ellos tiene una foto descriptiva en la Figura No. 32:

- a) Saturación del material por 24 Hrs.
- b) Secado superficial de las muestras con una franela.
- c) Registro del peso saturado de la muestra superficialmente seca.
- d) Medición y registro del volumen desalojado en el picnómetro por la muestra.
- e) Secado al horno durante 24 hrs. a temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ .
- f) Se deja enfriar el material por un lapso de 5 a 10 minutos aproximadamente.
- g) Registro del peso de la muestra seca al horno.



Figura No. 32.- Procedimiento y equipo para las pruebas de densidad y absorción.

Este ensayo es fácil y rápido de llevar a cabo, toma de dos a tres días para determinar sus propiedades.

### 3.3.1.2. Ensayo de durabilidad.

Se desarrolló en base al apartado 2.5.2.3. Para este ensayo se pesaron muestras arriba de los 600 a 750 grs. debido que al momento de devastar el material para retirar las aristas, este perdía peso con respecto al peso inicial y variaba de 70 a 150 grs. del peso inicial registrado. Se debe tener cuidado con la devastadora debido que al pulir el material sino se sujeta con fuerza puede salir empujado con fuerza; se recomienda utilizar guantes de carnaza, cubre bocas y protectores para ojos y oídos.

En la Figura No. 33 se muestra el procedimiento desarrollado, que consiste en los siguientes pasos:

- Registro del peso del material fragmentado.
- Material antes de retirar las aristas.
- Se retiran las aristas del material mediante la devastadora.
- Material sin aristas.
- Se introducen las muestras al horno por 24 hrs. a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ .

- f) Se registra el peso seco de las muestras.
- g) Se introduce el material en los tambores de la máquina de ensayo de durabilidad durante 10 minutos.
- h) Se observa el estado del material retenido en la malla de 2 mm del tambor.
- i) Se introducen al horno como en el inciso e).
- j) Se registra el peso seco de la muestra.

Esto se realiza durante dos ciclos, sin embargo si se requiere mayor exactitud de la calidad del material en cuanto a su durabilidad, se pueden realizar más ciclos.

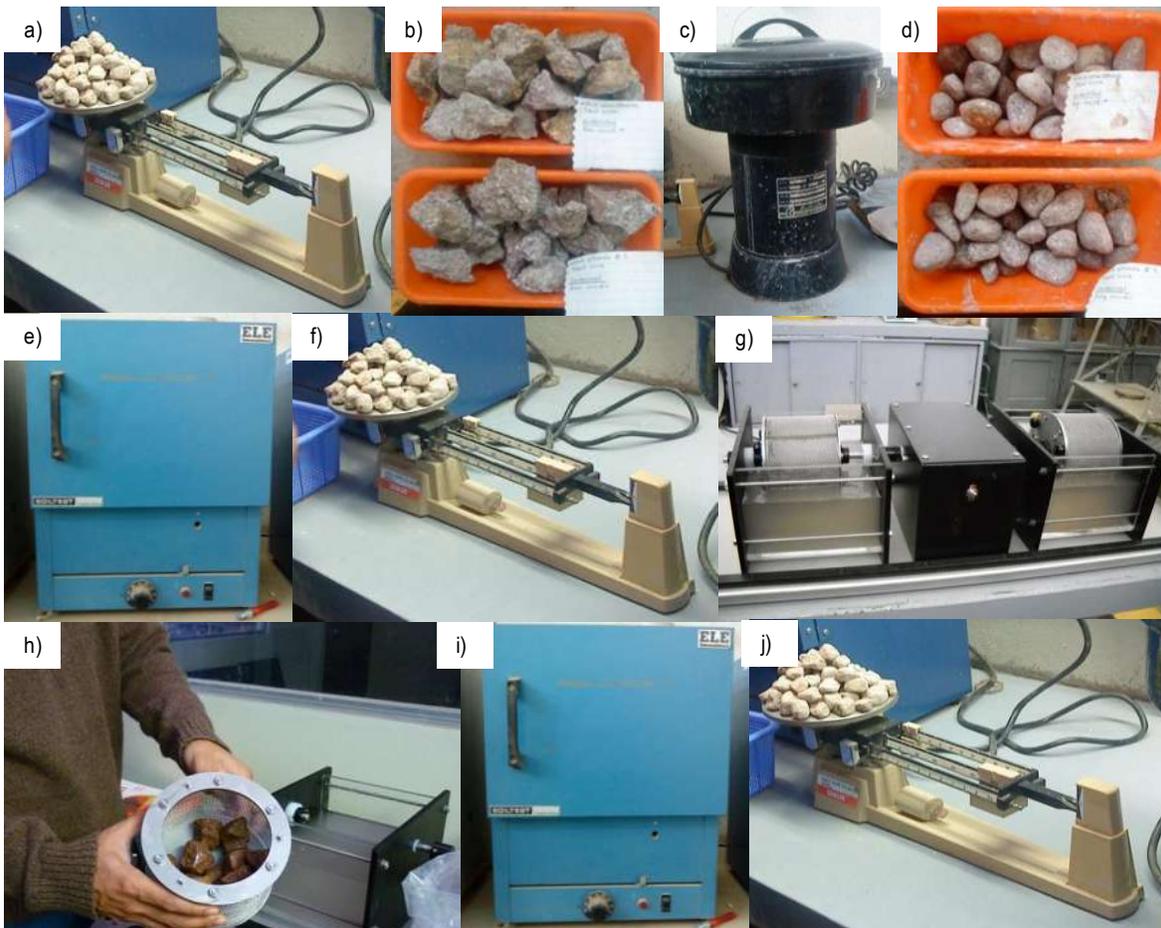


Figura No. 33.- Procedimiento y equipo para la prueba de durabilidad.

Es un ensayo fácil de llevar a cabo, sin embargo es laborioso en el momento de retirar las aristas de cada fragmento con la devastadora, ya que dependiendo de la cantidad de muestras que se tengan, puede resultar en un gran número de fragmentos que se tienen que pulir uno a uno. Retirar las aristas es necesario para determinar una durabilidad más precisa de la roca, ya que con aristas las partes angulosas o puntiagudas se quebrarían con facilidad y tendríamos un peso



bastante inferior y mayor cantidad de fragmentos de material en el tambor de prueba.

### **3.3.1.3. Ensayo de intemperismo acelerado.**

En esta prueba en lo que respecta a la zona del escarpe de La Paloma, solo probamos lo correspondiente a la zona alta, ya que las zonas media y baja son muy absorbentes y resalta a simple vista que hay una meteorización considerable.

En los accesos de Tres Marías, se sometieron los materiales de los dos sitios de muestreo a intemperismo.

La prueba se llevó a cabo conforme a la Figura No. 34, constando de los siguientes pasos:

- a) b) y c), Se disolvió sulfato de sodio anhídrido en polvo en agua destilada, para facilitar el proceso de elaboración lo realizamos en un bote de 4 litros haciendo un orificio en la tapa para poder hacer pasar un agitador de pintura y mediante un taladro realizar el mezclado con mayor rapidez.
- d) Se seleccionaron tres fragmentos como mínimo, de tamaño considerable para apreciar el agrietamiento y la disminución de volumen en cada ciclo dando un peso mínimo de 500 grs.
- e), f), g) Se secan las muestras al horno durante 24 hrs. a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$  C de temperatura, se registra el peso y se someten a la solución de sulfato de sodio cubriéndola con una bolsa para evitar la contaminación de la solución.
- h), i), j), k) y l) Se sacan los fragmentos de roca cuidadosamente de la solución de sulfato de sodio y se introducen en un recipiente de plástico, se observa la formación de cristales en el material y se dejan secar a temperatura ambiente, se introducen en el horno durante 16 hrs. como mínimo, una vez transcurrido el lapso de tiempo se dejan enfriar durante 15 minutos y se registra su peso.

Se realiza este proceso durante cinco ciclos.



Figura No. 34.- Procedimiento y equipo para la prueba de intemperismo desarrollado.

Esta es una prueba en la que se debe tener cuidado con los reactivos que se manejan, ya que la solución de sulfato de sodio en contacto con el oxígeno, reacciona produciendo oxidación. Se recomienda utilizar guantes de látex, protector para los ojos y estar cubierto lo mejor posible para no entrar en contacto con la piel en caso de que al momento de hacer la solución salpique.

### 3.3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS.

Los ensayos que se llevan a cabo para determinar las propiedades de mecánicas de un macizo rocoso son destructivas en su mayoría, a diferencia de la de esclerometría, que únicamente es el impacto que se realiza sobre una pared del material a estudiar. Los ensayos de compresión simple son rápidos a diferencia de la de corte directo, que requiere mayor preparación, se obtiene su resistencia de cada ensayo.

### 3.3.2.1. Ensayo de esclerometría en campo.

Es un ensayo que se realiza sobre el material en estudio mediante el martillo Schmidt, el cual se coloca sobre una superficie sana, sin fisuras, (Figura No. 35a) se limpia la superficie para evitar variaciones en el resultado, (Figura No. 35b) esto se puede apreciar en la Figura No. 35. Se procede a tomar las lecturas necesarias de acuerdo a lo indicado en el apartado 2.5.1.1. y se lleva el registro de la posición en que se tomaron las lecturas para aplicarlo en el gráfico de Miller. (Figura No. 35c)



Figura No. 35.- Lecturas con esclerómetro sobre el macizo rocoso.

### 3.3.2.2. Ensayo de carga puntual.

Es un ensayo sencillo y rápido, se muestra su procedimiento en la Figura No. 36 y se realiza de acuerdo a lo indicado en el apartado 2.5.2.5. De manera general se describe como sigue en los siguientes incisos:

- a) Se escogen muestras representativas que no presenten fracturas, y de tamaño como se indica en el apartado 2.5.2.5.
- b) Para mayor precisión de las dimensiones se utiliza un vernier.
- c) y d) Se coloca la muestra sobre las dos puntas hasta su rotura.
- e) Se debe tomar en cuenta la máquina donde se realice el ensayo al registrar la lectura de la carga de falla, debido a la calibración que tenga.
- f) Se observan las fallas que presentan las muestras.

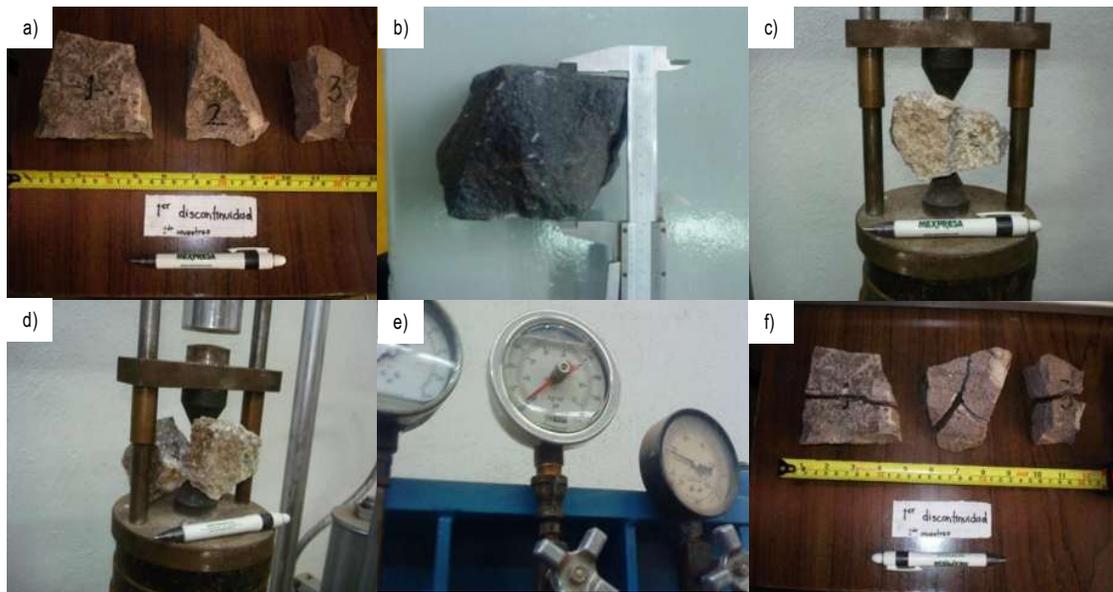


Figura No. 36.- Desarrollo y equipo de la prueba de carga puntual en muestras irregulares.

### 3.3.2.3. Ensayo de compresión simple.

Es un ensayo en donde se labraron cubos de 5 x 5 x 5 cm, para este caso, se someten a prueba de acuerdo a lo indicado en el apartado 2.5.2.6., y se muestra su procedimiento la Figura No. 37.

- a) , b), c), d), e) y f) Una vez labrados los cubos se procede al ensayo, colocando las muestras una a una en la máquina de prueba, se coloca una pequeña cama de arena tanto en la parte inferior como en la superior y se procede a cargar hasta la ruptura registrando la fuerza aplicada.



Figura No. 37.- Procedimiento y equipo que se utiliza en la prueba de compresión simple para cubos de roca de 5x5x5 cm.

#### 3.3.2.4. Ensayo de corte directo

- **Máquina de corte directo.**

Esta máquina fue construida en el laboratorio de materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo para determinar la resistencia a corte directo en discontinuidades de rocas. En la Figura No. 38 se muestran las partes que la integran:

- Consta de un marco de acero ensamblado con bases de acero.
- Una caja de corte directo de acero
- Dos medidores de desplazamiento para medir las deformaciones verticales y desplazamientos horizontales.
- Dos pistones manuales para aplicar la fuerza normal y tangencial, cada uno con sus manómetros correspondientes, el pistón horizontal cuenta con dos manómetros, el primero tiene precisión a dos  $\text{kgf/cm}^2$  y el segundo al decimo de  $\text{kgf/cm}^2$ . El pistón vertical cuenta con un manómetro con precisión al decimo de  $\text{kgf/cm}^2$  ya que la norma ASTM D 5607-02 indica tomar lecturas con aproximación de 40 kgf.

Se monta la muestra y se lleva a cabo la prueba como se indica en la Figura No. 39.

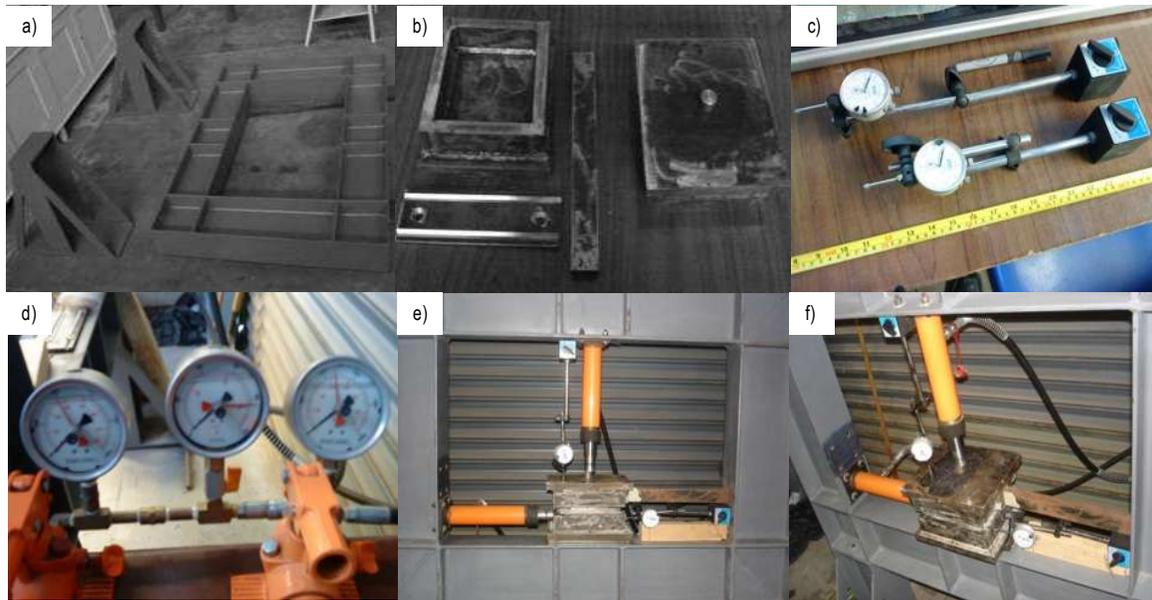


Figura No. 38.- Elementos que integran la máquina de corte directo para rocas.

- **Prueba de corte directo.**

Antes de realizar el ensayo de corte directo es necesario determinar ciertos parámetros que serán utilizados para determinar la resistencia a corte directo de discontinuidades rugosas mediante el criterio de Barton y Choubey, que se indica en el apartado 2.4.6.3. A continuación se indican las mediciones previas al ensayo.

- Ensayo con esclerómetro.
- Ensayo de ángulo de rozamiento (Tilt Test).
- Determinación de la rugosidad de la discontinuidad con el peine de Barton.

En la Figura No. 39 se indica el proceso para llevar a cabo el ensayo de corte directo.

- a) , b) Se seleccionan las discontinuidades y se marcan líneas de guía para facilitar su ensamblaje una vez labradas.
- c) Se determinan su resistencia a compresión simple mediante esclerometría, y se procede a labrar la discontinuidad.
- d) y e) Se determina el ángulo de rozamiento de la discontinuidad mediante el ensayo Tilt Test, deslizando la cara de una discontinuidad sobre otra midiendo el ángulo a partir del cual empiezan a moverse. Sobre las paredes lisas que se generaron al momento de labrar la muestra, se puede

determinar el ángulo de fricción básico realizando el mismo procedimiento mencionado anteriormente.

- f) Se determina la superficie del plano de discontinuidad de ambas partes.
- g) Se determina la rugosidad de la discontinuidad con el peine de Barton, llevando a cabo mediciones a 1 cm en ambas direcciones.
- h) e i) Se procede a colar las muestras en la caja de corte directo.
- j) Se procede a realizar la prueba de corte directo de acuerdo al apartado 2.5.2.7. hasta su ruptura. Se repite este proceso mínimo para tres series de carga y poder obtener la envolvente de falla con el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
- k) y l) Una vez realizada la prueba se procede a retirar de la caja de corte directo con mucho cuidado la muestra probada.



Figura No. 39.-Equipo y procedimiento para la prueba de corte directo.



Se aplica la prueba de corte directo para conocer la resistencia de una discontinuidad mediante valores esfuerzo-deformación registrados durante el ensayo, se obtiene la resistencia de pico en este caso ya que para obtener la resistencia residual se debe de contar con una máquina instrumentada para poder realizar mediciones después de obtener la resistencia de pico, ya que al momento de llegar a la máxima resistencia se tiene que llevar a cabo la prueba en base a desplazamientos controlados, generando la carga correspondiente.

En este caso se mantuvo la carga de corte con un incremento gradual constante registrando los desplazamientos generados hasta su falla, una vez obtenida su resistencia de pico la carga descendía repentinamente, que al momento de incrementar la fuerza tangencial no se registraba presión en el manómetro, únicamente se obtenían desplazamientos pero sin aumento de carga. Por lo que la fuerza debe de ser controlada para obtener la resistencia residual en base a los desplazamientos.

Con las resistencias de pico obtenidas y tres ciclos de carga, cuando menos, podemos obtener la envolvente de falla de Mohr-Coulomb para obtener el ángulo de fricción de pico (para este caso) y la cohesión del material de la discontinuidad probada.

Hay que tomar en cuenta que se aplicaron ciclos de carga y descarga, al momento de realizar la prueba hubo una ocasión en donde después del segundo ciclo de carga se procedió a realizar el tercero, sin embargo, no se obtenía la carga deseada a pesar de que la muestra presentaba buenas condiciones, por lo que se desmontó y se observó que en la discontinuidad se había formado un suelo producto de la fricción de las paredes y de la carga normal. Por lo que se limpió la superficie con un cepillo y se volvió a montar, aplicando una carga normal hasta llegar a la deseada. Se repitió este proceso de limpiar la superficie después de cada ciclo de carga.

Para llevar a cabo la mayoría de las pruebas solo se requiere como mínimo de un operador, sin embargo para la de corte directo es diferente ya que se requiere de 4 personas, dos se ocupan de medir los desplazamientos en los micrómetros, uno para aplicar y medir la fuerza que se genera en la discontinuidad y otro para registrar la información generada. Hay que tomar en cuenta el tiempo en el que se desarrolla el ensayo, ya que inicialmente se aplica una carga normal y después la de corte, una vez que se ha mantenido la carga normal constante durante 10 minutos y no presente ninguna deformación vertical, si no es así será hasta que ya no haya desplazamiento, solamente así se podrá iniciar la prueba. Suponiendo que son tres ciclos como mínimo se consideraría 1 hora aproximadamente para terminar el ensayo.



En el siguiente capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas.



## 4. RESULTADOS.

Se realizaron 8 pruebas para la caracterización del material correspondiente a la zona de La Paloma y Tres Marías, cuatro de estas pruebas son para determinar las propiedades físicas o índice del material y las cuatro restantes para propiedades mecánicas del mismo. A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas llevadas a cabo.

### 4.1. PROPIEDADES FÍSICAS.

#### 4.1.1. ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN.

Se saturaron 17 muestras correspondientes a la zona de La Paloma, 6 muestras de la zona alta, 4 de la zona media y 7 de la zona baja, como se muestra en la Tabla No. 15. Para la zona de Tres Marías se saturaron 10 muestras, 5 para el primer sitio de muestreo y 5 para el segundo. Los resultados obtenidos de las pruebas de densidad y absorción se indican en las Tabla No. 15 y Tabla No. 16.

##### 4.1.1.1. La Paloma

Tabla No. 15.- Valores de los ensayos de densidad y absorción de La Paloma.

Muestra No.	Densidad relativa aparente (gr/ml)	Absorción (%)	Densidad relativa aparente (gr/ml)	Absorción (%)	Densidad relativa aparente (gr/ml)	Absorción (%)
	Zona alta		Zona media		Zona baja	
1	2.226	3.787	2.103	6.748	1.652	19.668
2	2.074	5.976	2	8.964	1.542	20.679
3	2.068	6.428	1.552	19.231	1.533	19.672
4	2.062	7.727	1.352	25.462	1.512	22.228
5	2.025	7.884			1.502	21.577
6	1.94	10.578			1.46	21.584
7					1.453	21.879
<b>Promedio</b>	<b>2.066</b>	<b>7.063</b>	<b>1.752</b>	<b>15.101</b>	<b>1.522</b>	<b>21.041</b>



### 4.1.1.2. Tres Marías

Tabla No. 16.- Valores de los ensayos de densidad y absorción de la zona de Tres Marías.

Muestra No.	Densidad relativa aparente (gr/ml)	Absorción (%)	Densidad relativa aparente (gr/ml)	Absorción (%)
	<b>1er sitio</b>		<b>2do sitio</b>	
1	2.604	0.941	2.062	7.263
2	2.213	6.288	2.040	7.859
3	2.137	8.659	2.033	7.295
4	2.060	8.728	1.934	9.414
5	2.048	11.135	1.634	17.420
<b>Promedio =</b>	<b>2.212</b>	<b>7.150</b>	<b>1.941</b>	<b>9.850</b>

Para apreciar mejor el comportamiento de los valores se presentarán en forma de gráfica los resultados en la Figura No. 40 y Figura No. 41.

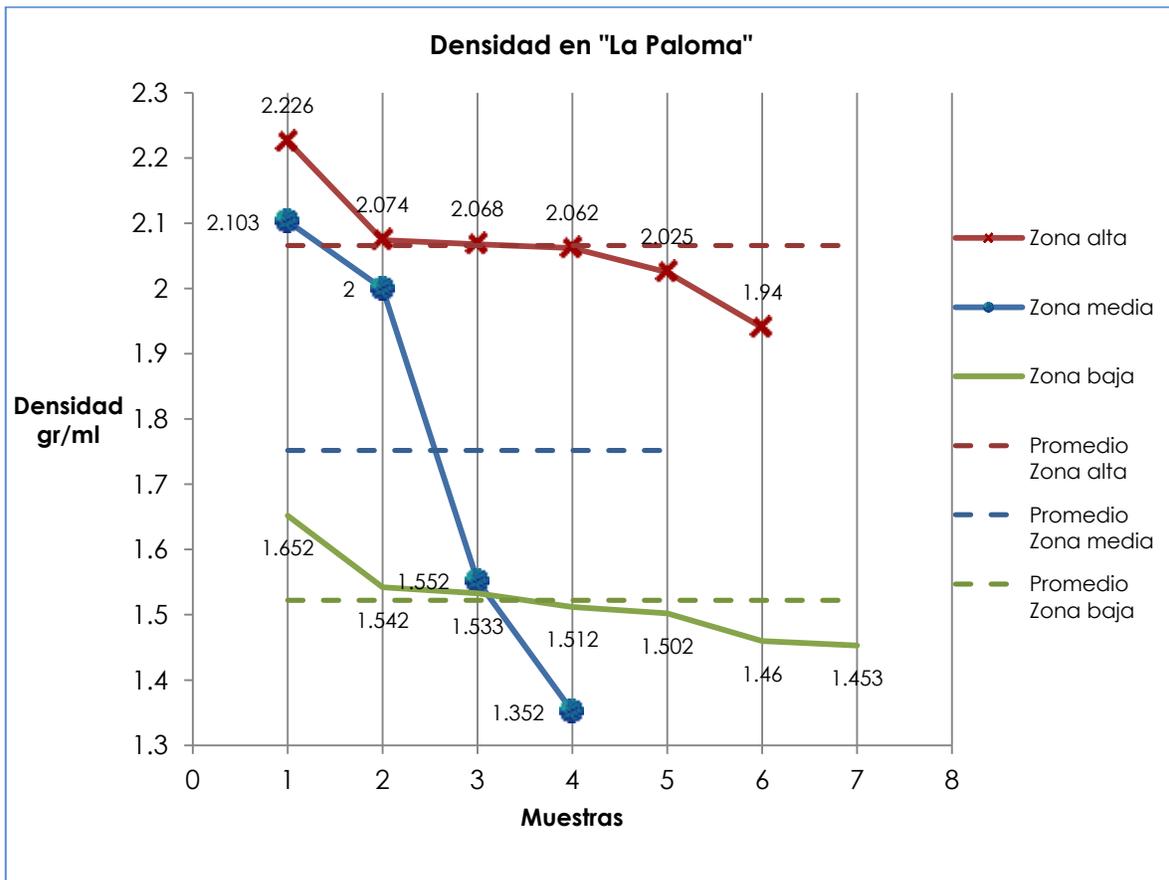


Figura No. 40.- Gráfica de densidad y valores promedio con líneas punteadas de la zona de La Paloma.

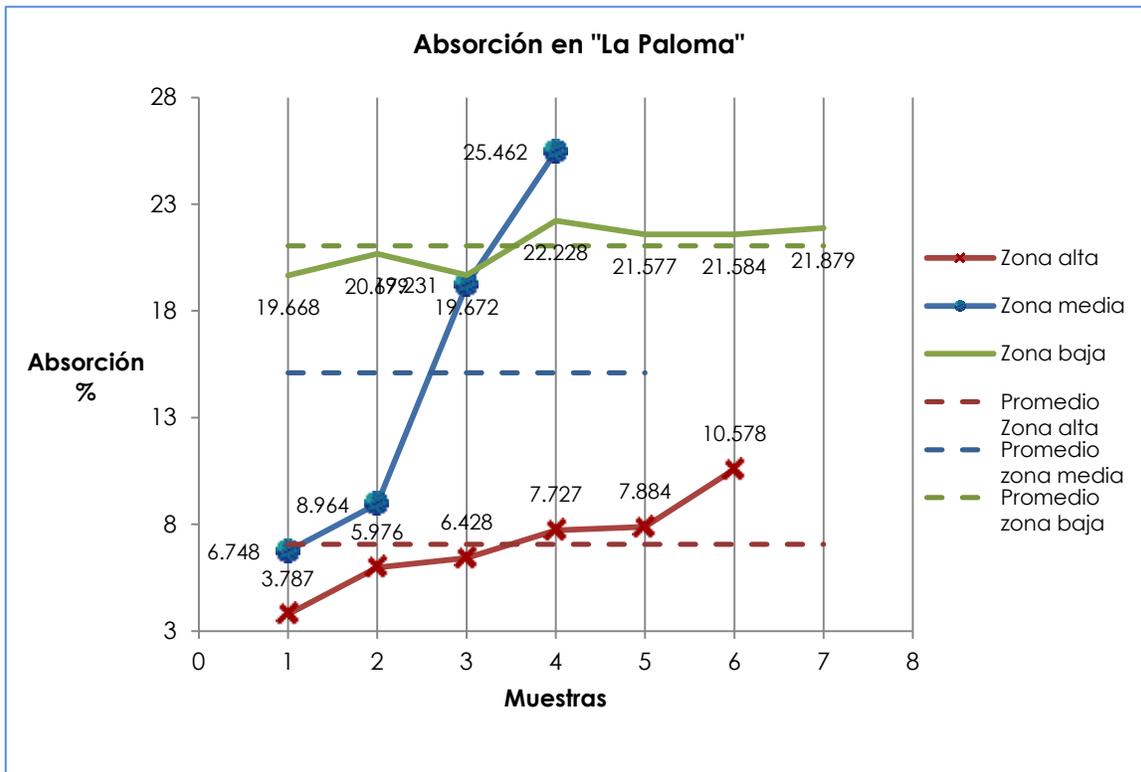


Figura No. 41.- Gráfica de absorción y valores promedio con líneas punteadas de la zona de La Paloma.

Se puede apreciar en la Figura No. 40, que la densidad en la parte alta en la zona de La Paloma es la de mayor rango con respecto a todo el talud y a las demás zonas del lugar, la parte menos densa pertenece a la zona baja, se podría decir que es debido a que está más intemperizada por los escurrimientos en la falda del talud y también por la cercanía de las construcciones que cambian las condiciones naturales del lugar. De igual forma al presentar la parte alta de La Paloma mayor densidad, por consecuencia su absorción será menor, como lo podemos apreciar en la Figura No. 41, y donde la parte más baja tiene menor densidad pero mayor absorción. La zona media tiene valores altos como bajos, se puede decir que presenta dos tipos de materiales, sin embargo las causas de que un material sea menos denso que otro pueden ser varias, el principal factor la intemperización.

Para la zona de Tres Marías los valores de densidad y absorción difieren pero en poca proporción, sin embargo, el primer sitio de muestreo presenta mayor densidad con respecto al segundo como se muestra en la Figura No. 42 y menor absorción como se aprecia en la Figura No. 43.

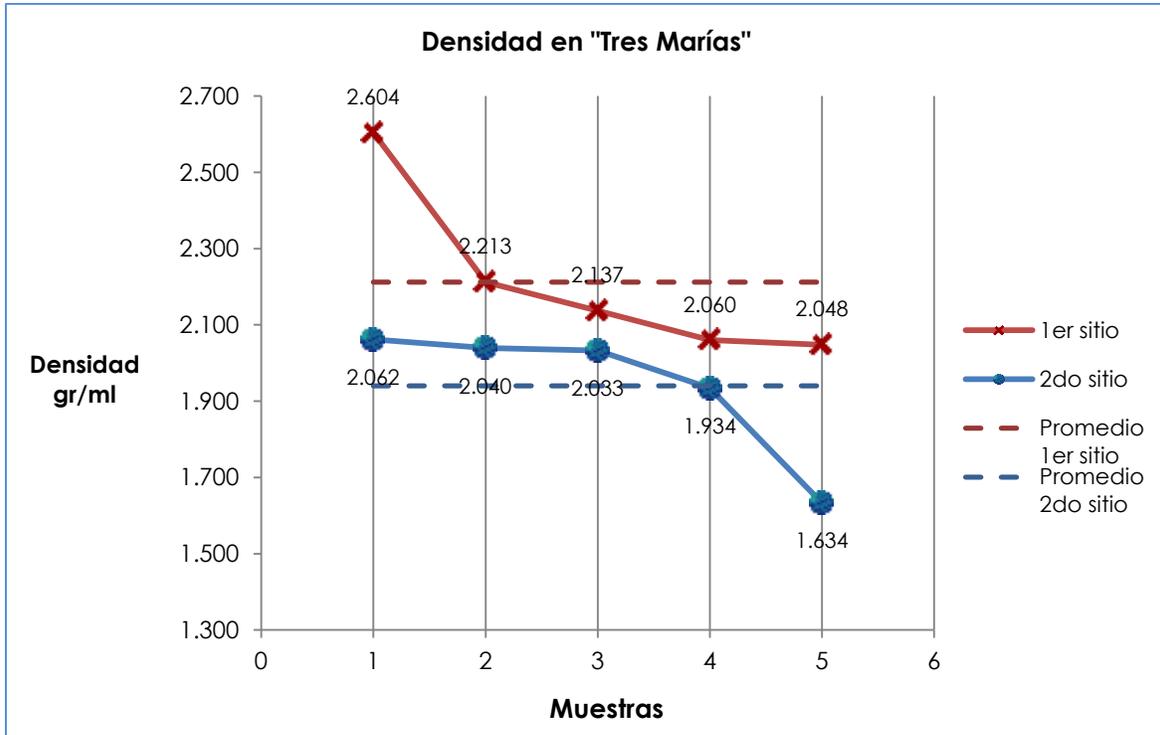


Figura No. 42.- Gráfica de densidad y valores promedio con líneas punteadas de la zona de Tres Marías.

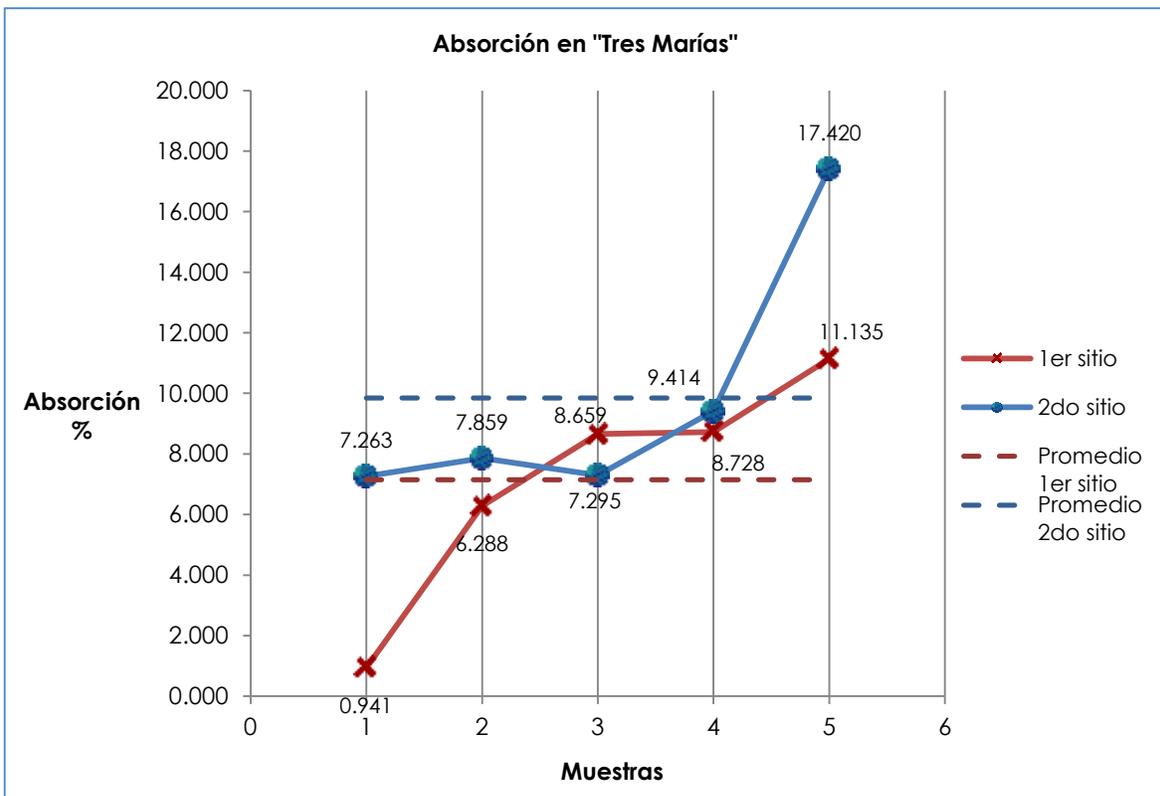


Figura No. 43.- Gráfica de absorción y valores promedio con líneas punteadas de la zona de Tres Marías.



#### 4.1.2. ENSAYO DE DURABILIDAD.

Se realizaron dos ciclos de prueba en el ensayo de durabilidad de acuerdo al apartado 2.5.2.3. Para la zona de La Paloma se probaron 17 muestras de las utilizadas en la prueba de densidad y absorción, con el fin de obtener más características del mismo y para que los resultados correspondan con mayor precisión, estos valores se pueden apreciar en la Tabla No. 17.

##### 4.1.2.1. La Paloma

Tabla No. 17.- Valores del ensayo de durabilidad de la zona de La Paloma.

Muestra No.	Peso inicial	1er ciclo	Resultados	Clasificación	2do ciclo	Resultados	Clasificación
	(gr)	(gr)	Índice de durabilidad (%)	$I_{D1}$	(gr)	Índice de durabilidad (%)	$I_{D2}$
<b>Zona alta</b>							
1	549.1	545.7	99.38	Muy alta	543.5	98.98	Muy alta
2	509.1	502.6	98.72	Alta	502.6	98.72	Muy alta
3	511.5	496.6	97.09	Media-alta	490.5	95.89	Alta
4	504	480.4	95.32	Media-alta	472.5	93.75	Media-alta
5	544	516.9	95.02	Media-alta	514	94.49	Media-alta
6	450.5	424.8	94.30	Media	417.3	92.63	Media-alta
<b>Promedio</b>			<b>96.64</b>	<b>Media-alta</b>		<b>95.74</b>	<b>Alta</b>
<b>Zona media</b>							
1	475.2	472.95	99.53	Muy alta	456.6	96.09	Alta
2	519.5	497.35	95.74	Media-alta	488.2	93.97	Media-alta
3	536.3	483.5	90.15	Media	440.7	82.17	Media
4	473.9	419.8	88.58	Media	382.15	80.64	Media
<b>Promedio</b>			<b>93.50</b>	<b>Media</b>		<b>88.22</b>	<b>Media</b>
<b>Zona baja</b>							
1	483.8	424.1	87.66	Media	388	80.20	Media
2	505.5	439	86.84	Media	415.2	82.14	Media
3	502.5	371.55	73.94	Baja	286.1	56.94	Baja
4	468.3	296.15	63.24	Baja	214.1	45.72	Baja
5	449.3	282.3	62.83	Baja	200.2	44.56	Baja
6	531.8	290.4	54.61	Muy baja	203.35	38.24	Baja
7	513.5	159.8	31.12	Muy baja	74.2	14.45	Muy baja
<b>Promedio</b>			<b>65.75</b>	<b>Baja</b>		<b>51.75</b>	<b>Baja</b>

En la Figura No. 44 y Figura No. 45 se aprecia el comportamiento de los materiales durante los dos ciclos de durabilidad, corroborando que la zona alta presenta una clasificación de media-alta a alta de acuerdo a los valores promedio, la zona media está en un rango de durabilidad medio y la zona baja en un índice bajo. Cada valor corresponde a su densidad, entre mayor densidad presente la roca esta será más resistente y de forma inversa.

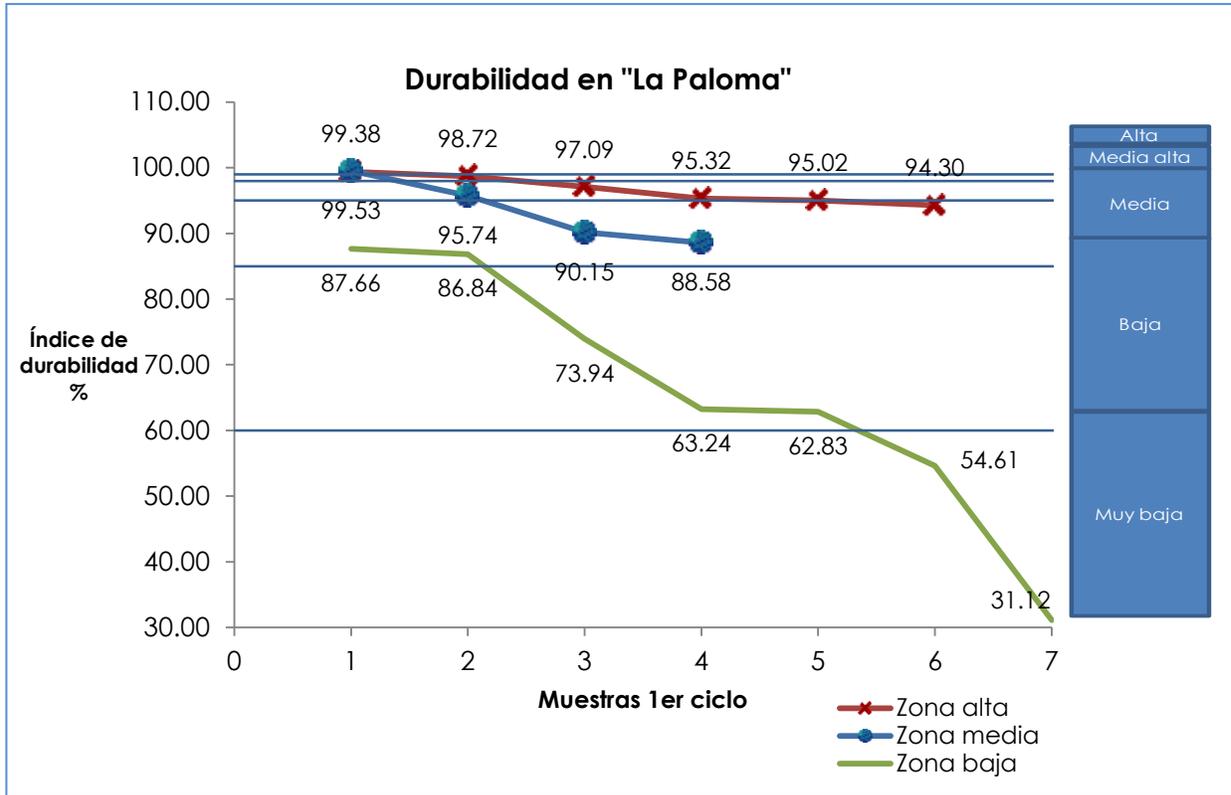


Figura No. 44.- Gráfica de porcentajes del índice de durabilidad y rangos de calidad de La Paloma para el 1er ciclo.

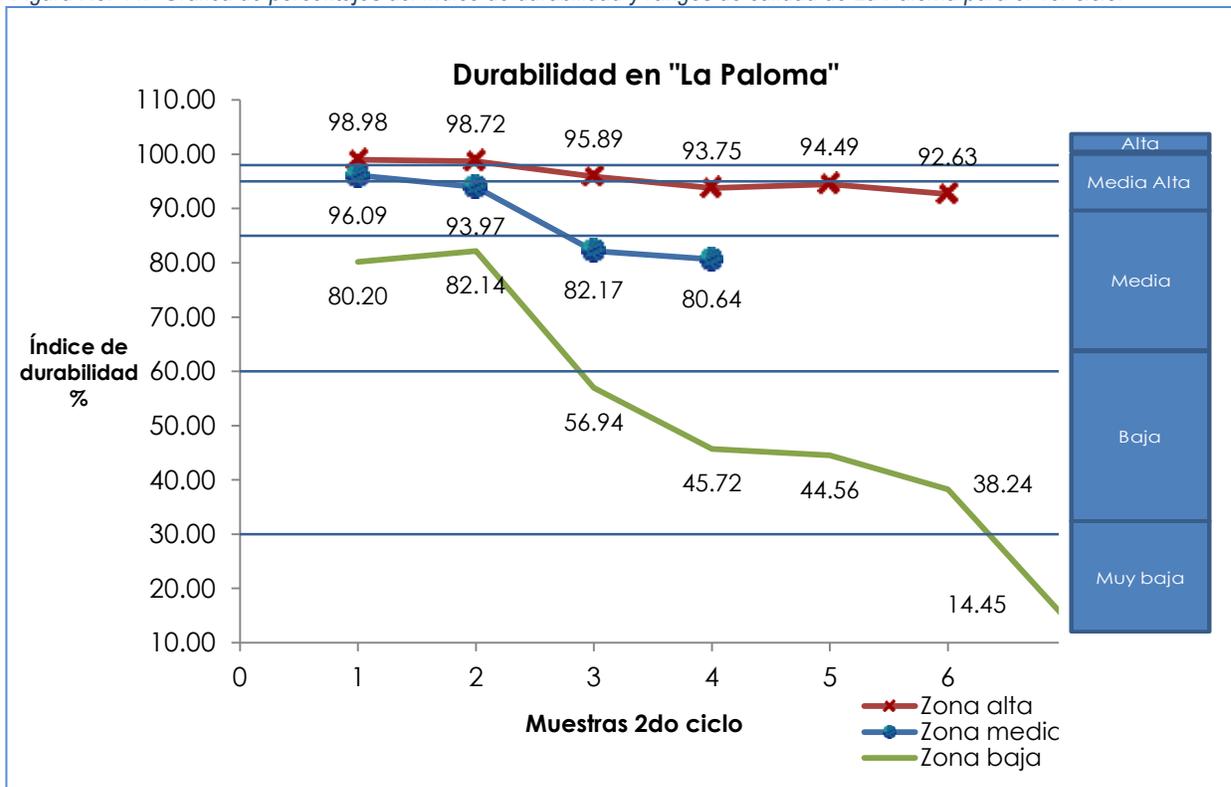


Figura No. 45.- Gráfica de porcentajes del índice de durabilidad y rangos de calidad de La Paloma para el 2do ciclo.



#### 4.1.2.2. Tres Marías

Para la zona de Tres Marías se probaron 10 muestras, de las utilizadas en la prueba de densidad y absorción, presentando los valores obtenidos del ensayo en la Tabla No. 18.

Tabla No. 18.- Valores del ensayo de durabilidad de la zona de Tres Marías.

1er sitio							
Muestra No.	Peso inicial	1er ciclo	Resultados	Clasificación	2do ciclo	Resultados	Clasificación
	(gr)	(gr)	Índice de durabilidad (%)	$I_{D1}$	(gr)	Índice de durabilidad (%)	$I_{D2}$
1	505	505	100.00	Muy alta	505	100.00	Muy alta
2	530	530	100.00	Muy alta	530	100.00	Muy alta
3	495	495	100.00	Muy alta	490	98.99	Muy alta
4	480	480	100.00	Muy alta	475	98.96	Muy alta
5	350	345	98.57	Alta	345	98.57	Muy alta
<b>Promedio</b>			<b>99.71</b>	<b>Muy alta</b>		<b>99.30</b>	<b>Muy alta</b>
2do sitio							
1	575	575	100.00	Muy alta	575	100.00	Muy alta
2	535	530	99.07	Muy alta	530	99.07	Muy alta
3	525	520	99.05	Muy alta	520	99.05	Muy alta
4	535	525	98.13	Alta	525	98.13	Muy alta
5	500	480	96.00	Media-alta	460	92.00	Media-alta
<b>Promedio</b>			<b>98.45</b>	<b>Alta</b>		<b>97.65</b>	<b>Alta</b>

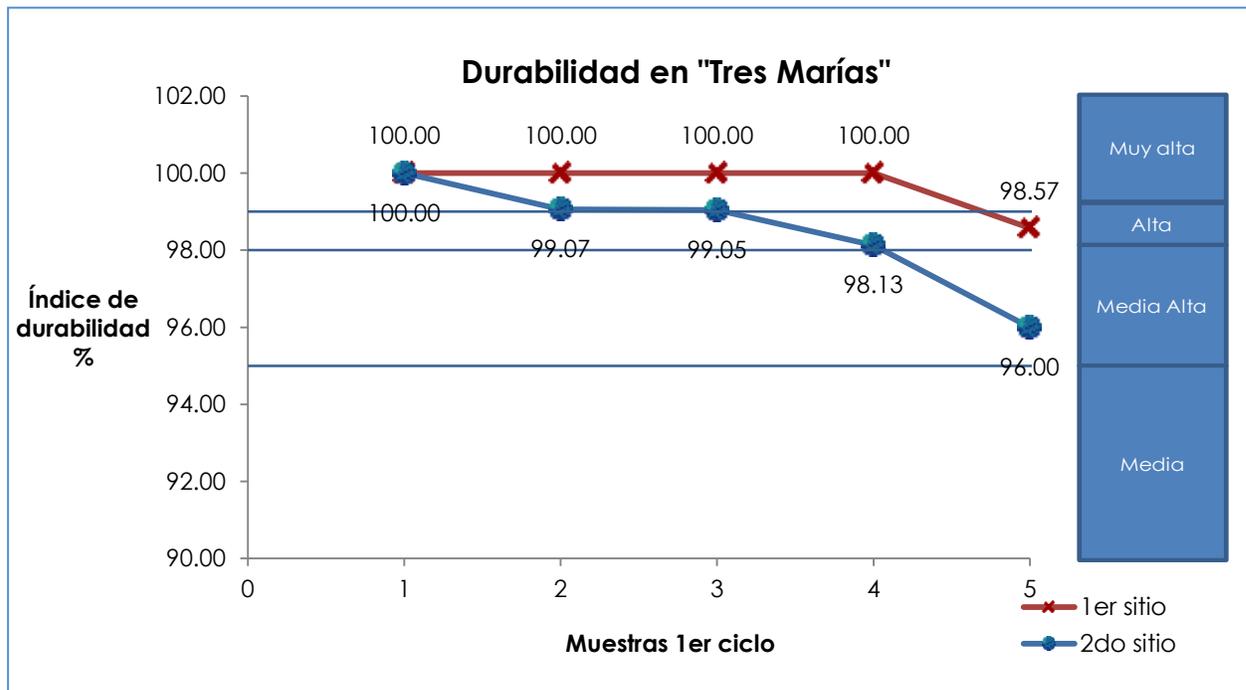


Figura No. 46.- Gráfica de porcentajes del índice de durabilidad y rangos de calidad de Tres Marías para el 1er ciclo.

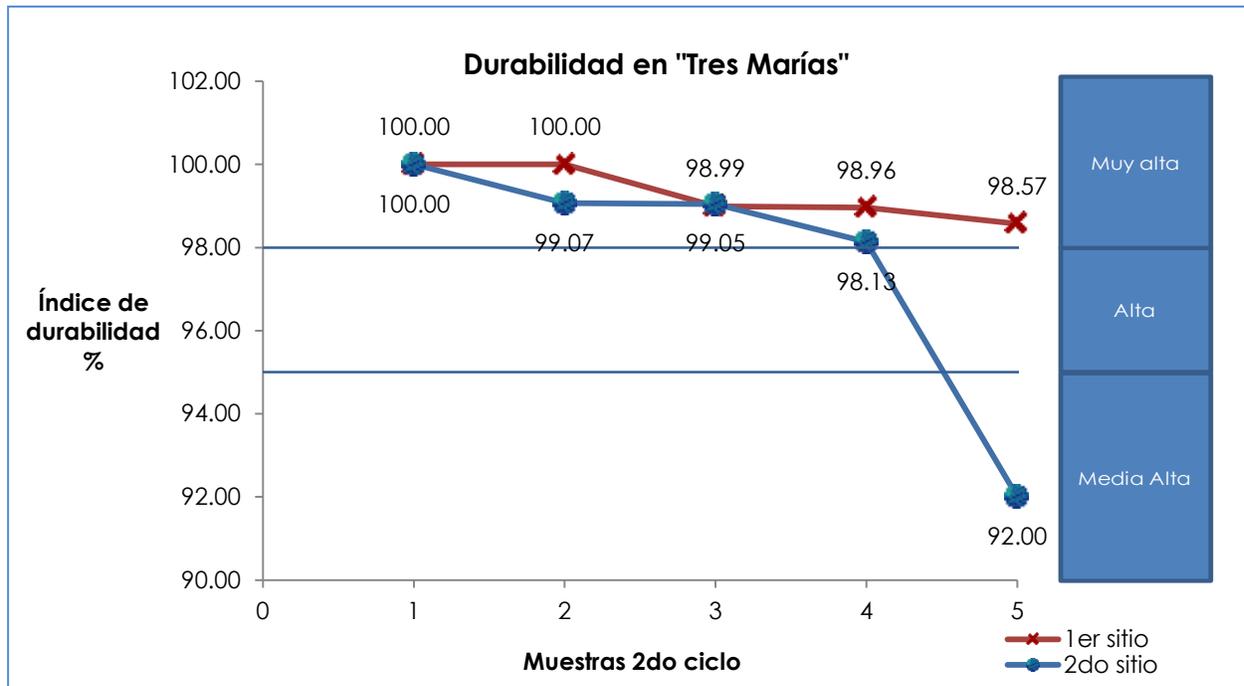


Figura No. 47.- Gráfica de porcentajes del índice de durabilidad y rangos de calidad de Tres Marías para el 2do ciclo.

En la Figura No. 46 y Figura No. 47 se observa el comportamiento de los materiales durante los dos ciclos de ensayo, demostrando que se tiene un material, de acuerdo a los valores promedios, que presenta un índice de durabilidad de alta a muy alta. Sin embargo, hay que considerar que en el segundo sitio de muestreo hay valores que descienden a un 92 % del índice de durabilidad, que se considera de media alta, hay que tomar en cuenta este valor ya que indica que el material tiene un comportamiento de menor resistencia, sin embargo se tomaran en cuenta más pruebas sobre su comportamiento.

En la Figura No. 48 se aprecian los materiales después del segundo ciclo de pruebas, se comparan estos con los tipos de desgaste que presenta la norma ASTM D 4644-04 en la Figura No. 49, concluyendo que todos entran en el tipo I en el cual no se presentan finos ni desportilladuras, aunque en el segundo sitio de muestreo el material No. 5 de la Figura No. 48 se aprecia en que hay material muy pequeño que podría entrar en dado caso en el tipo II, sin embargo de forma general se considera de tipo I.

En lo que respecta a la zona de La Paloma no se cuenta con material fotográfico de las muestras después de los dos ciclos de pruebas.



Figura No. 48.- Material de la zona de Tres Marías después de dos ciclos de ensayo de durabilidad.

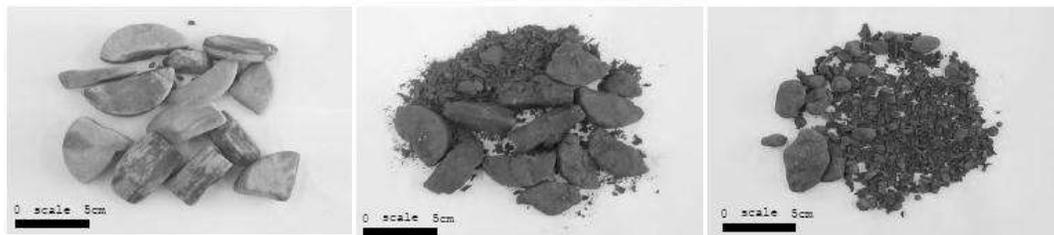


Figura No. 49.- Clasificación tipo I, II y III de acuerdo a la norma ASTM 4644-04.



### 4.1.3. ENSAYO DE INTEMPERISMO ACELERADO.

#### 4.1.3.1. La Paloma

Para el ensayo de intemperismo acelerado en la zona de La Paloma se realizó únicamente en la parte alta ya que en las zonas media y baja presentan una densidad de media a baja y por lo tanto una absorción mayor, por lo que resultaría en una desintegración parcial o total del material. En la Tabla No. 19 se presentan los valores obtenidos del ensayo.

Tabla No. 19.- Resultado del ensayo de intemperismo acelerado de la zona alta de La Paloma.

Zona alta							
Muestra No.	Sitio del material	Peso inicial	1er ciclo	2do ciclo	3er ciclo	4to ciclo	5to ciclo
		(grs)	%P	%P	%P	%P	%P
1	Trinchera Norte	673.9	-0.890	-0.089	2.063	4.096	9.853
2	Trinchera central	638.15	-0.823	0.650	2.374	7.467	14.785
3	Escarpe Lado Este	390.6	-1.229	-1.024	10.010	19.176	28.879
4	Trinchera intermedia	314	-1.975	-0.318	35.223	41.083	48.567
5	Hasta Bandera	310.7	-1.481	-0.676	11.490	60.444	70.550
6	Trinchera Este Ego	188.1	-1.329	0.106	35.885	77.033	88.091
<b>Promedio</b>			<b>-1.29</b>	<b>-0.23</b>	<b>16.17</b>	<b>34.88</b>	<b>43.45</b>

Para apreciar mejor estos valores se presentan de forma gráfica en la Figura No. 50.

Del ensayo se puede observar que hubo cierto desgaste en las muestras, sin embargo las partes más intemperizadas de la zona alta de La Paloma corresponden a la muestra no. 5 y no. 6, se podría decir, que esto es debido a la intervención del hombre al cambiar las condiciones naturales del lugar, ya que se encuentra un mirador y un centro nocturno donde podrían contribuir a cargas dinámicas y al cambiar el uso de suelo podría afectar los escurrimientos y el nivel freático de esos puntos, en específico. Sin embargo, cabe aclarar que estos resultados son representativos hasta cierto punto, ya que se tomaron de una muestra que se obtuvo en campo, y para definir un mejor comportamiento se recomienda tomar un mayor número de muestras que nos representen de manera más clara y exacta el comportamiento del lugar.

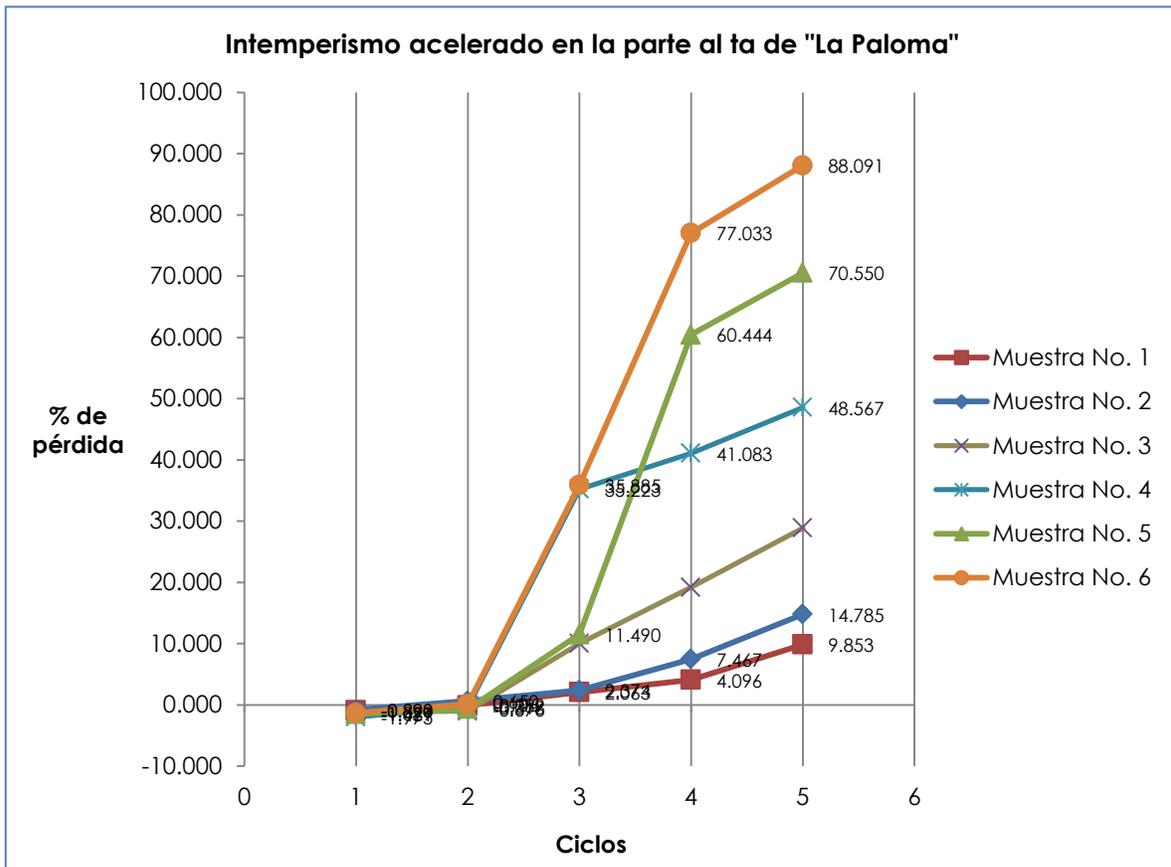


Figura No. 50.- Representación gráfica de los valores obtenidos del ensayo de intemperismo acelerado correspondientes a la zona alta de La Paloma.

#### 4.1.3.2. Tres Marías.

En la zona de Tres Marías se realizó el ensayo de intemperismo acelerado en los dos sitios de muestreo, debido a que la densidad que se presenta en ese lugar es similar a la zona alta de La Paloma, aunque hay muestras que presentan valores inferiores de acuerdo con los valores de densidad y de durabilidad obtenidos. Se presentan los resultados del ensayo de intemperismo acelerado en la Tabla No. 20.



Tabla No. 20.- Resultados del ensayo de intemperismo acelerado de la zona de Tres Marías.

1er sitio						
Muestra No.	Peso inicial (grs)	1er ciclo %P	2do ciclo %P	3er ciclo %P	4to ciclo %P	5to ciclo %P
1	925	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	660	-1.258	-1.561	1.076	2.803	4.167
3	710	-1.972	-2.155	-1.592	3.845	5.563
4	785	-6.522	-6.701	-6.420	14.255	16.140
5	865	-1.422	-1.457	-1.075	33.087	34.370
<b>Promedio</b>		<b>-2.23</b>	<b>-2.37</b>	<b>-1.60</b>	<b>10.80</b>	<b>12.05</b>
2do sitio						
1	950	0.000	7.895	9.474	11.579	15.789
2	880	-2.136	-1.511	10.216	22.852	33.273
3	725	-2.290	-1.738	-1.545	21.517	39.255
4	990	27.778	45.455	46.465	49.495	60.606
5	855	-1.041	22.222	55.520	67.754	79.591
<b>Promedio</b>		<b>4.46</b>	<b>14.46</b>	<b>24.03</b>	<b>34.64</b>	<b>45.70</b>

En la Figura No. 51 y Figura No. 52 se presentan resultados del ensayo de intemperismo acelerado, en forma de gráfico de los sitios de muestreo.

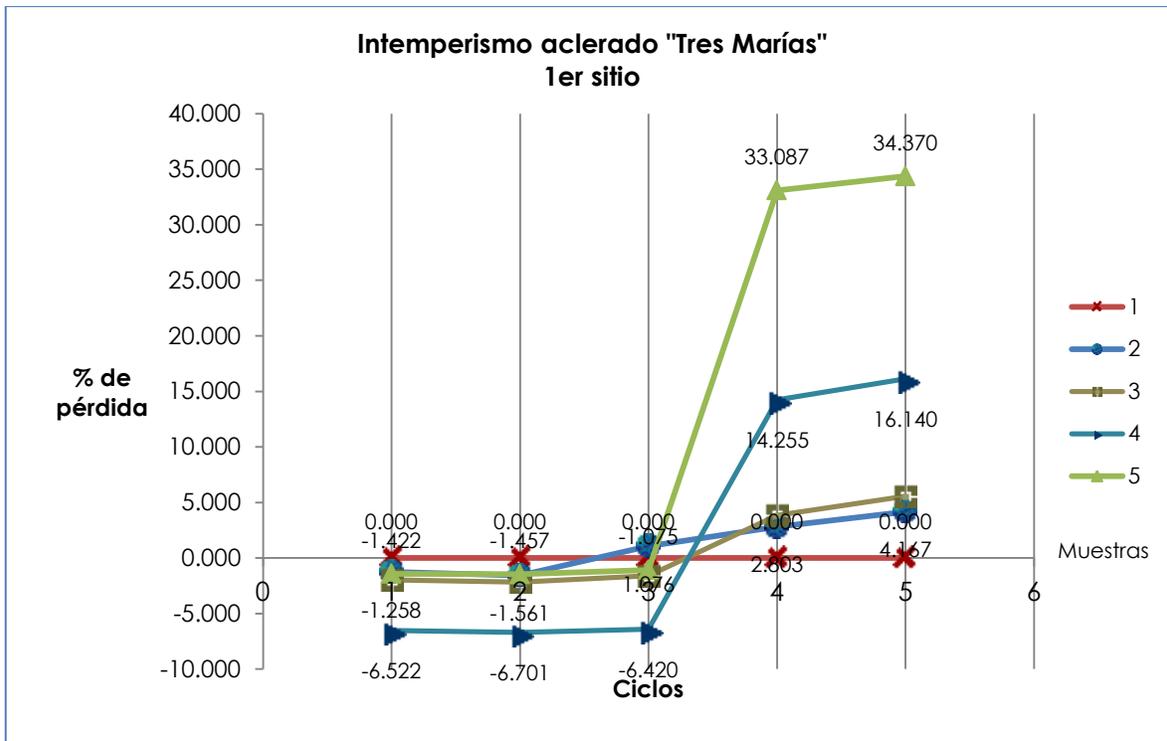


Figura No. 51.- Resultados del primer sitio de muestreo durante cinco ciclos de ensayo.

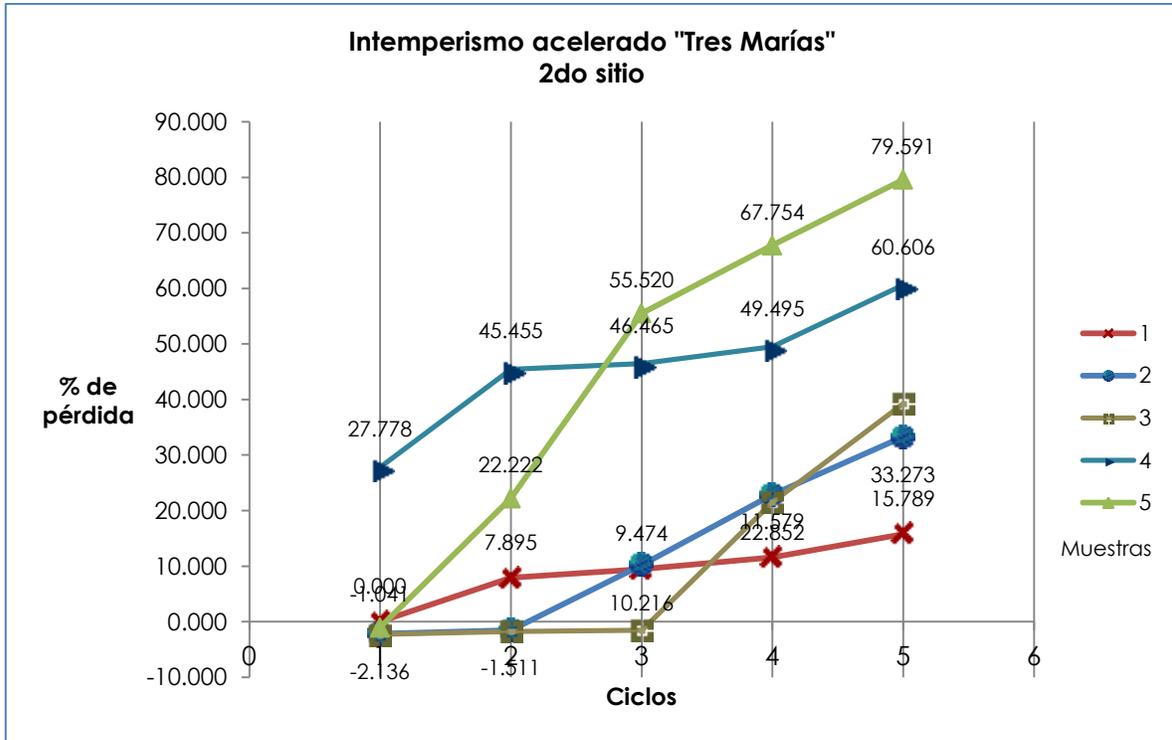


Figura No. 52.- Resultados del ensayo de intemperismo acelerado del segundo sitio de muestreo.

En la Figura No. 51 se puede observar que la pérdida máxima de material obtenida con respecto al peso inicial durante los cinco ciclos de ensayo es de 35% aproximadamente, en lo que respecta al primer sitio de muestreo, sin embargo en la Figura No. 52 se observa que hay una mayor pérdida en el peso, pero hay que considerar que se trata de dos de un total de cinco con respecto del segundo sitio de muestreo, las tres restantes, al igual que en el primer sitio, el valor máximo es aproximadamente de 34% por lo que se podría decir que el primer sitio de muestreo tiene una calidad un poco más alta con respecto al segundo sitio, en cuanto al intemperismo. Se debe considerar que son taludes creados por intervención humana y que modifican las características naturales del lugar.

En la Figura No. 53 se muestra el primer ciclo del ensayo de intemperismo acelerado, en el cual se observa que en la muestra no. 5 hay un desgaste significativo, donde se aprecia una pequeña cantidad de material que se desprendió debido a la solución de sulfato de sodio. En la Figura No. 54 se muestra el último ciclo del ensayo donde se observa que las muestras no. 2, 4 y 5 del segundo sitio son más afectadas.



Figura No. 53.- Muestras de los dos sitios de muestreo en el primer ciclo del ensayo de intemperismo acelerado.

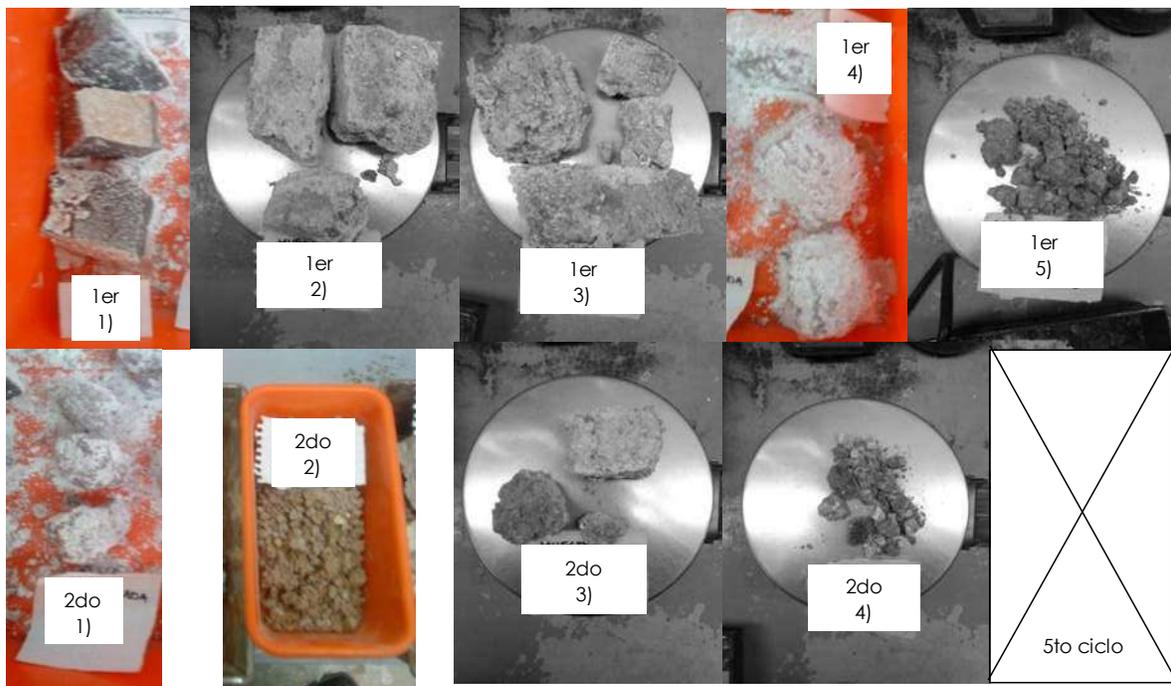


Figura No. 54.- Muestras de los dos sitios de muestreo al final del quinto ciclo del ensayo.



## 4.2. PROPIEDADES MECÁNICAS.

### 4.2.1. ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA.

#### 4.2.1.1. La Paloma.

Se realizaron lecturas en campo sobre el macizo rocoso en partes sanas sin discontinuidades, se registraron los valores en la Tabla No. 21.

Tabla No. 21.- Resistencias a compresión simple obtenidas con el esclerómetro en la zona de La Paloma.

Zona alta		Zona media		Zona baja	
Ubicación	Resistencia kgf/cm <sup>2</sup>	Ubicación	Resistencia kgf/cm <sup>2</sup>	Ubicación	Resistencia kgf/cm <sup>2</sup>
Trinchera Oeste	663	Inicia bajada	311.1	División entre el Campestre y La Paloma	214.2
Trinchera Central	683.4	Lado del tanque	168.3	Lado extremo	183.6
Trinchera Este	382.5	Antiguo Banco de Material	198.9	Lado Poniente de la Iglesia	173.4
Escarpe	708.9			Escurrimiento arriba de casas	234.6
Trinchera Central 2	484.5			Parte baja de La Paloma	188.7
Trinchera Central 2	632.4			Parte baja de La Paloma	183.6
<b>Promedio</b>	<b>592.45</b>		<b>226.1</b>		<b>196.35</b>

Se aprecia que la zona alta presenta mayor resistencia con respecto de la zona media y baja, conforme a lo que se ha obtenido de los ensayos físicos se puede decir que la calidad de la parte alta es de media a buena. En la figura no. 56 se presenta en forma de gráfico las resistencias de cada zona del talud de La Paloma.

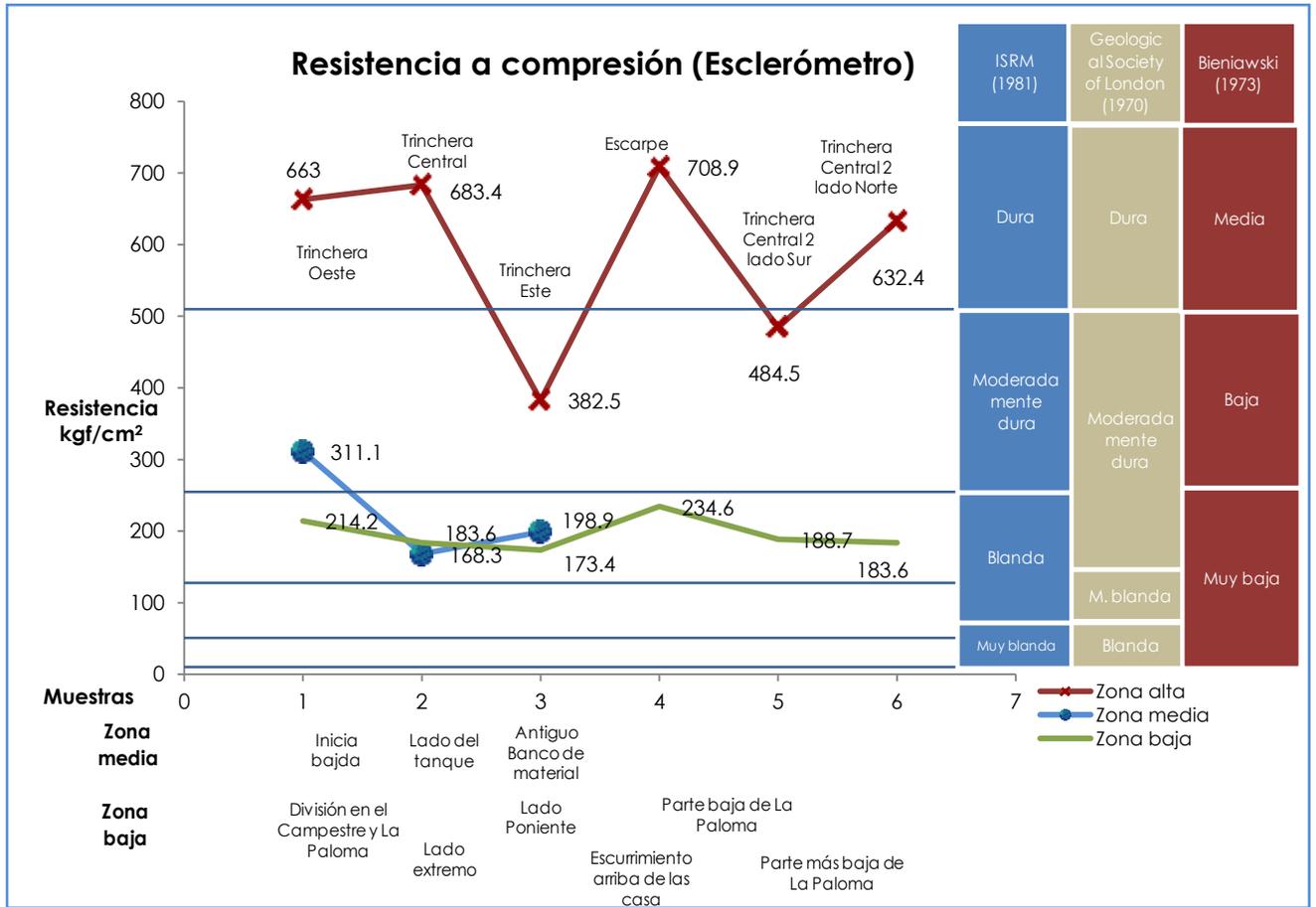


Figura No. 55.- Resistencias a compresión simple obtenidas mediante lecturas con esclerómetro en la zona de La Paloma.

En la Figura No. 55 se observa que la parte baja, dentro de las clasificaciones en base a la resistencia a compresión simple, esta zona se considera de tipo blanda (ISRM, 1981), moderadamente dura (Geological Society of London, 1970) y muy baja (Bieniawski, 1973). La zona media presenta casi la misma clasificación, sin embargo, en la escala del ISRM es de blanda a moderadamente dura. Y por último la zona alta se considera dura en dos clasificaciones, solo en la de Bieniawski su resistencia se considera media.



### 4.2.1.2. Tres Marías.

Se tomaron lecturas de los dos sitios de muestreo de la zona de Tres Marías presentando en la Tabla No. 22 los valores de resistencia obtenidos.

Tabla No. 22.- Resistencias a compresión simple obtenidas con el esclerómetro de la zona de Tres Marías.

	1er sitio	2do sitio
Resistencia kgf/cm <sup>2</sup>		
	418.2	459
	632.4	326.4
	367.2	
<b>Promedio</b>	<b>472.6</b>	<b>392.7</b>

En la Figura No. 56 se observan los valores de la zona de Tres Marías, donde podemos apreciar que el primer sitio de muestreo presenta una resistencia a compresión simple de moderadamente dura a dura. El segundo sitio de muestreo de baja a moderadamente dura, de acuerdo a las clasificaciones en base a la resistencia a compresión simple.

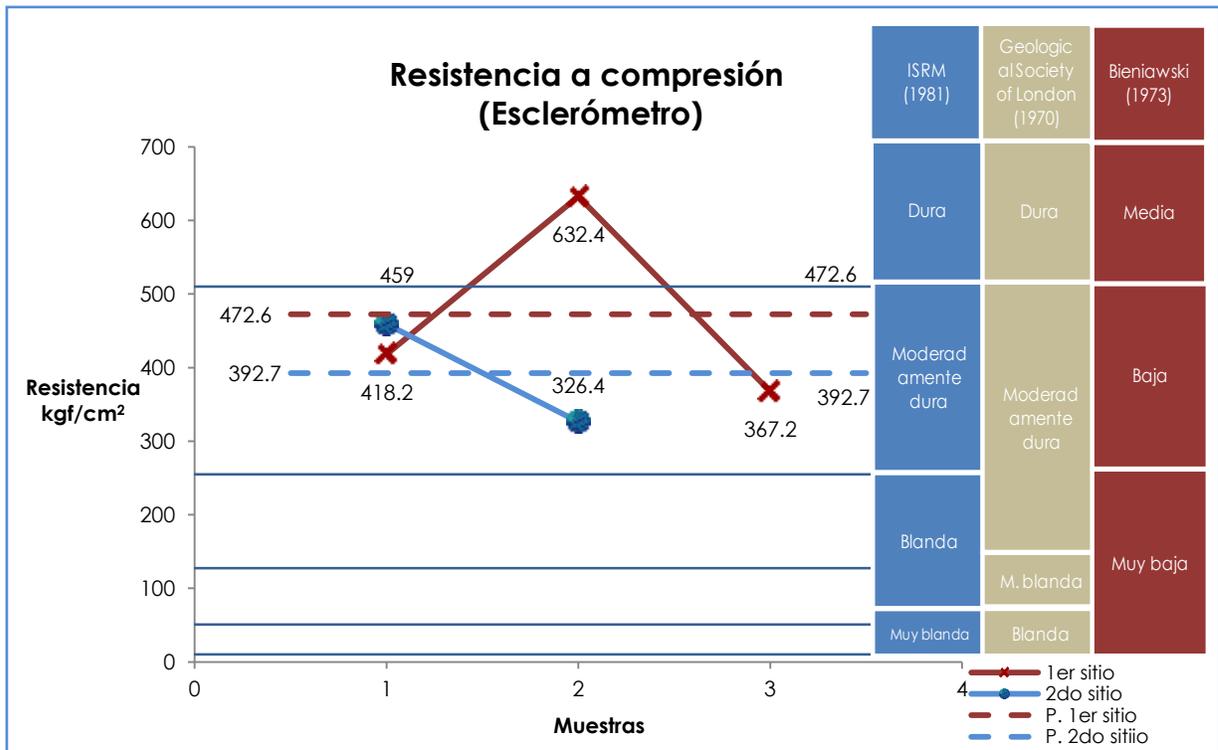


Figura No. 56.- Resistencias a compresión simple obtenidas con esclerómetro de la zona de Tres Marías.



### 4.2.2. ENSAYO DE CARGA PUNTUAL.

#### 4.2.2.1. La Paloma.

El ensayo de carga puntual se realizó en base a lo indicado en el apartado 2.5.2.5.. Se probaron 20 muestras para la zona alta, 20 muestras para la zona media y 35 para la zona baja, los cálculos se presentan en el anexo 6.2, y los valores promedio en la Tabla No. 23. De manera gráfica en la Figura No. 57 se presentan los valores del ensayo.

Tabla No. 23.- Valores promedio de resistencia a compresión simple del talud de La Paloma obtenidos del ensayo de carga puntual.

Muestra No.	Resultados				Clasificación		
	Is (Mpa)	Is (50) (Mpa)	$\delta c$ (Mpa)	$\delta c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
<b>Zona alta</b>	1.08	1.18	25.17	256.73	Mod. dura	Mod. dura	Baja
<b>Zona media</b>	1.09	1.10	22.32	227.70	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
<b>Zona baja</b>	0.52	0.54	11.97	122.12	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja

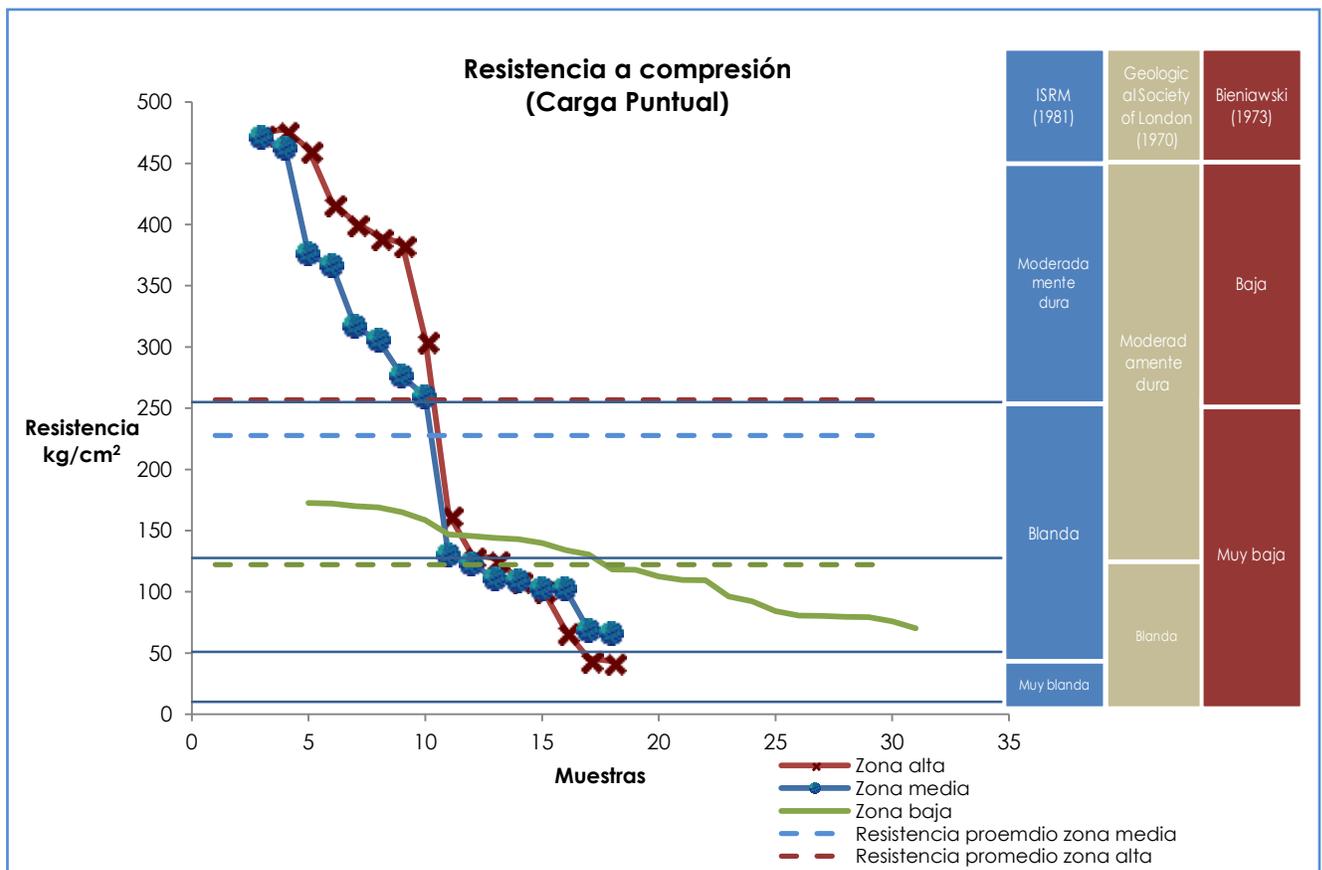


Figura No. 57.- Representación gráfica de resistencia a compresión simple del talud de La Paloma obtenidos del ensayo de carga puntual.



En la Figura No. 57 se observa que la zona alta como la media presentan resistencias a compresión simple moderadamente dura a muy blanda, de acuerdo a las clasificaciones del ISRM y Geological Society of London en cuanto y Bieniawski se considera de muy baja a baja; en lo que respecta a la zona baja su clasificación es blanda dentro de las dos primeras clasificaciones mencionadas anteriormente y muy baja en la de Bieniawski. Con líneas punteadas se representan las resistencias promedio de cada zona.

### 4.2.2.2. Tres Marías.

Para la zona de Tres Marías se probaron para el primer sitio de muestreo 25 muestras y para el segundo sitio 26, los cálculos se presentan en el anexo 6.2 y en la tabla no 24 los valores promedio. En la figura no. 59 se presenta en manera de gráfico los valores obtenidos del ensayo.

Tabla No. 24.- Valores promedio de resistencia a compresión simple obtenidos del ensayo de carga puntual de la zona de Tres Marías.

Muestra No.	Resultados				Clasificación		
	Is (Mpa)	Is (50) (Mpa)	$\delta c$ (Mpa)	$\delta c$ (kgf/cm2)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
1er sitio	2.87	3.06	67.37	687.19	Dura	Dura	Media
2do sitio	2.71	2.87	61.93	631.66	Dura	Dura	Media

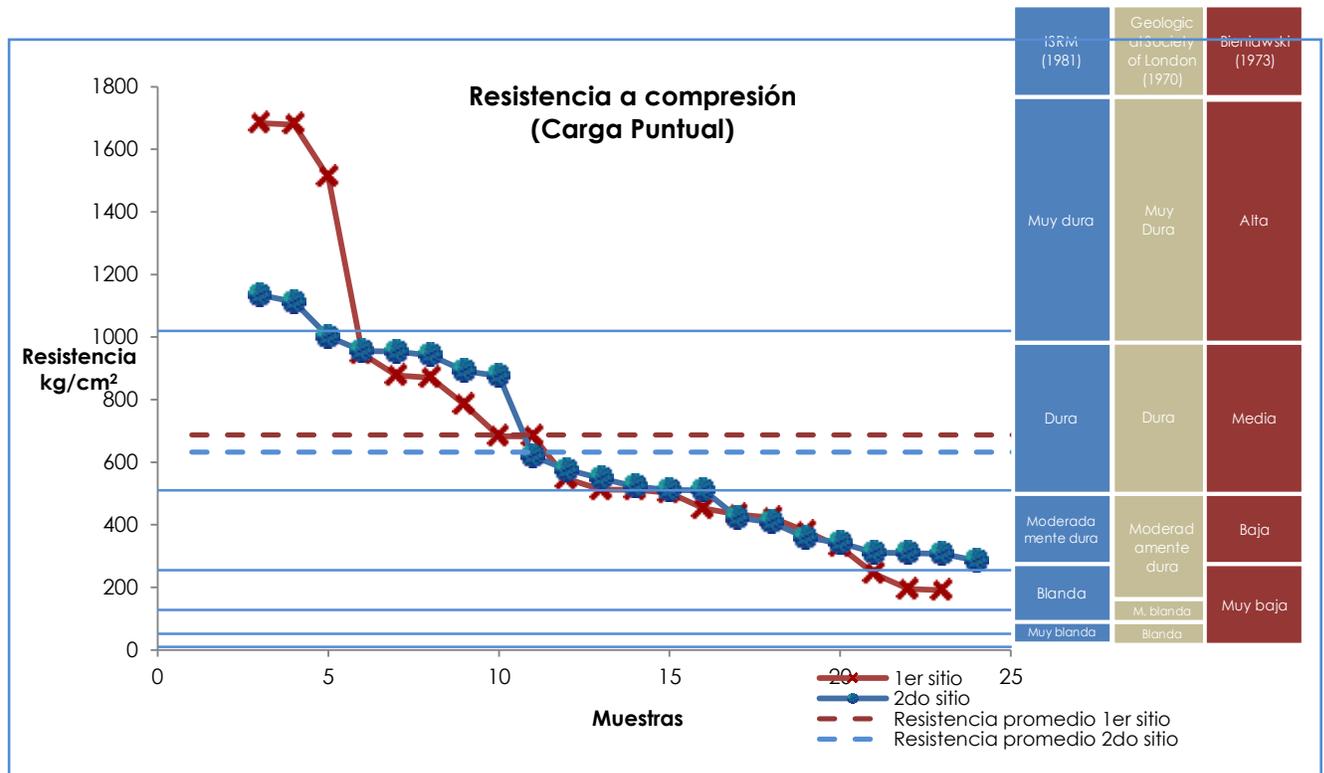


Figura No. 58.- Valores de resistencia a compresión simple del ensayo de a carga puntual de la zona de Tres Marías.

Se observa en la Figura No. 58 que el primer sitio de muestreo muestra una resistencia a compresión simple de muy dura a blanda y de alta a muy baja de acuerdo a las clasificaciones que aparecen en la misma figura del lado derecho. Para el segundo sitio de muestreo se observa aproximadamente la misma clasificación, sin embargo, las resistencias en este sitio son un poco menores con respecto al primero. En la Figura No. 59 se presentan las muestras después de ser ensayadas a carga puntual observando que la falla corresponde a una de tipo "c" de acuerdo a la Figura No. 25, antes mostrada, correspondiente a la norma ASTM D 5731-05, ya que rompen a la mitad y en dos fragmentos únicamente.

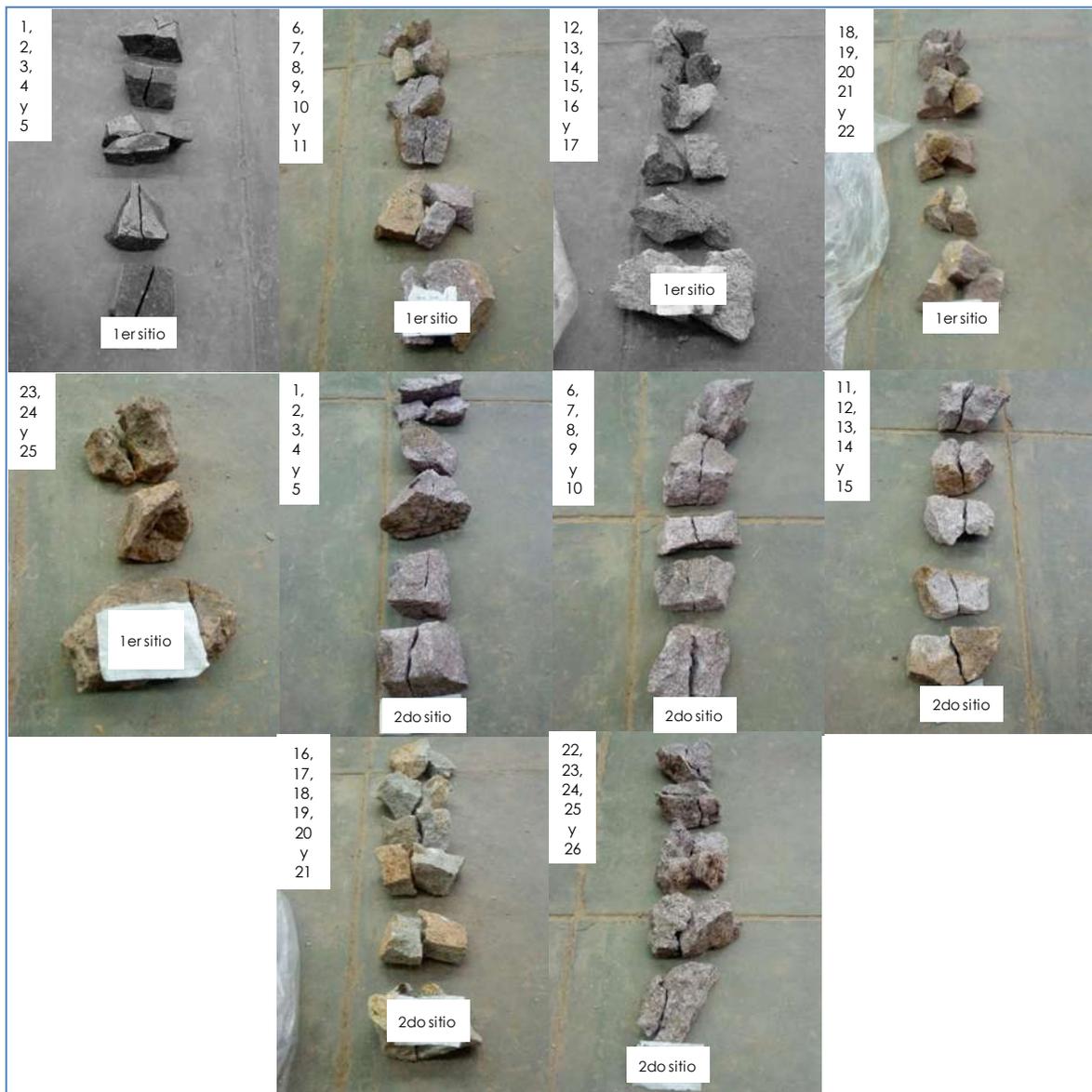


Figura No. 59.- Especímenes después de ser ensayados a carga puntual correspondientes a la zona de Tres Marías.



### 4.2.2.3. Ensayo de carga puntual en discontinuidades.

Se obtuvieron tres discontinuidades naturales de la zona de La Paloma, de las cuales se obtuvieron muestras para realizar el ensayo de carga puntual producto del labrado de las discontinuidades para el ensayo de corte directo. En la Tabla No. 25 se presentan las resistencias a compresión simple promedio de las tres discontinuidades y en el anexo 6.2 se indican los cálculos.

Tabla No. 25.- Valores promedio de resistencia a compresión simple obtenidas del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma.

Muestra No.	Resultados				Clasificación		
	Is (Mpa)	Is (50) (Mpa)	δc (Mpa)	δc (kgf/cm <sup>2</sup> )	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
<b>Discontinuidad No. 1</b>	2.48	2.53	47.14	480.74	Mod. dura	Mod. dura	Baja
<b>Discontinuidad No. 2</b>	2.14	2.12	40.93	417.38	Mod. dura	Mod. dura	Baja
<b>Discontinuidad No. 3</b>	4.75	4.61	88.30	900.43	Dura	Dura	Media

Se presenta en la figura no. 60, de manera gráfica, los valores correspondientes a las resistencias a compresión simple.

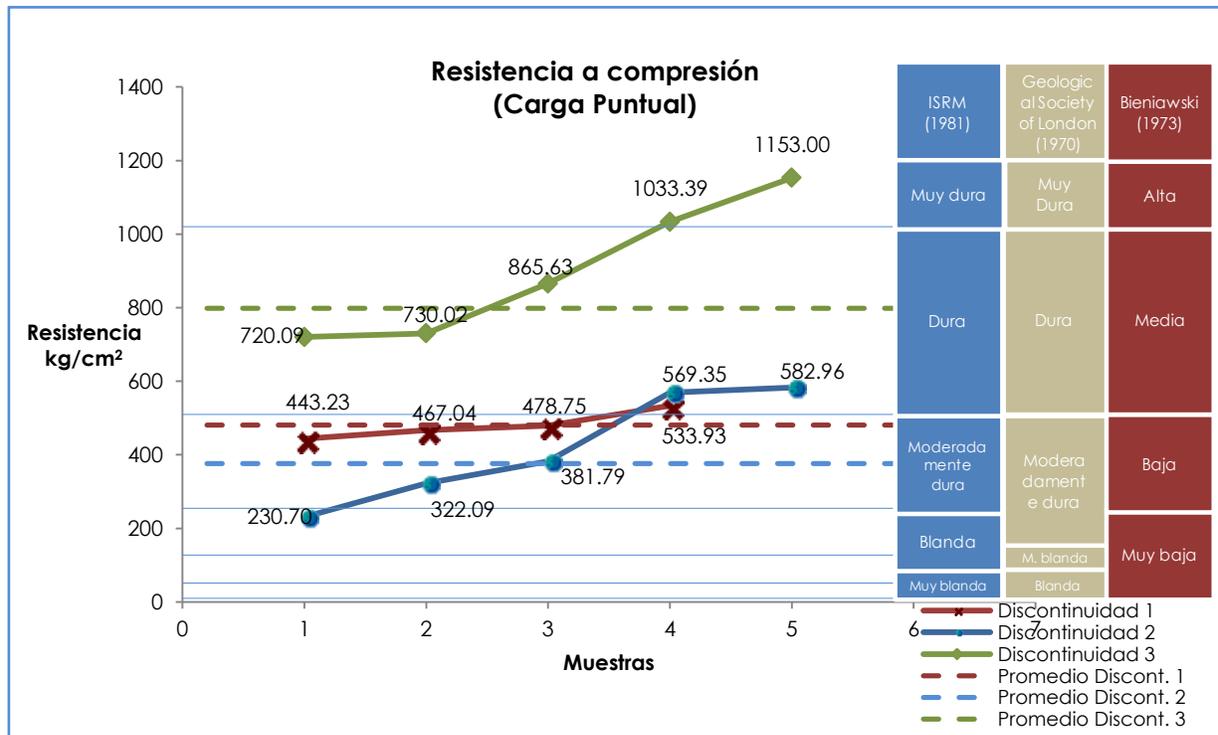


Figura No. 60.- Resistencias a compresión simple obtenidas del ensayo de carga puntual en discontinuidades de La Paloma.

En la Figura No. 60 se observa que la discontinuidad no. 3 tiene una resistencia de dura a muy dura de acuerdo a las clasificaciones que se han ido manejando y la discontinuidad no. 1 su tendencia es más uniforme a una línea recta horizontal siendo su clasificación moderadamente dura, para la discontinuidad no. 2 su resistencia va de blanda a dura. Los valores promedio se indican en líneas punteadas horizontales en la Figura No. 60.

En la figura no. 61 se presentan las discontinuidades antes y después del ensayo, se puede observar como anteriormente que rompe en dos partes y por la mitad.



Figura No. 61.- Muestras de prueba antes y después del ensayo.



En la zona de Tres Marías se obtuvieron, de dos discontinuidades, muestras para el ensayo de carga puntual, de la tercer discontinuidad el producto del labrado para la prueba de corte directo, era muy poco y de dimensiones que no cumplían con la norma ASTM D 5731-05.

En la Tabla No. 26 se presentan los valores promedio de las resistencias obtenidas del ensayo a carga puntual y en el anexo 6.2 se indican los cálculos realizados.

Tabla No. 26.- Resistencias a compresión simple promedio de las discontinuidades de la zona de Tres Marías.

Muestra No.	Resultados				Clasificación		
	Is	Is (50)	$\delta_c$	$\delta_c$	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(kgf/cm <sup>2</sup> )			
<b>Discontinuidad No. 1</b>	3.11	3.40	71.33	727.60	Dura	Dura	Media
<b>Discontinuidad No. 2</b>	1.88	2.13	45.19	460.94	Mod. dura	Mod. dura	Baja

En la Figura No. 62 se observa que la discontinuidad no. 1 presenta una resistencia de calidad dura, y la discontinuidad no. 2 con una calidad de moderadamente dura.

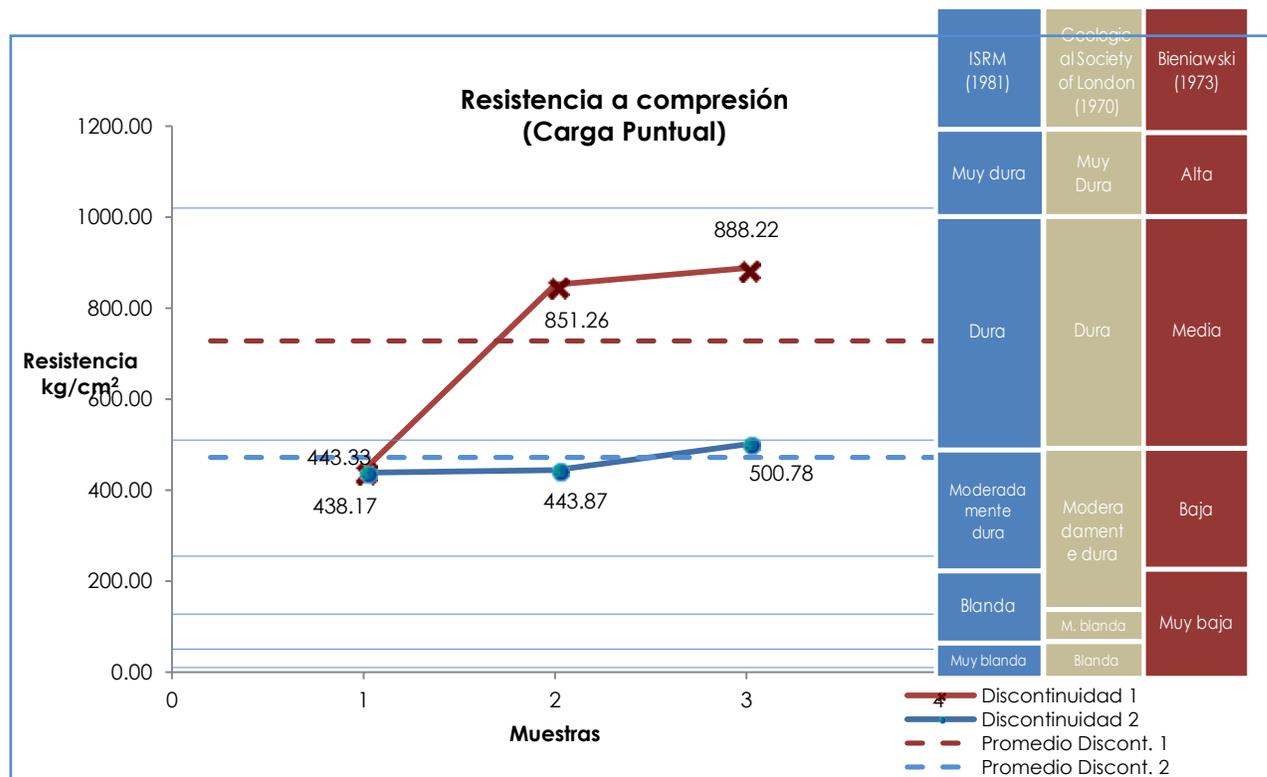


Figura No. 62.- Resistencias a compresión simple de discontinuidades de la zona de Tres Marías.

En la Figura No. 63 se observa que la mayoría de las muestras rompe en dos mitades, con excepción de la primer discontinuidad que aparece en la Figura No. 63b que rompe en tres partes.

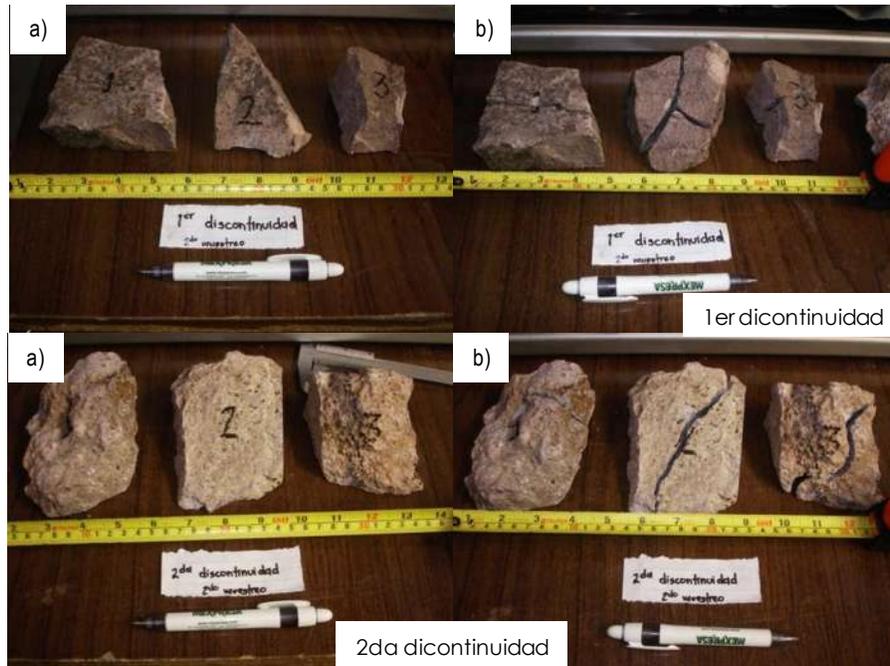


Figura No. 63.- Muestras antes y después del ensayo de carga puntual.



### 4.2.3. ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE.

#### 4.2.3.1. La Paloma.

Se labraron tres cubos de 5x5x5 cm de las discontinuidades, con excepción de la discontinuidad 1, de la cual solamente se pudo obtener 1. En la tabla no. 27 se presentan los resultados del ensayo para determinar la resistencia a compresión simple en cubos de 5x5x5 cm.

Tabla No. 27.- Resistencia a compresión de cubos de 5x5x5 cm correspondientes a La Paloma

COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCAS EN CUBOS DE 5x5x5 cm								
N° cubo	Dimensiones (cm)				Área cm <sup>2</sup>	Presión máquina (kgf/cm <sup>2</sup> )	Presión corregida (kgf)	Resistencia kgf/cm <sup>2</sup>
	A	B	C	D				
<b>Discontinuidad 1</b>								
1	4.70	4.70	4.70	4.70	22.09	50	3,275.33	148.27
							<b>PROMEDIO</b>	<b>148.27</b>
<b>Discontinuidad 2</b>								
1	4.70	4.70	4.70	4.70	22.09	35	2,284.88	103.44
2	4.40	4.50	4.40	4.70	20.25	30	1,954.73	96.54
3	4.90	4.50	5.00	4.50	22.33	37	2,416.94	108.26
							<b>PROMEDIO</b>	<b>102.75</b>
<b>Discontinuidad 3</b>								
1	4.50	4.50	4.50	4.50	20.25	90	5,916.53	292.17
2	4.70	4.30	4.60	4.40	20.25	100	6,576.83	324.78
3	4.70	4.20	4.80	4.20	20.03	80	5,256.23	262.48
							<b>PROMEDIO</b>	<b>293.15</b>

En la Figura No. 64 y Figura No. 65 se muestra de manera breve el procedimiento de cómo se llevó a cabo la prueba de acuerdo a los siguientes pasos:

- a) Se labran los cubos lo mejor posible y se identifican con una letra o número para un mejor control.
- b) Se cabecean para que no haya un impacto directo en la muestra y afecte los resultados.
- c) Se coloca el espécimen en la máquina de prueba y se procede a aplicar carga hasta su falla.
- d) Se observa la falla que se presenta en el espécimen.

Se observa en la Figura No. 64d y Figura No. 65d, que un espécimen rompe en tres partes a diferencia de los demás que rompen en cuatro partes.



Figura No. 64.- Cubos de 5x5x5 cm antes y después de la prueba, segunda discontinuidad, de la zona de La Paloma.

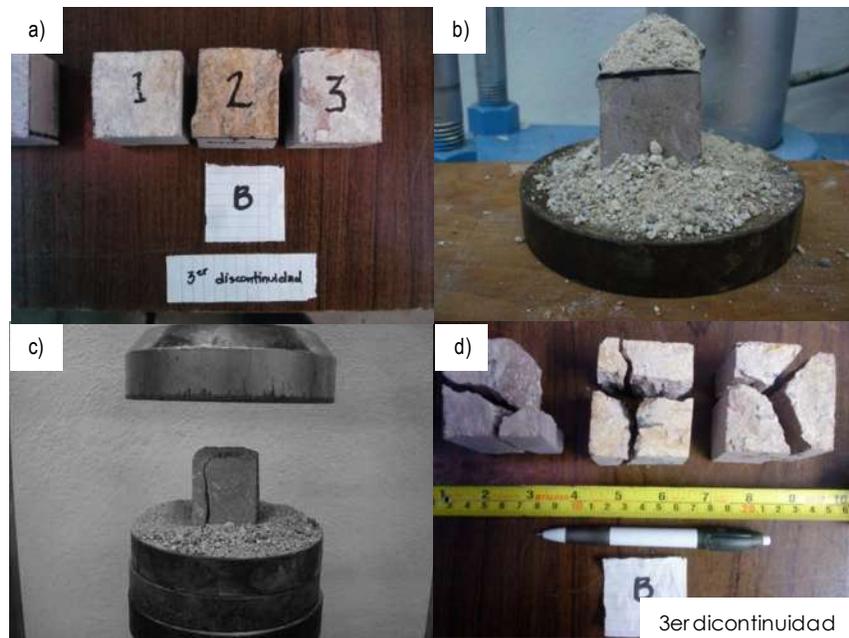


Figura No. 65.- Cubos de 5x5x5 cm antes y después de la prueba, tercera discontinuidad de la zona de La Paloma.

#### 4.2.3.2. Tres Marías.

Para el ensayo se obtuvieron cuatro cubos de 5x5x5 cm, tres corresponden a la discontinuidad 1 y el restante a la no. 2, de la tercer discontinuidad no se pudo obtener ningún cubo. En la tabla no. 28 se presentan las resistencias obtenidas del ensayo.

Tabla No. 28.- Resistencia a compresión simple de cubos de 5x5x5 cm de la zona de Tres Marías.

COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCAS EN CUBOS DE 5x5x5 cm								
N° cubo	Dimensiones (cm)				Área cm <sup>2</sup>	Presión máquina (kgf/cm <sup>2</sup> )	Presión corregida (kgf)	Resistencia kgf/cm <sup>2</sup>
	A	B	C	D				
<b>Discontinuidad 1</b>								
1	4.70	5.10	5.00	4.80	24.01	90	5,916.53	246.42
2	4.80	4.70	4.80	5.10	23.51	90	5,916.53	251.63
3	4.90	4.80	4.90	4.90	23.77	70	4,595.93	193.39
<b>PROMEDIO</b>								<b>230.48</b>
<b>Discontinuidad 2</b>								
1	5.10	4.90	5.00	5.00	25.00	54	3,539.45	141.58
<b>PROMEDIO</b>								<b>141.58</b>

En la figura no. 66 y figura no. 67 se muestran los especímenes de prueba antes y después del ensayo.



Figura No. 66.- Cubos de 5x5x5 cm antes y después del ensayo, discontinuidad 1 de la zona de Tres Marías.



Figura No. 67.- Cubo de 5x5x5 cm antes y después del ensayo, se obtuvo de la discontinuidad no. 2 de la zona de Tres Marías.

Para un mejor entendimiento de las resistencias a compresión simple obtenidas por los distintos métodos antes mencionados se presentará la Figura No. 68 y Figura No. 69 los valores obtenidos de cada ensayo para observar la variación que hay respecto de un ensayo con respecto del otro. Cabe mencionar que en la Figura No. 69 únicamente se cuenta con lecturas tomadas con el esclerómetro, ya que no se pudo ensayar a carga puntual ni a compresión simple en cubos de 5 x 5 x 5 cm, debido a que la muestra de esta discontinuidad no proporcionaba el material suficiente para ello.

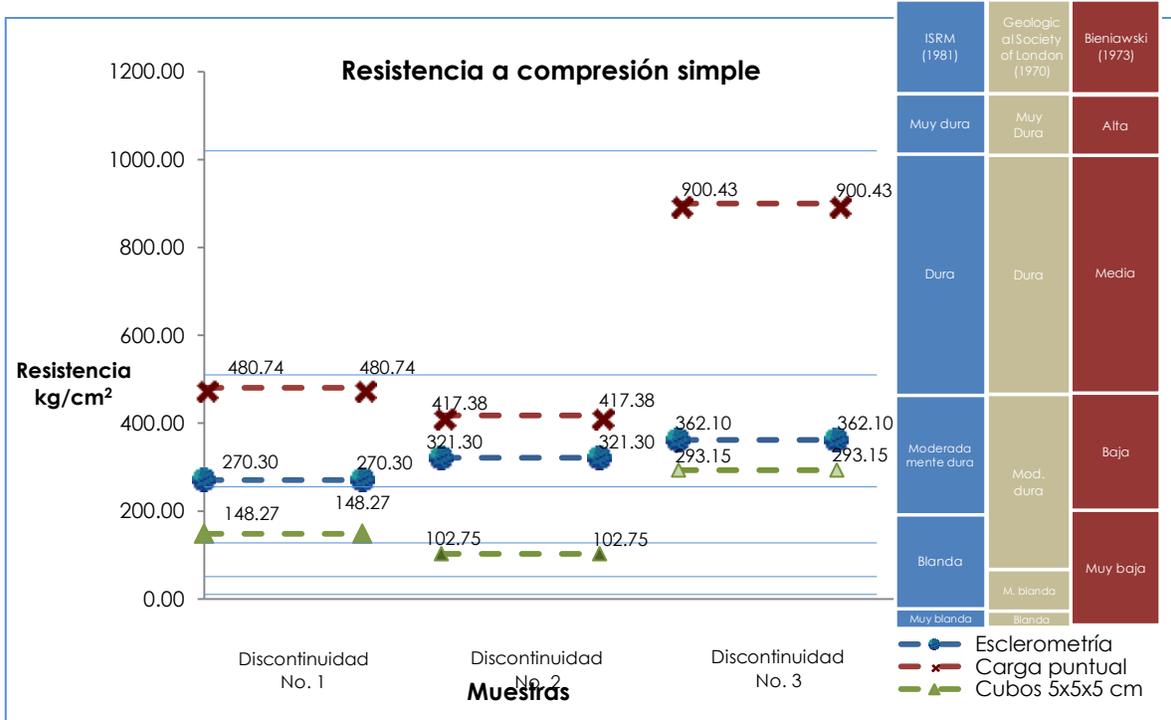


Figura No. 68.- Resistencias a compresión simple obtenidas de los ensayos de carga puntual, esclerometría y compresión simple de cubos de 5 x 5 x 5 cm de la zona de La Paloma

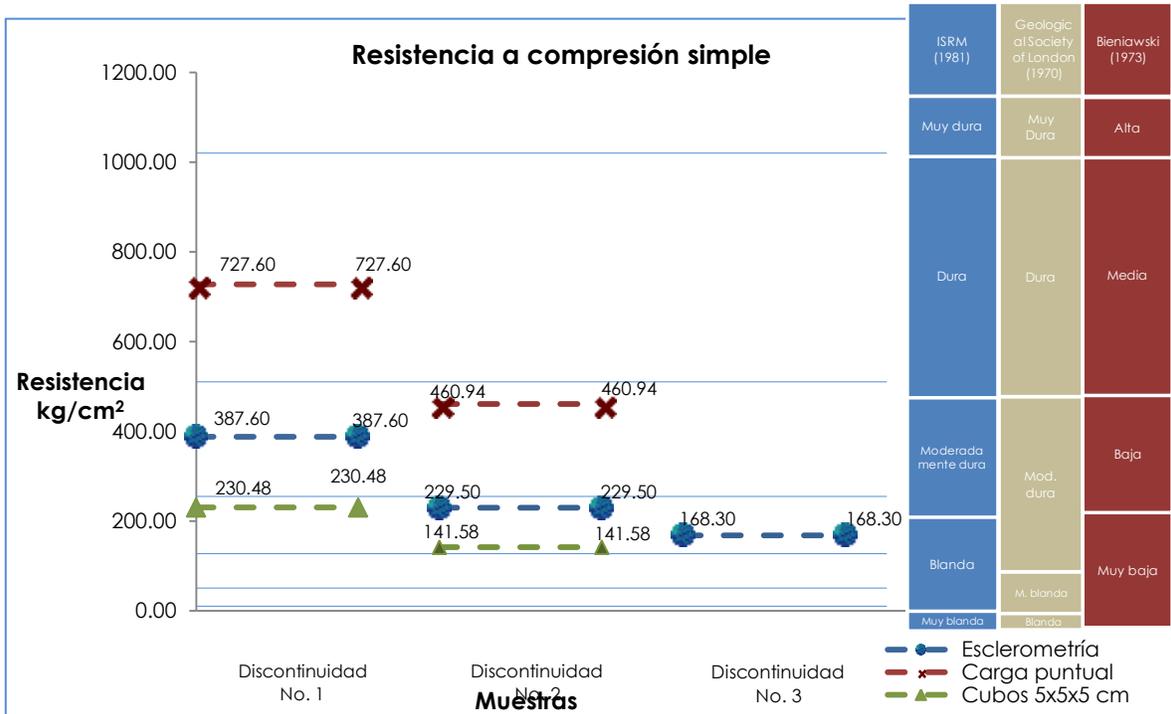


Figura No. 69.- Resistencias a compresión simple obtenidas de los ensayos de carga puntual, esclerometría y compresión simple de cubos de 5 x 5 x 5 cm de la zona de la zona de Tres Marías.



Se puede observar que el ensayo de carga puntual arroja valores superiores a los ensayos de esclerometría y compresión simple de cubos labrados de 5 x 5 x 5 cm, y a su vez el ensayo de esclerometría es mayor que el ensayo de compresión simple. Los ensayos de carga puntual y esclerometría son ensayos puntales a diferencia del de a compresión simple que abarca un área de carga mayor y se obtiene de forma más directa su resistencia ya que en este ensayo no se multiplica por ningún factor como en los dos antes mencionados. Esto no quiere decir que los ensayos de carga puntual y esclerometría no sean útiles, al contrario proporcionan de manera rápida y sencilla la resistencia de muchos especímenes sin labrar, pero se recomienda reducir o considerar un porcentaje de reducción en la resistencia para estar del lado de la seguridad.

## 4.2.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO.

### 4.2.4.1. La Paloma.

Se desarrollaron tres ensayos de corte directo para la zona de La Paloma. En la Figura No. 70 se muestra un gráfica esfuerzo – deformación donde se pueden apreciar los diferentes ciclos de carga. Principalmente se puede observar dónde opone más resistencia la rugosidad, esto se logra cuando la línea forma algo parecido a un escalón, en otras palabras se incrementa la carga constantemente pero los desplazamientos horizontales que se generan son muy pequeños casi tendiendo a una línea recta vertical o con una pendiente fuerte. Sin embargo al vencer la resistencia que opone la rugosidad de la discontinuidad, es cuando se generan desplazamientos. Seguimos aplicando carga hasta su falla, por lo que se pueden generar más escalones en la gráfica hasta llegar a su resistencia de pico ya que para obtener una resistencia residual es necesario una máquina de pruebas instrumentada.

#### Discontinuidad No. 1

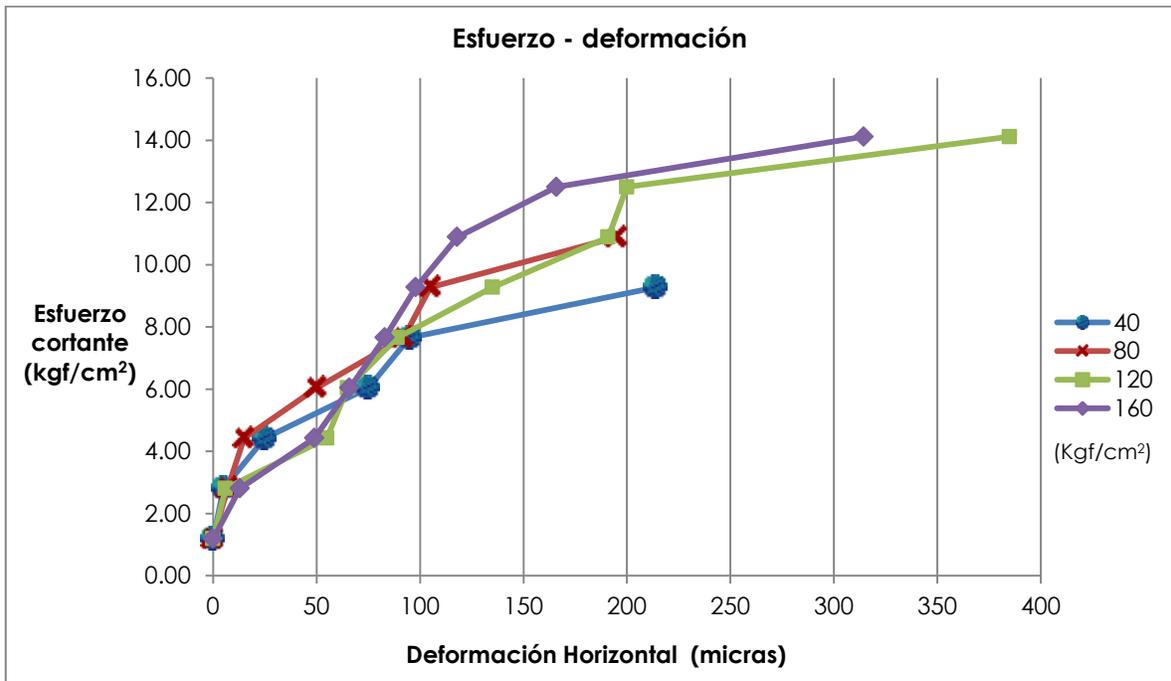


Figura No. 70.- Esfuerzos cortantes – desplazamientos tangenciales de la discontinuidad no 1 de La Paloma.

En la Figura No. 71 se presentan imágenes en 3D generadas en Auto CAD a partir de los perfiles de rugosidad obtenidos con el peine de Barton para determinar el JRC de las discontinuidades. El JRC que se obtuvo de esta discontinuidad fue obtenido en promedio de varios perfiles, resultando un JRC=16 de una escala de

20, por lo que se observa una discontinuidad con rugosidad considerable y por lo que se presenta dilatación en la gráfica esfuerzo – deformación.

En este ensayo no se generó la gráfica de deformación horizontal – deformación vertical, debido a que hubo un problema con la hoja de cálculo a la hora de guardar los datos.

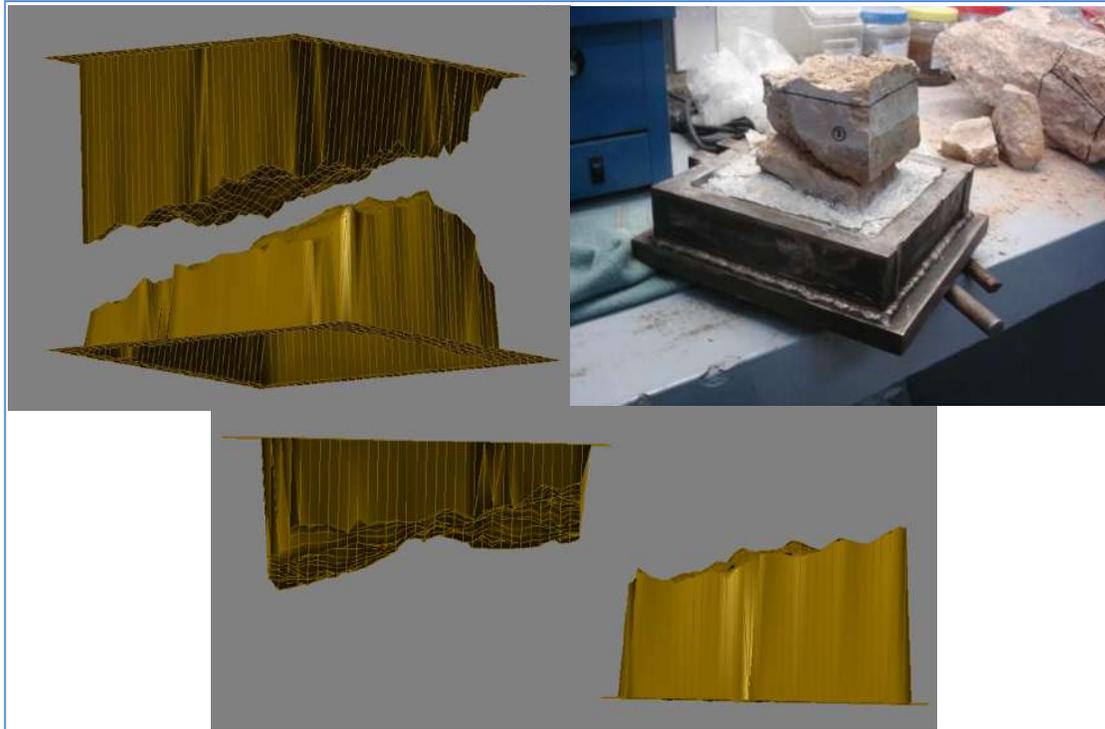


Figura No. 71.- Imágenes en 3D y fotografía de la discontinuidad no. 1 de la zona de La Paloma.

En la Figura No. 72 se presentan los esfuerzos normales aplicados y los esfuerzos tangenciales obtenidos del ensayo, con los que obtuvimos la envolvente de falla representada por la línea de color rojo. La línea azul punteada representa la envolvente de falla lineal que se ajusta a una envolvente lineal tipo Mohr – Coulomb a partir de esta determinamos su ángulo de fricción interno y la cohesión del material al intersectar a la eje de las abscisas.

Observamos que al final de la envolvente de falla se forma una recta horizontal debido a que el esfuerzo cortante que resiste la discontinuidad que se genera es igual a pesar de aumentar la carga normal. Se puede decir que se ha vencido la rugosidad "i" y que el esfuerzo que soporta es la fricción de una discontinuidad ya de cierta forma lisa por la presión que se ejerce.

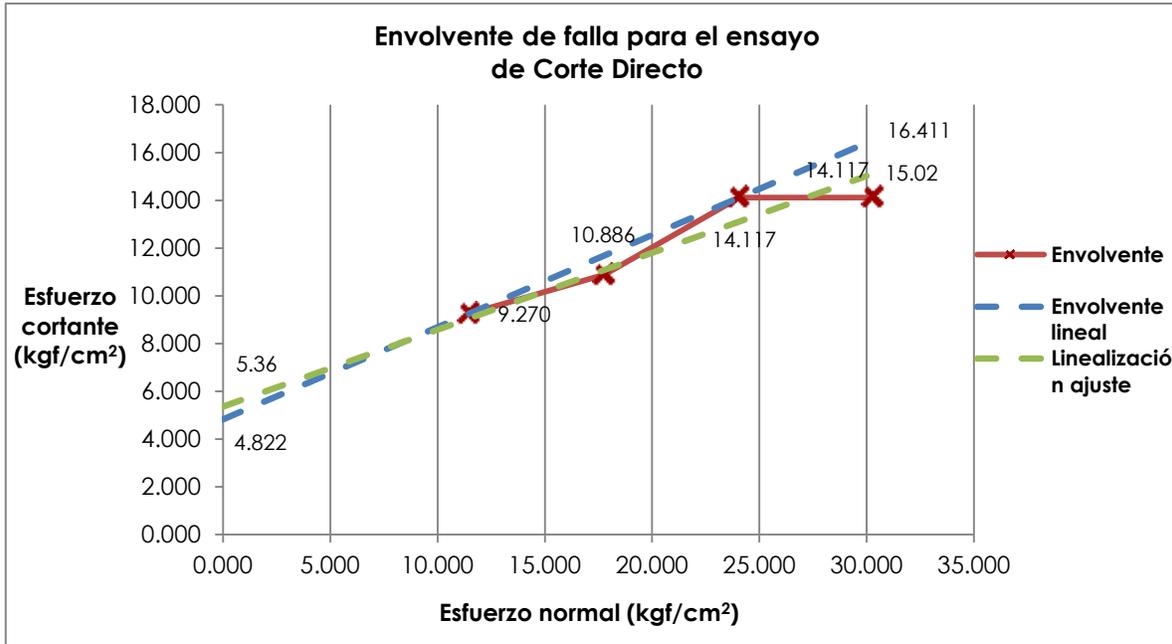


Figura No. 72.- Envoltura de falla a partir de los esfuerzos normales y tangenciales de la discontinuidad no. 1 de La Paloma.

Tabla No. 29.- Esfuerzos normal y cortante.

Esf. Normal	Esf. Corte
Kgf/cm <sup>2</sup>	
11.515	9.270
17.789	10.886
24.063	14.117
30.337	14.117

Envoltura lineal  
 $y = 0.386x + 4.822$   
 Ángulo = 21.12°  
 Cohesión = 4.822

En la Figura No. 73 se observa a) la discontinuidad natural, b) en el proceso de labrado y c) colada en la caja de corte directo, lista para el ensayo.



Figura No. 73.- Discontinuidad no. 1. antes de ser ensayada.

Al terminar el ensayo de corte directo la cara inferior de la discontinuidad fue la más afectada ya que se venció en su totalidad la rugosidad por lo que no se procedió a intentar aplicar más carga normal debido a que ya no había una superficie de prueba.

## Discontinuidad No. 2.

En la Figura No. 74 se observa la gráfica de esfuerzo - deformación obtenida del ensayo de corte. En la cual hay mayor resistencia de la rugosidad al ser desplazada horizontalmente, casi al momento de aplicar la carga tangencial y principalmente al aumentar la carga normal durante los 6 ciclos. Sin embargo cabe mencionar que los esfuerzos cortantes generados son menores con respecto de la discontinuidad anterior (No. 1), que son 8, 10 y 12 kgf/cm<sup>2</sup> aproximadamente y en este caso es de 8 kgf/cm<sup>2</sup>, como se puede ver en la Figura No. 74. De lo anterior podría decirse que la rugosidad y el JRC sería menor para este caso. Sin embargo se obtuvo como promedio de JRC el valor de 16 y este valor es igual al de la discontinuidad no. 1. Pero, observando la imagen generada en 3D de la Figura No. 76, a partir de los perfiles obtenidos con el peine de Barton, se observa que opone resistencia al inicio de la prueba y como es más horizontal el plano de la discontinuidad no. 2 con respecto a la no.1 genera menores esfuerzos tangenciales.

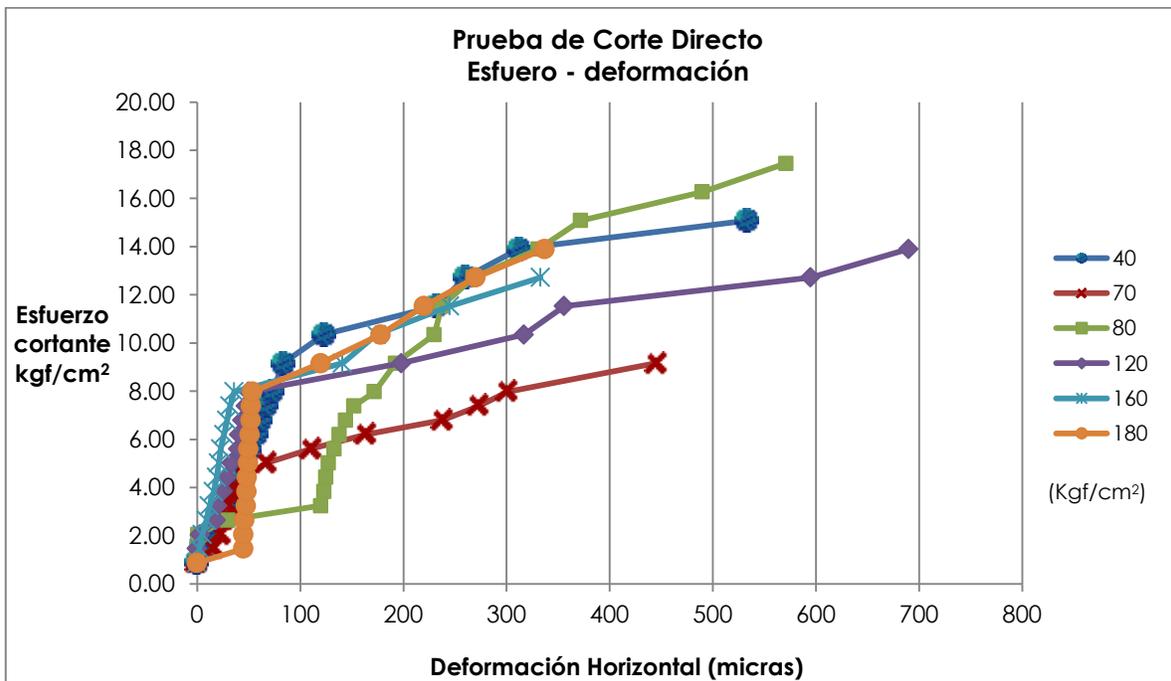


Figura No. 74.- Gráfica esfuerzo – deformación de la discontinuidad no.2 de la zona de La Paloma.

Al observar la Figura No. 74 y Figura No. 75, se generan mayores deformaciones verticales al aumentar la carga normal, se aprecian algunos saltos debido a la rugosidad que se oponía a que la muestra se desplazará en ciertos puntos del plano. En este caso se observa una dilatancia ligera en la línea de 40 kgf/cm<sup>2</sup> y una muy pronunciada en la línea de 70 kgf/cm<sup>2</sup>, esto es al ir decreciendo en la gráfica y en un punto vuelve a subir, es ahí donde se presenta la dilatancia.

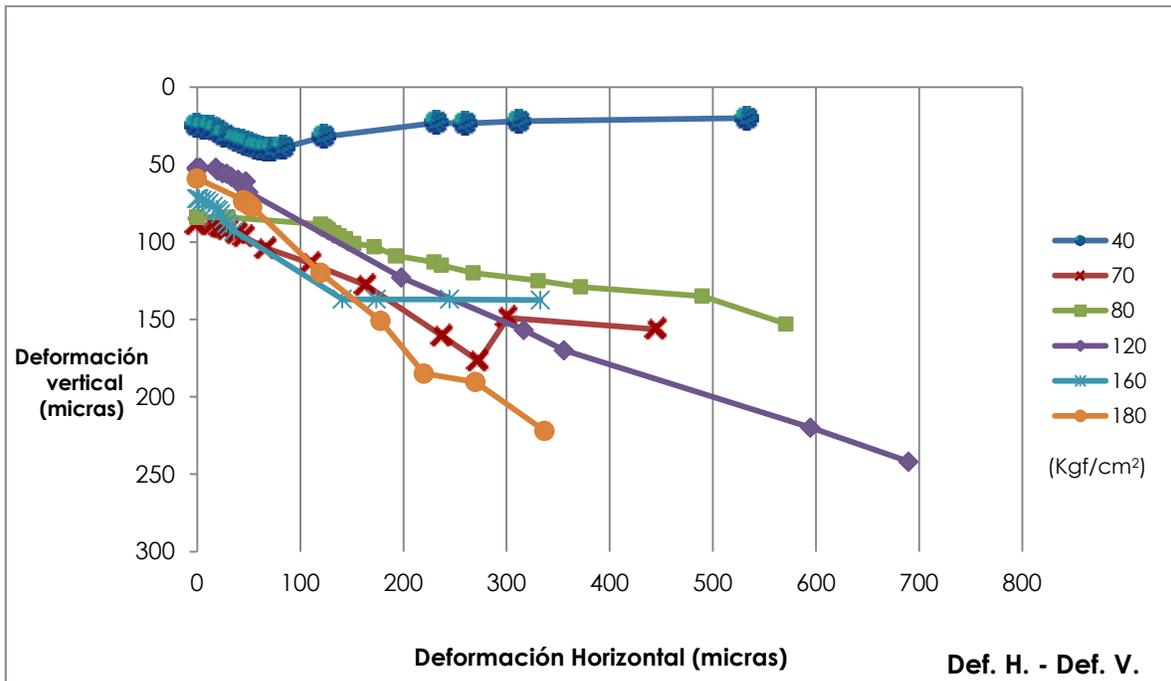


Figura No. 75.- Gráfica de deformaciones horizontales – deformaciones verticales obtenidas del ensayo de La Paloma.

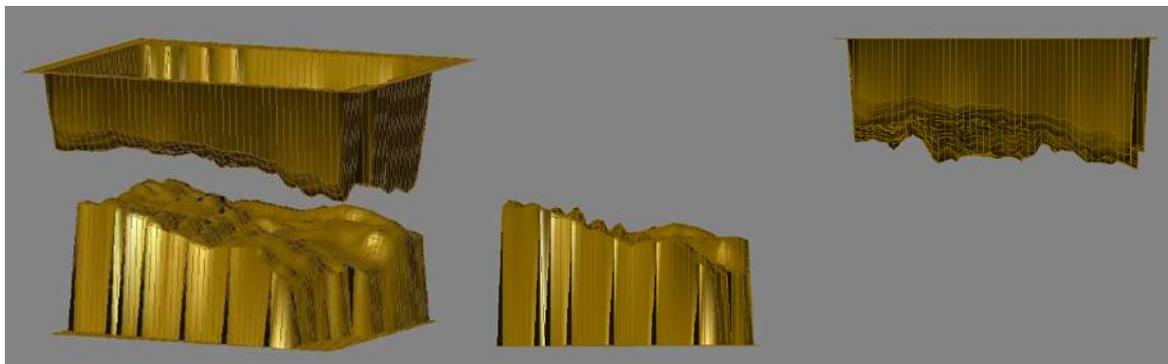


Figura No. 76.- Superficies en 3D a partir de los perfiles para determinar el JRC.

En la Figura No. 77 se presenta la envolvente de falla generada de los esfuerzos tangencial y normal con una línea roja, el comportamiento en el segundo ciclo de carga normal tuvo un pico de descenso ya que se generó un suelo por la fricción que hubo entre las caras de la discontinuidad. Nos percatamos de esto



ya que al observar que al aplicar más carga normal para realizar el tercer ciclo de carga la presión del manómetro no aumentaba, por lo que retiramos la muestra de la máquina y apreciamos que se había generado una pequeña capa que se estaba consolidando con la carga normal que estábamos aplicando. Para estudiar una discontinuidad con relleno se requiere estudiar el relleno y caracterizarlo con bastante precisión. En este caso no se desarrolló porque no contábamos con el material suficiente, por lo tanto se retiró con un cepillo y se procedió a continuar el ensayo. Dentro de esta envolvente se aprecia que se volvió a generar suelo aun después de que se logró alcanzar la carga normal requerida y más aun fue durante el ensayo. Por lo que la envolvente de falla serán los puntos máximos que se obtuvieron del ensayo y quedará indicada con la línea azul punteada.

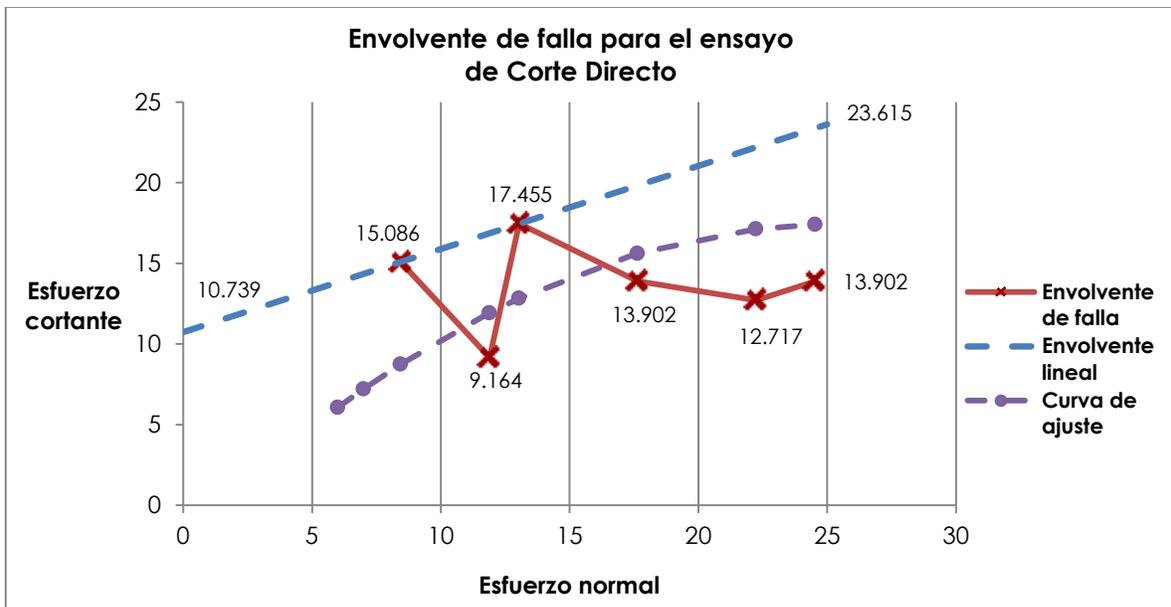


Figura No. 77.- Envoltente de falla obtenida del ensayo de la discontinuidad no. 2 de la zona de La Paloma.

Tabla No. 30.- Esfuerzos normal y cortante.

Esf. Normal Kgf/cm <sup>2</sup>	Esf. Corte Kgf/cm <sup>2</sup>
8.441	15.086
11.890	9.164
13.040	17.455
17.639	13.902
22.238	12.717
24.538	13.902

Envoltente lineal  
 $y = 0.515x + 10.739$   
 Ángulo = 27.25°  
 Cohesión = 10.739

Envoltente curva  
 $y = -0.304x^2 + 1.539x - 2.077$

En la Figura No. 78 se observa a) la muestra de la discontinuidad, b) una vez labrada y c) y d) después del ensayo, se observa en esta última que la parte

inferior es la más afectada y que la rugosidad del plano ha sido afectada considerablemente.

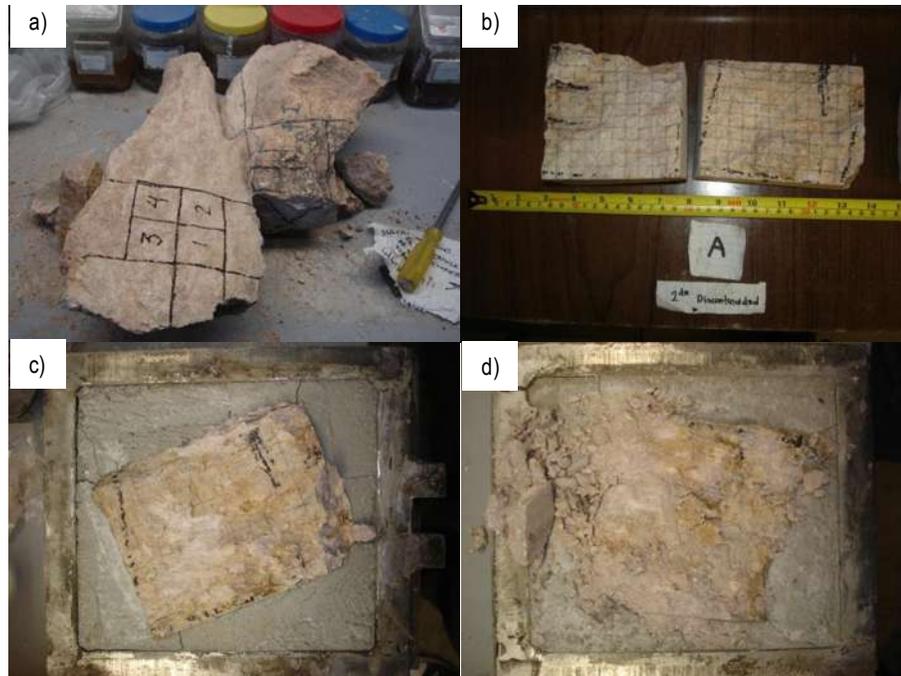


Figura No. 78.- Discontinuidad no. 2 antes y después del ensayo.

### Discontinuidad No. 3.

En la Figura No. 79 se observa la gráfica esfuerzo – deformación, que no presentan escalones debido a que la resistencia de la rugosidad es menor que en las dos discontinuidades presentadas anteriormente. En la Figura No. 80, se observan superficies generadas en 3D, a simple vista la rugosidad de los planos son pequeñas en comparación de las discontinuidades anteriores, en este caso se obtuvo un  $JRC = 9$  con el peine de Barton.

En la Figura No. 79 se presentan las deformaciones horizontales y verticales y se observa que no se generan deformaciones verticales significativas, pero se aprecia una ligera dilatación en los ciclos de 80 y 120  $\text{kgf/cm}^2$ . En el último ciclo de carga, se aprecia una diferencia en la deformación vertical con respecto de las anteriores bastante significativa. En la Figura No. 82c, se observa cómo se desprendió una parte de la cara superior de la discontinuidad y quedó incrustada en la cara inferior debido a la fuerza normal que se aplicó y a la fuerza tangencial que se generó, que al mismo tiempo provocó una deformación vertical mayor.

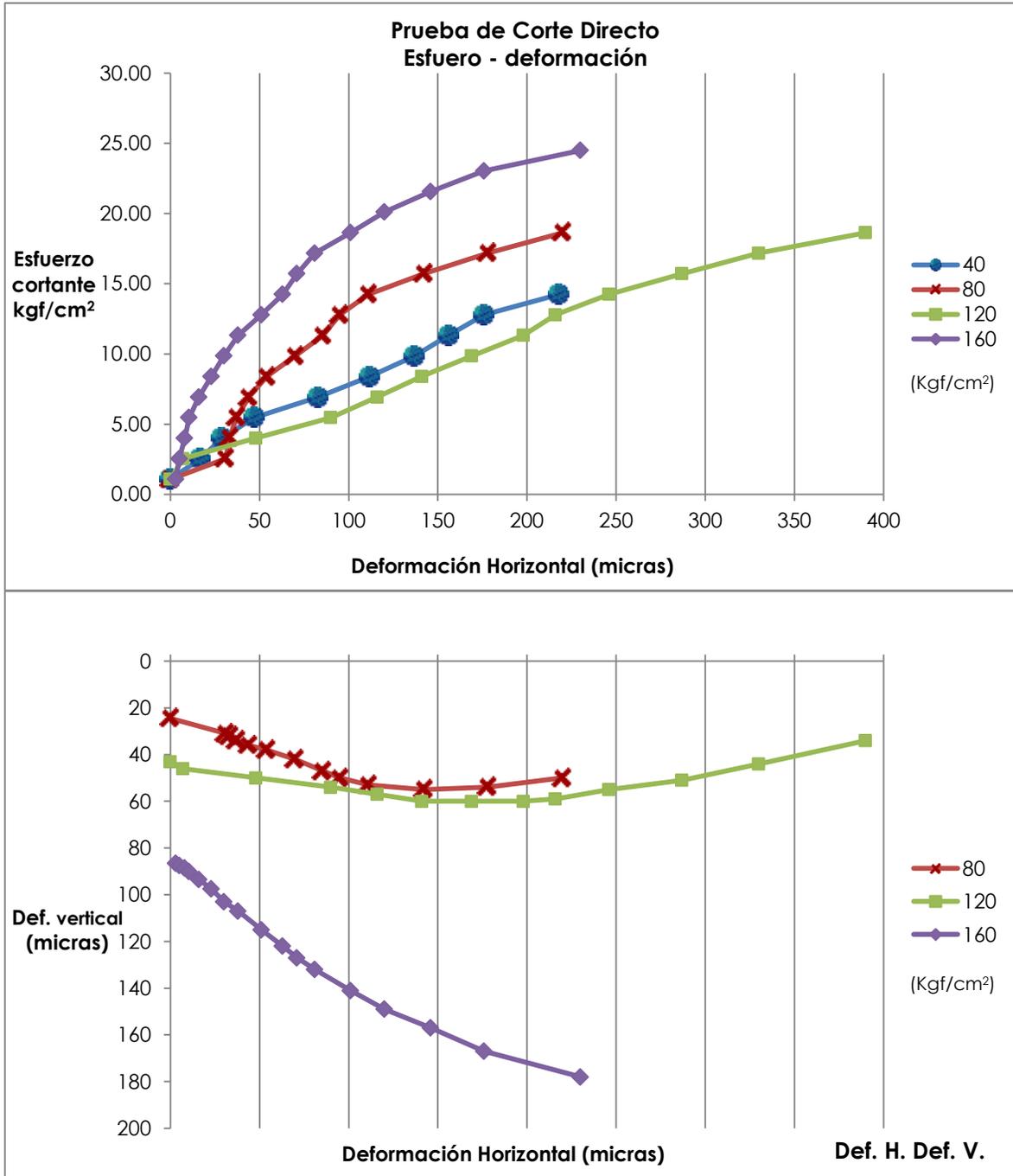


Figura No. 79.- Gráfica de esfuerzo - deformación y gráfica deformación horizontal- deformación vertical de la discontinuidad no. perteneciente a la zona de La Paloma.

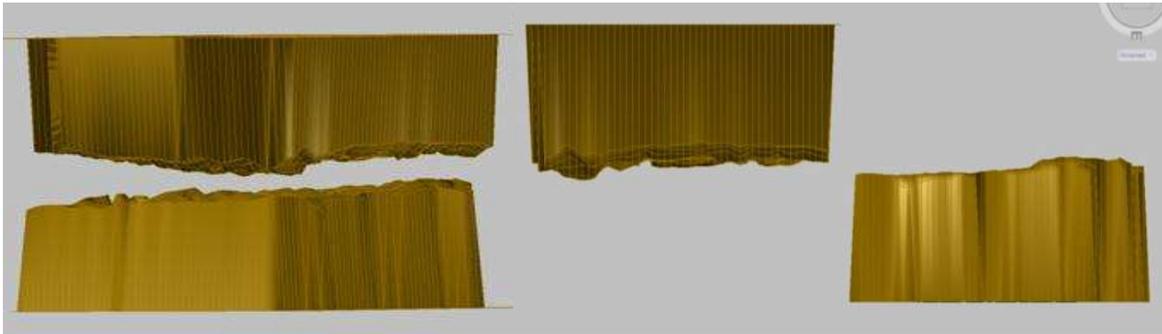


Figura No. 80.- Superficies en 3D a partir de perfiles para determinar el JRC.

La envolvente de falla que aparece en la Figura No. 81 es más uniforme, por lo que la envolvente lineal de color azul se ajusta más a la envolvente generada a partir de los esfuerzos obtenidos del ensayo, para este caso.

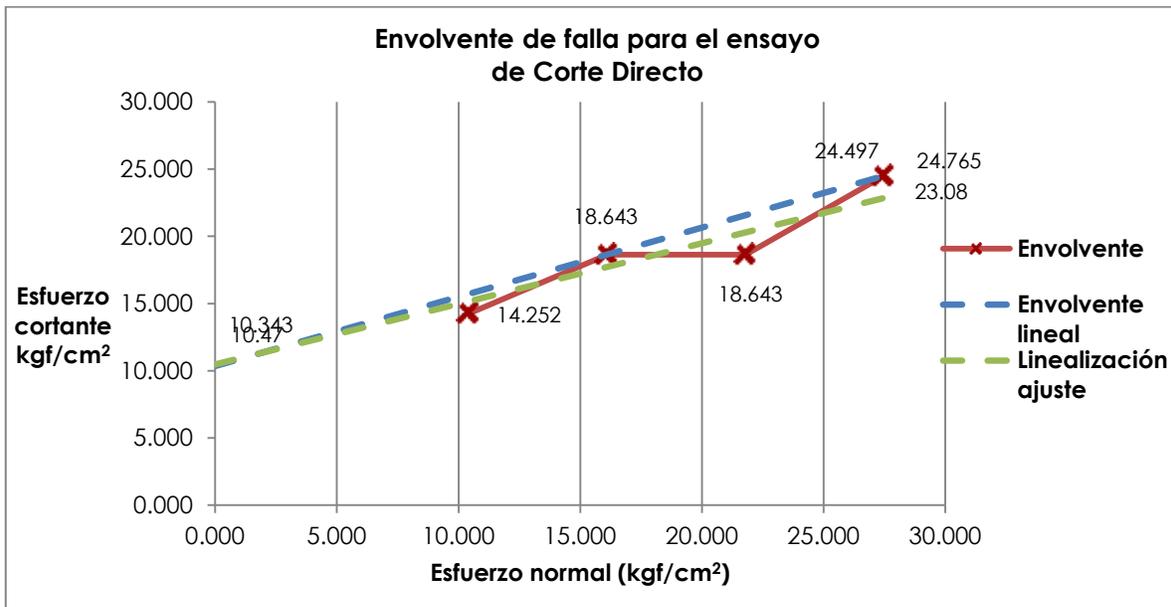


Figura No. 81.- Envolvente de falla obtenida del ensayo de corte directo de la discontinuidad no. 3 de la zona de La Paloma.

Tabla No. 31.- Esfuerzos normal y cortante.

Esf. Normal Kgf/cm <sup>2</sup>	Esf. Corte Kgf/cm <sup>2</sup>
10.431	14.252
16.114	18.643
21.798	18.643
27.481	24.497

Envolvente lineal  
 $y = 0.515x + 10.343$   
 Ángulo = 27.25°  
 Cohesión = 10.343

En la Figura No. 82 se observa lo siguiente:

- La discontinuidad natural.
- Se delimitan los cortes.
- Se aprecia que después del ensayo se desprendió una parte de la cara superior y quedó incrustada en la cara inferior.
- y e) Se desmonta la muestra de la caja de corte directo con cuidado, siendo la del lado derecho la cara inferior, la cual se fractura más en el ensayo, como se ha visto anteriormente.

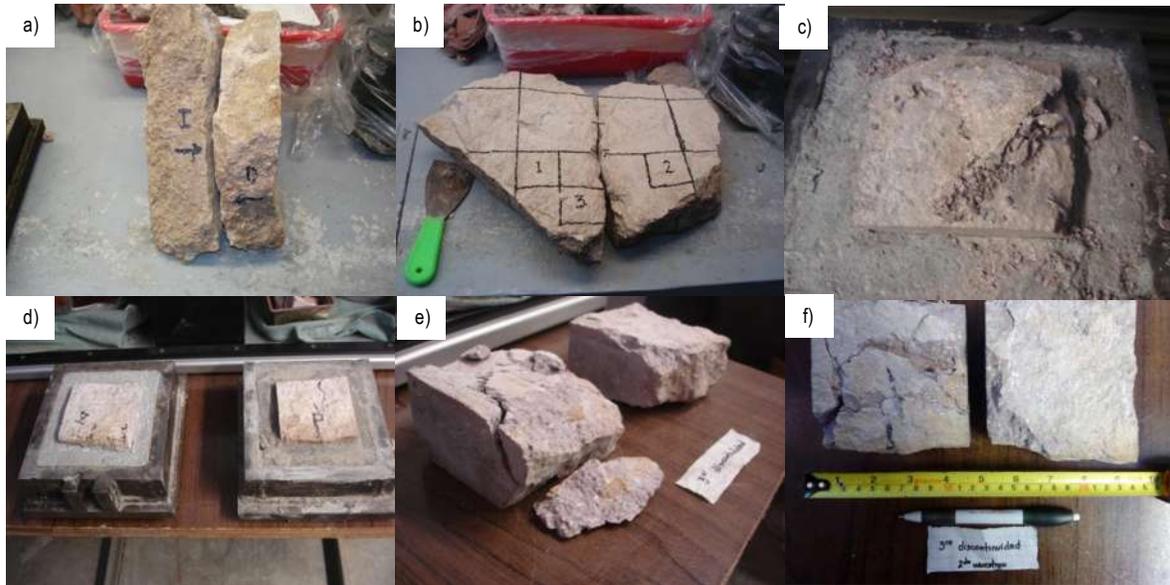


Figura No. 82.- Etapas de la discontinuidad antes y después de ser ensayada.

#### 4.2.4.2. Tres Marías.

##### Discontinuidad No. 1

En la Figura No. 83 se presentan las gráficas esfuerzo – deformación y deformación horizontal – deformación vertical, se observa que se presentan incrementos abruptos de resistencias en los diferentes ciclos de carga normal. Además, se observa en ésta figura que se generan esfuerzos tangenciales con pocos desplazamientos horizontales debido a la alta resistencia de la rugosidad que hay en la discontinuidad. Aunque, el JRC que se obtuvo es el más pequeño de las seis discontinuidades, teniendo un valor  $JRC=5$ . En la Figura No. 84 se muestran las superficies generadas en 3D, pero debe considerarse que a pesar de presentar un JRC pequeño, la resistencia a compresión simple de la roca es mayor de las tres discontinuidades que se describen en este apartado, presentando un valor de aproximadamente  $400 \text{ kgf/cm}^2$ , por lo que las rugosidades presentes son lo



suficientemente resistentes para generar esfuerzos cortantes que evitan el desplazamiento durante el ensayo. Por otro lado también se puede apreciar que se generaron desplazamientos verticales bajos pero con cargas normales bajas. A partir del cuarto ciclo con una presión de 160kgf/cm<sup>2</sup>, se generan tanto mayores esfuerzos tangenciales como desplazamientos verticales y una curva esfuerzo-deformación mejor definida y una curva deformación horizontal-deformación vertical también más definida.

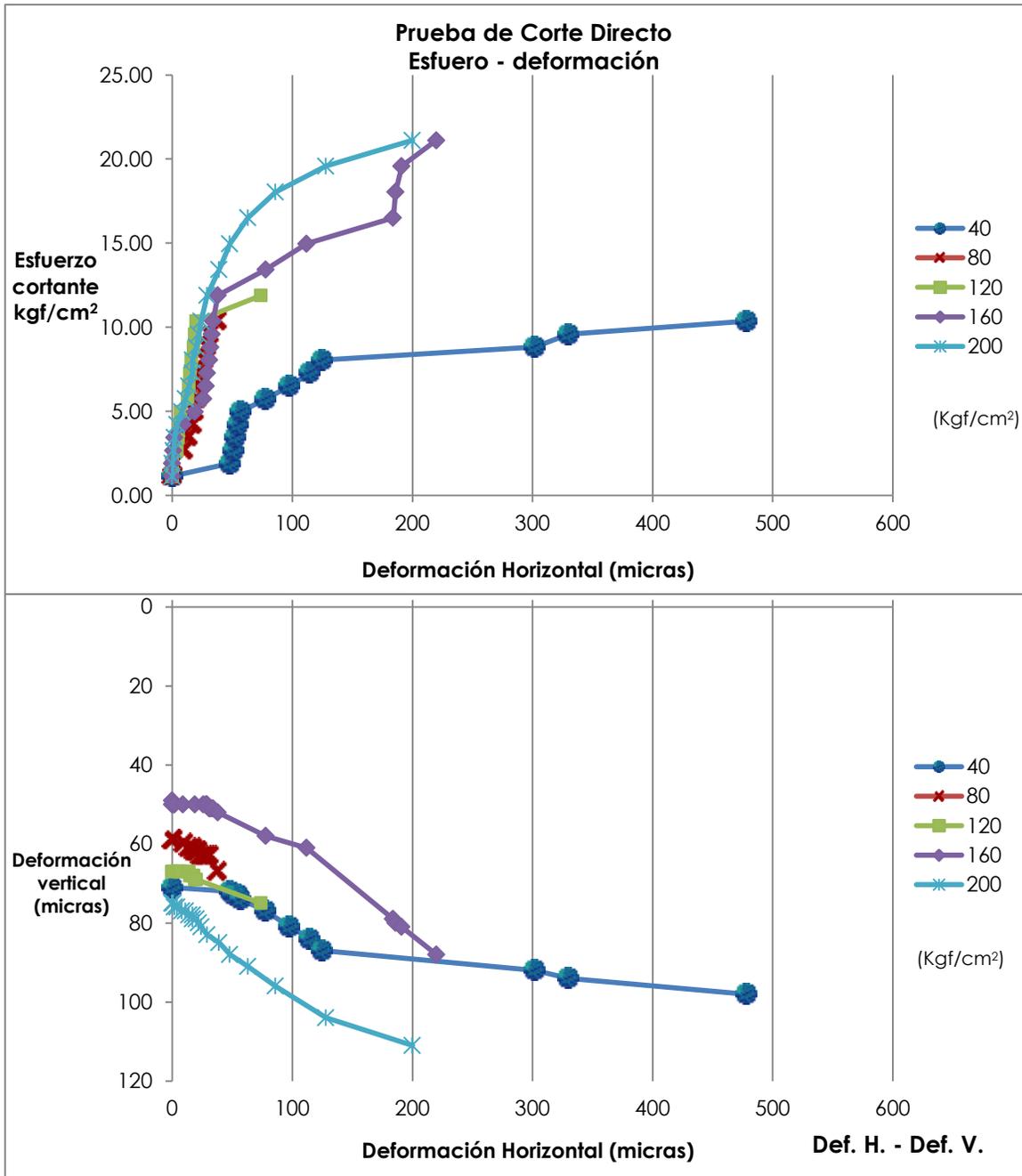


Figura No. 83.- Gráfica de esfuerzo – deformación y gráfica de desplazamiento horizontal – desplazamiento vertical.

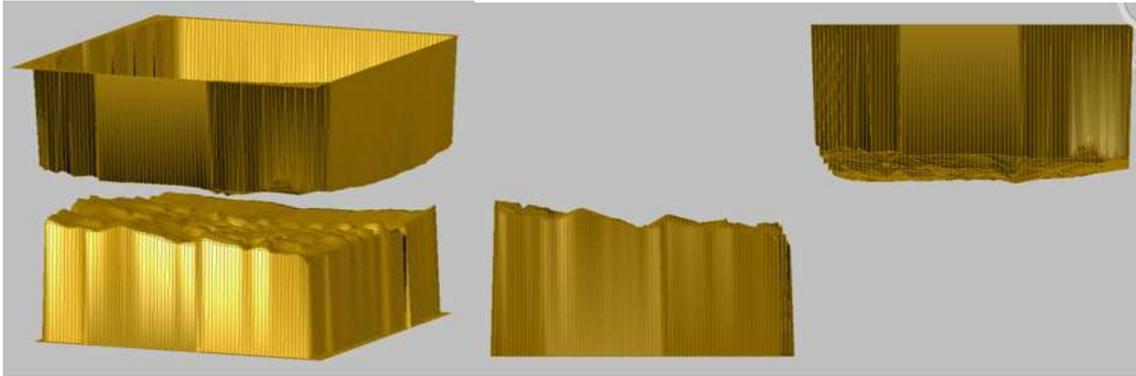


Figura No. 84.- Superficie en 3D generadas a partir de perfiles para determinar el valor de JRC.

La envolvente de falla en la Figura No. 85 es suave durante tres ciclos de carga debido a que la rugosidad es muy baja y por lo tanto los esfuerzos tangenciales generados son menores. Sin embargo, si aplicamos una carga normal mayor el esfuerzo tangencial aumenta y la rugosidad que presenta el plano de la discontinuidad empieza a ser afectada por la fuerza normal y a su vez por la fuerza tangencia. Por lo tanto, obtenemos una envolvente de falla más representativa con esfuerzos mayores generados, hasta obtener el pico donde la muestra ha llegado al límite.

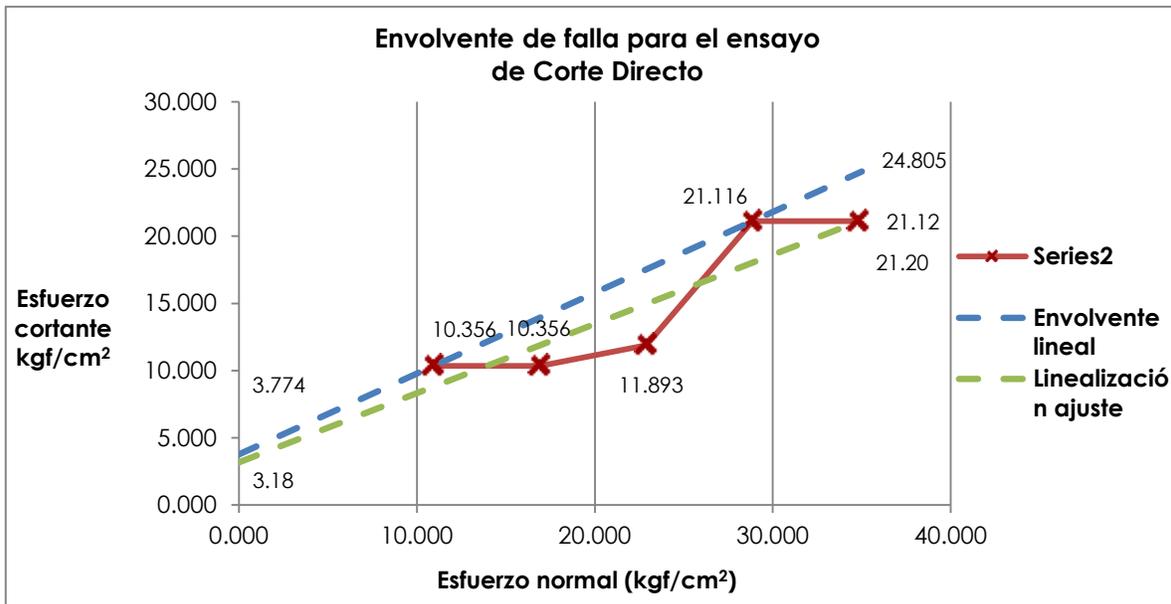


Figura No. 85.- Envolvente de falla obtenida del ensayo de corte directo para la discontinuidad no. 1 de la zona de Tres Marias.

Tabla No. 32.- Esfuerzos normal y cortante.

Esf. Normal Kgf/cm <sup>2</sup>	Esf. Corte Kgf/cm <sup>2</sup>
10.955	10.356
16.924	10.356
22.892	11.893
28.861	21.116
34.830	21.12

Envolvente lineal

$$y = 0.601x + 3.774$$

$$\text{Ángulo} = 31.00^\circ$$

$$\text{Cohesión} = 3.774$$

En la Figura No. 86 se describe la discontinuidad de acuerdo a lo siguiente:

- Discontinuidad antes de labrar.
- Discontinuidad una vez labrada.
- Discontinuidad colada en la caja de corte directo.
- Se observa en esta imagen que la roca es bastante dura ya que la parte inferior no resultó tan dañada como en las discontinuidades de La Paloma.

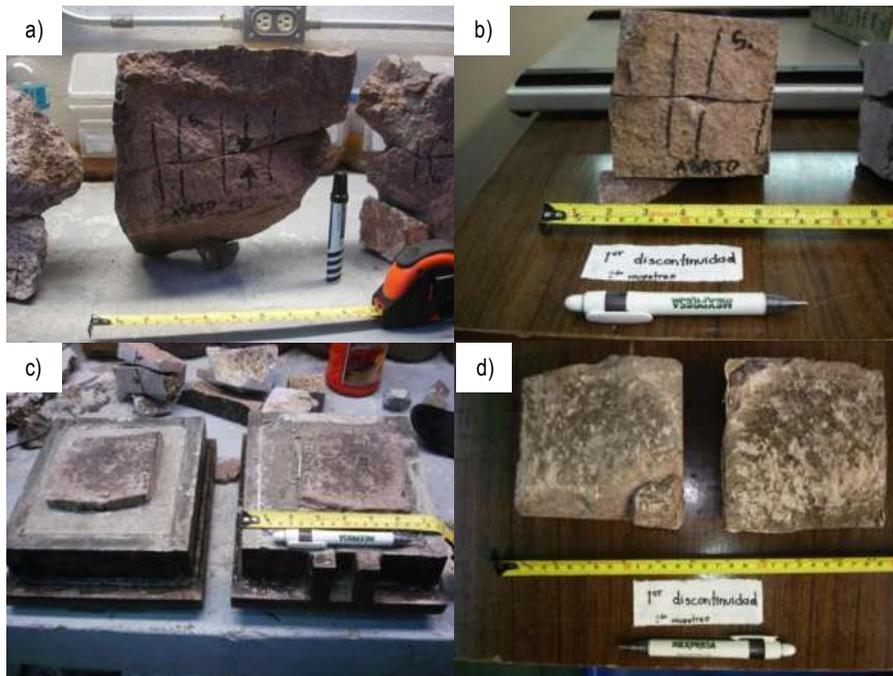


Figura No. 86.- Discontinuidad no. 1 antes y después del ensayo de corte directo.



## Discontinuidad No. 2.

En esta discontinuidad se encontraba un relleno arcilloso pero al sustraerla de campo se perdió este relleno. Sin embargo, se realizó el ensayo en la discontinuidad generada por la intemperie, hay que mencionar que la abertura es un poco más pronunciada debido al relleno que ocupaba el espacio entre la discontinuidad como se aprecia en la Figura No. 89, por lo que debe tomarse en cuenta en su comportamiento.

En la Figura No. 87 se presenta la gráfica esfuerzo – deformación del ensayo, donde podemos apreciar curvas bastante uniformes y que los esfuerzos cortantes generados presentan pocos desplazamientos, esto debido a la rugosidad de la discontinuidad. La Figura No. 89 se presentan perfiles en 3D, obteniendo un JRC=14 con el peine de Barton, que se considera este valor para una rugosidad pronunciada. Sin embargo cabe notar que las gráficas generadas presentan un comportamiento muy uniforme, debido a que las rugosidades no embonan como en las discontinuidades anteriores por el relleno que había presente. Lo que sucede es que, los planos se deslizan uno sobre otro sin romper la rugosidad sino desgastando la rugosidad.

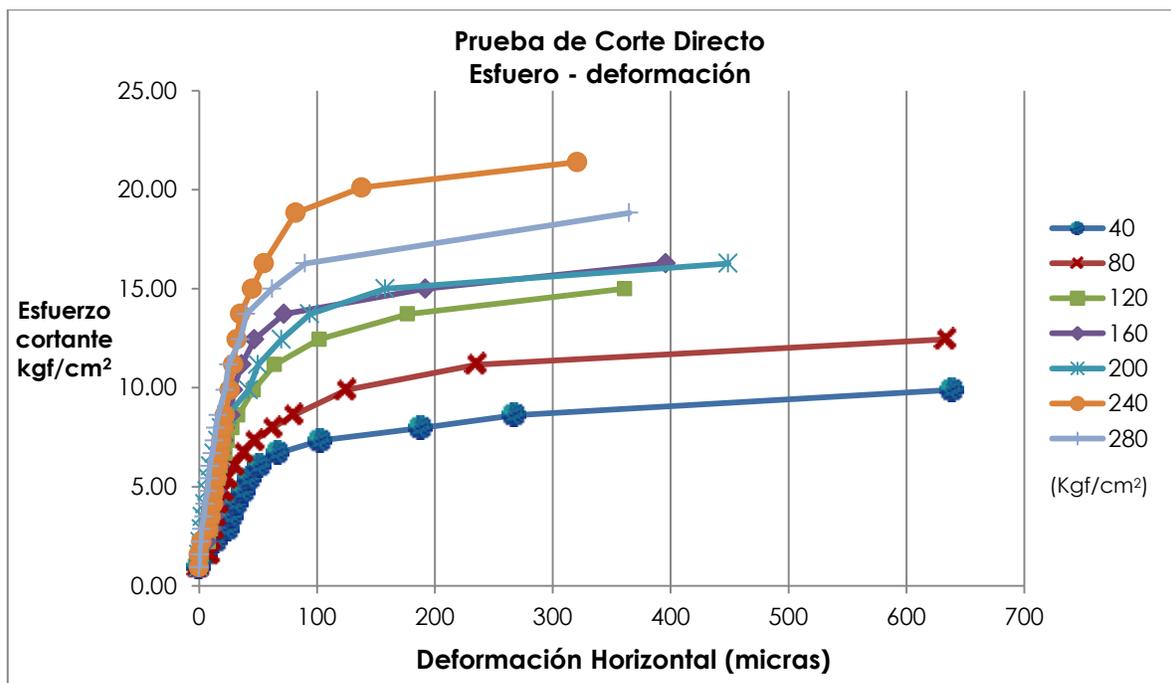


Figura No. 87.- Gráfica esfuerzo – deformación de la discontinuidad no. 2 de la zona de Tres Marías.

Se observa en la Figura No. 88 que, entre más se aumenta la carga normal las deformaciones verticales en cada ciclo son mayores, con excepción de la carga normal de 200kgf/cm<sup>2</sup> que es mucho mayor la deformación vertical que la correspondiente a las cargas normales de 240 y 280 kgf/cm<sup>2</sup>. En las últimas dos la discontinuidad está más estabilizada ya que se logra ver un salto en la gráfica durante la carga de 160kgf/cm<sup>2</sup> pudiendo ser por la rugosidad que se venció y después en la de 200 kgf/cm<sup>2</sup> se produce una deformación vertical mayor debido al acomodo del material.

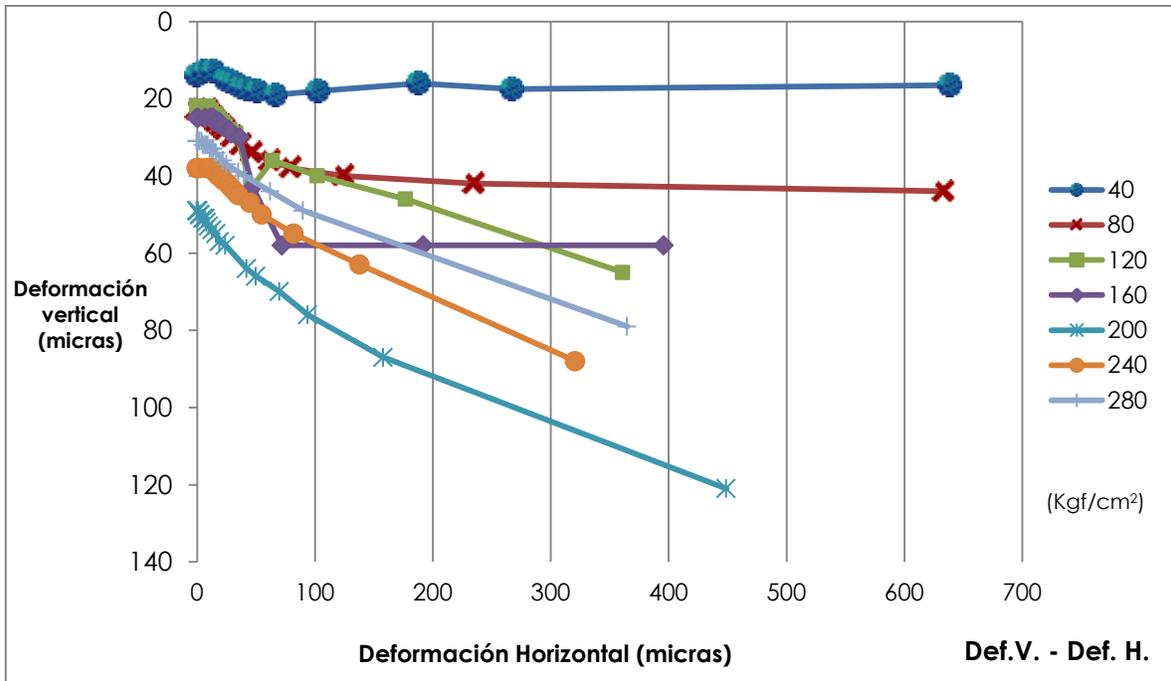
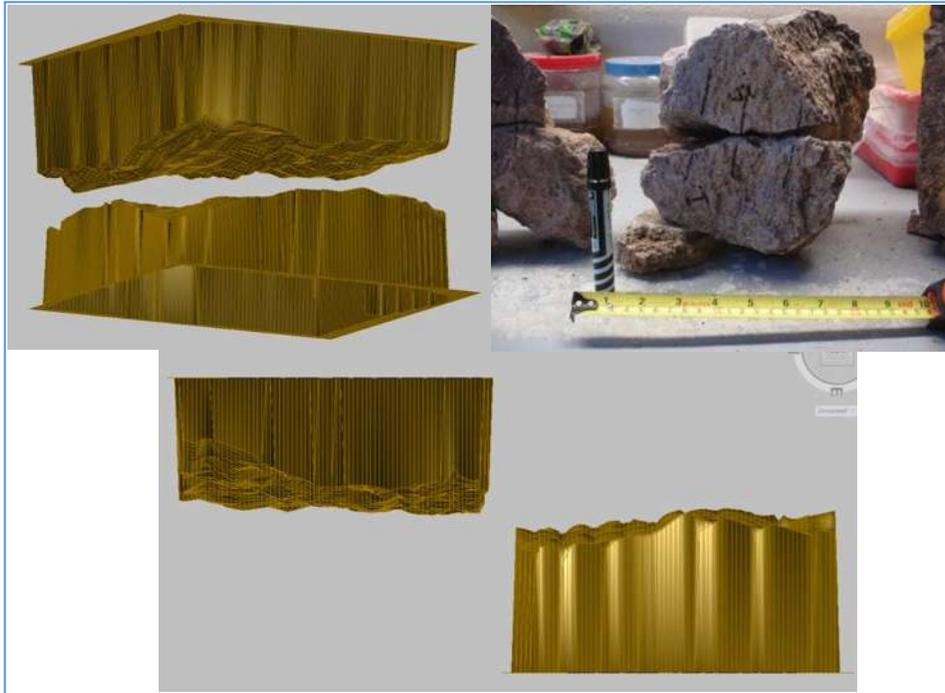


Figura No. 88.- Gráfica donde se presentan las deformaciones horizontales y verticales obtenidas del ensayo de corte directo de la zona de Tres Marías.

En la Figura No. 89 se presentan los perfiles en 3D obtenidos con el peine de Barton para determinar la rugosidad de la discontinuidad y dar un valor JRC correspondiente.



*Figura No. 89.- Superficies en 3D y discontinuidad natural.*

En la Figura No. 90 se presenta la envolvente de falla a partir de los esfuerzos generados durante el ensayo pudiendo observar que en el quinto ciclo se generaron esfuerzos tangenciales menores y en el sexto ciclo vuelve a incrementar el esfuerzo tangencial siguiendo la misma línea de tendencia de ajuste de tipo Mohr – Coulomb. En el quinto ciclo corresponde a la mayor deformación vertical de acuerdo a la Figura No. 88, donde el material estaba reacomodándose, por lo que la rugosidad en ese ciclo generaba esfuerzos tangenciales menores, hasta el siguiente ciclo de carga normal donde ya es más estable la discontinuidad generando esfuerzos mayores y ajustándose a la envolvente de falla lineal.

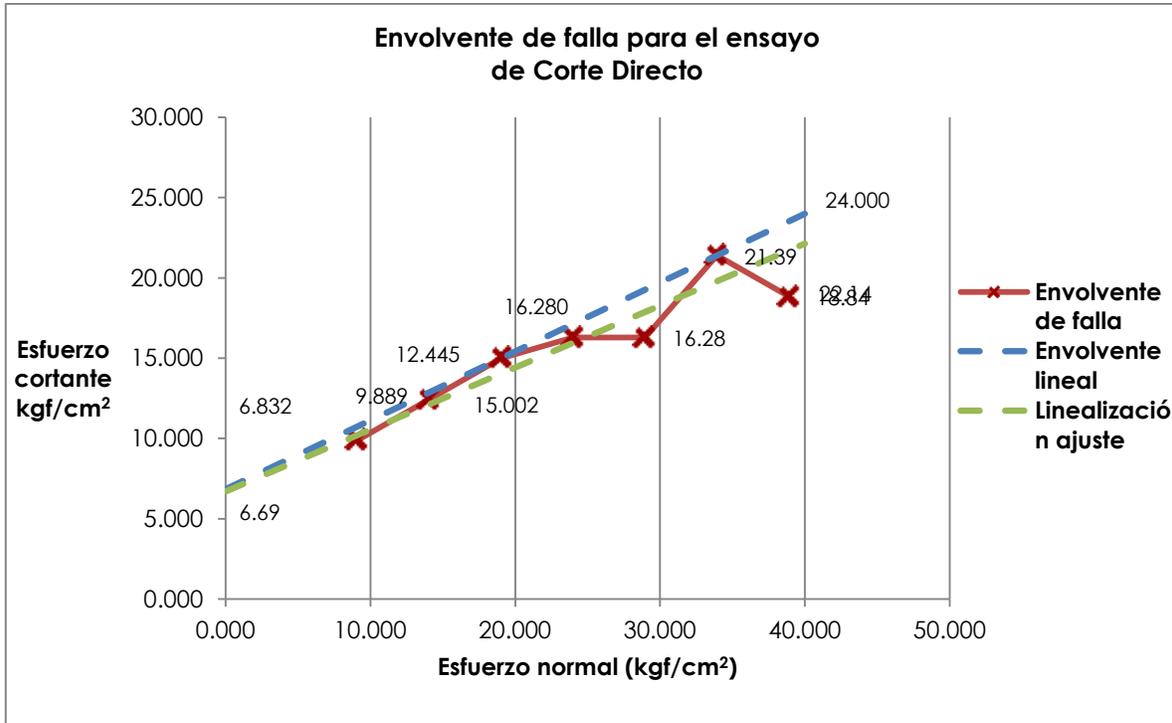


Figura No. 90.- Envolverte de falla generada a partir del ensayo de corte directo para la discontinuidad no. de la zona de Tres Marias.

Tabla No. 33.- Esfuerzos normal y cortante.

Esf. Normal Kgf/cm <sup>2</sup>	Esf. Corte Kgf/cm <sup>2</sup>
9.109	9.889
14.072	12.445
19.035	15.002
23.998	16.280
28.961	16.28
33.924	21.39
38.887	18.84

Envolverte lineal  
 $y = 0.429x + 6.832$   
 Ángulo = 23.23°  
 Cohesión = 6.832

La Figura No. 91 presenta la discontinuidad y se describe a continuación de la siguiente forma:

- a) Discontinuidad natural.
- b) Discontinuidad labrada de 10x10 cm aproximadamente.
- c) Discontinuidad una vez labrada, se nota sobre la superficie una coloración oscura.
- d) Discontinuidad después de ser ensayada, la coloración se perdió debido a la fricción que se generó, también se aprecia que no hay mucho daño con

respecto a las discontinuidades de La Paloma y que hay un desgaste en la superficie ensayada.



Figura No. 91.- Discontinuidad no. 2 antes y después del ensayo de corte directo.

### Discontinuidad No. 3.

Esta discontinuidad no presentaba abertura por lo que en la Figura No. 92 los esfuerzos cortantes y desplazamientos tangenciales y a su vez las deformaciones verticales crecen con forme aumenta la carga. A pesar de vencer la rugosidad de la discontinuidad y al oponer resistencia que se genera al inicio de aplicar la carga tangencial, los esfuerzos tangenciales no son tan altos debido a la resistencia del material por lo que el grado de rugosidad interviene más en la resistencia, como se puede apreciar en la Figura No. 93. En dicha imagen, se observa la rugosidad en imágenes 3D, obtenida a partir de determinar el JRC con el peine de Barton y que presenta un valor de 13 en una escala de 20, considerando esto como una discontinuidad con rugosidad significativa. A pesar de no ser un material muy resistente, con respecto de las dos discontinuidades de esta zona, ya que presenta una resistencia a compresión simple de aproximadamente  $160 \text{ kgf/cm}^2$ , la rugosidad que actúa es la que se opone a generar desplazamientos tangenciales, por lo que, los desplazamientos que se generan son pequeños, hasta que es vencida la rugosidad.

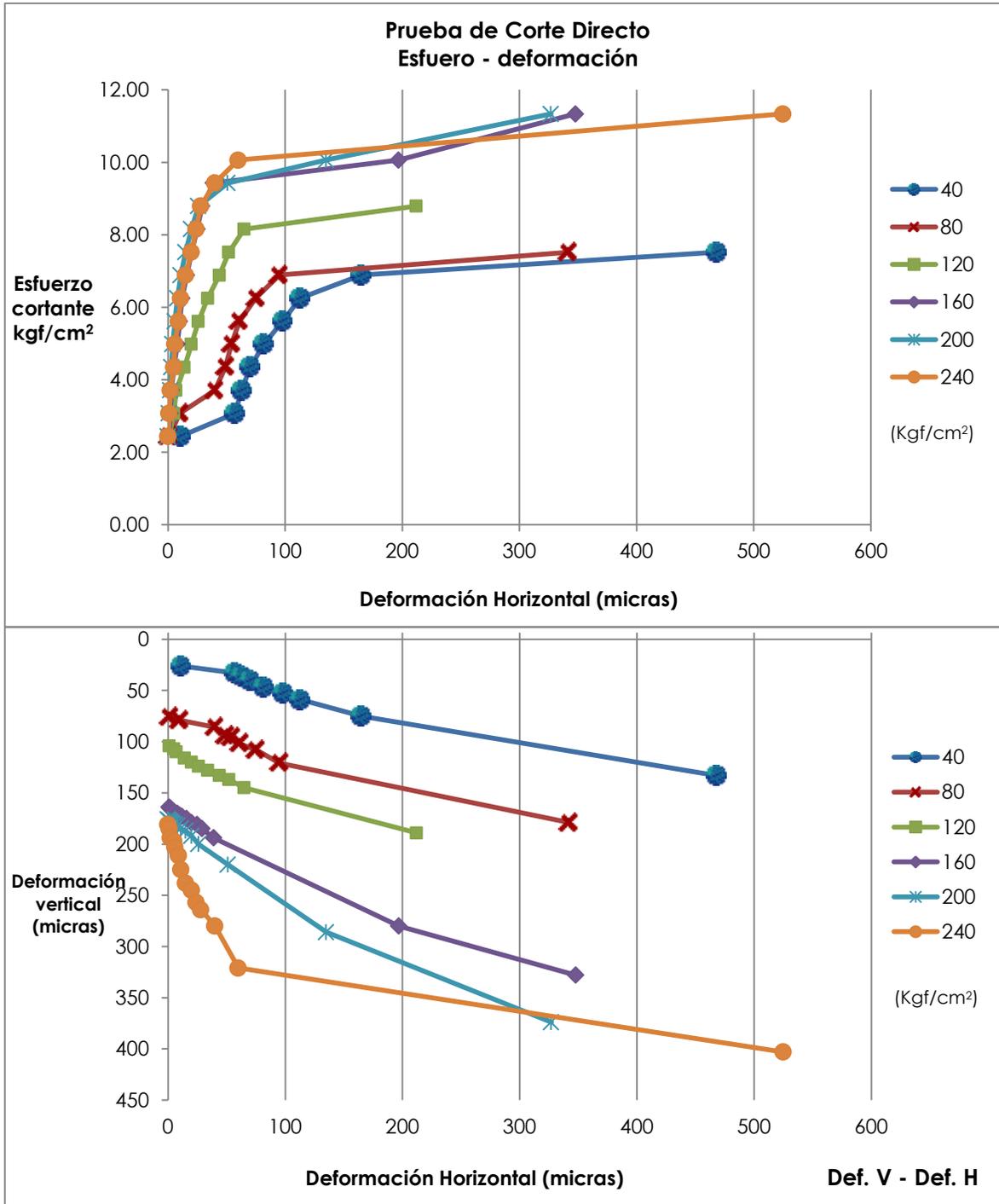


Figura No. 92.- Gráfica esfuerzo – deformación y gráfica de desplazamiento horizontales – desplazamiento verticales de la zona de Tres Marías.

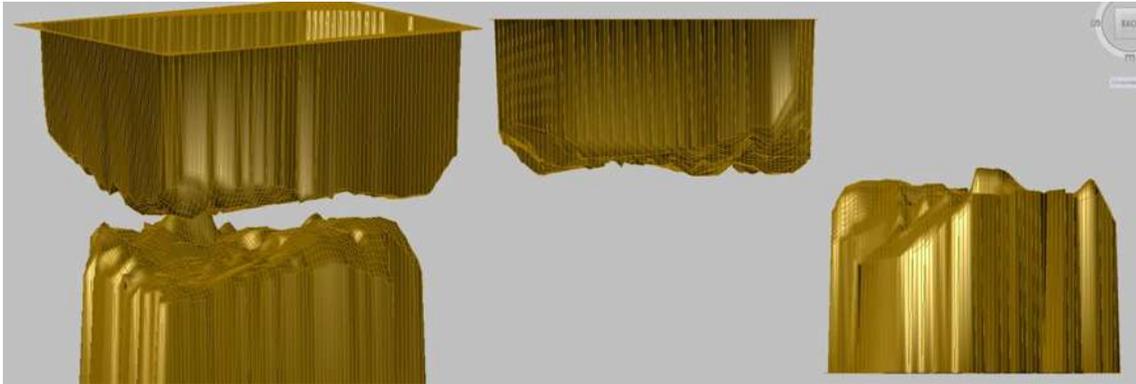


Figura No. 93.- Superficie en 3D de la discontinuidad no. 3.

En la Figura No. 94 se observa la envolvente de falla obtenida del ensayo, y se aprecia que el esfuerzo cortante tiene un pico en el cuarto ciclo de carga. En los normales esfuerzos inferiores mantienen una envolvente curva cóncava hacia abajo. En la parte última, los esfuerzos normales después del cuarto ciclo mantienen el esfuerzo cortante constante, por lo que la envolvente lineal de tipo Mohr – Coulomb se generará con el primer y cuarto ciclo de carga del ensayo.

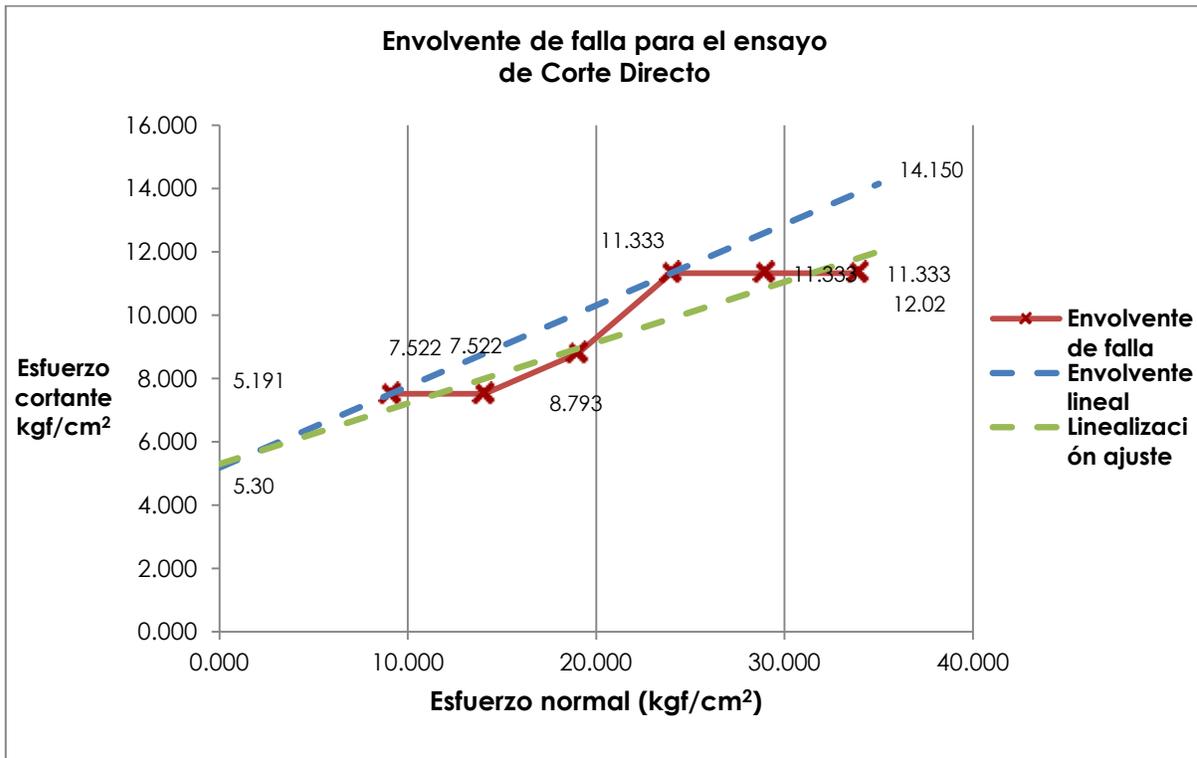


Figura No. 94.- Envolvente de falla de la discontinuidad no. 3 obtenida del ensayo de corte directo de la zona de Tres Marías.

Tabla No. 34.- Esfuerzos normal y cortante.

Esf. Normal Kgf/cm <sup>2</sup>	Esf. Corte Kgf/cm <sup>2</sup>	Envolvente lineal $y = 0.256x + 5.191$ Ángulo = 14.36° Cohesión = 5.191
9.109	7.522	
14.072	7.522	
19.035	8.793	
23.998	11.333	
28.961	11.333	
33.924	11.333	

En la Figura No. 95 se observa la discontinuidad describiendo cada una de sus fases a continuación:

- Discontinuidad natural extraída de campo.
- Discontinuidad una vez labrada, no se observa abertura en el plano de la discontinuidad.
- Discontinuidad lista para ser colada en la caja de corte directo.
- Discontinuidad después de ser ensayada. Solo se desgastó la parte que oponía resistencia, o anclaje, como se observa del lado izquierdo o la parte trasera que no cuenta ya con una porción del material.



Figura No. 95.- Discontinuidad antes y después del ensayo de corte directo.



En la tabla no. 35 se presenta un resumen de los valores obtenidos del ensayo de corte directo.

Tabla No. 35.- Resumen de los criterios para determinar el ángulo de fricción y la cohesión.

Lugar	Discontinuidad	Ensayo de corte directo	
		$\phi$ (°)	c (kg/cm <sup>2</sup> )
La Paloma	1	21.12°	4.822
	2	27.25°	10.739
	3	27.25°	10.343
Tres Marías	4	31.00°	3.774
	5	23.23°	6.832
	6	14.36°	5.191

#### 4.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO CON EL CRITERIO DE BARTON Y CHOUBEY.

Los cálculos del criterio de Barton y Choubey se encuentran en el anexo 6.5. A continuación, se presenta en la Figura No. 96 y Figura No. 97 los valores obtenidos del criterio en forma de gráfica, de las discontinuidades pertenecientes a la zona de La Paloma.

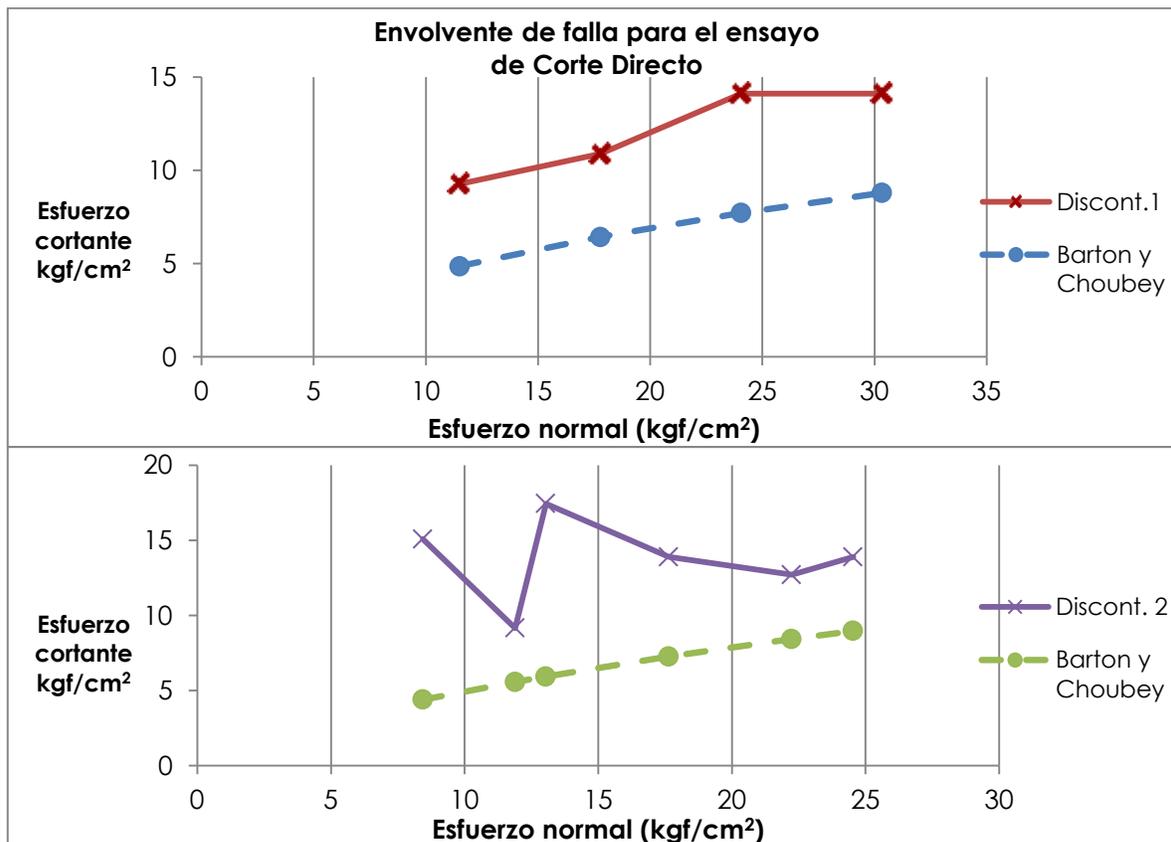


Figura No. 96.- Envolturas de falla pertenecientes a la zona de La Paloma.

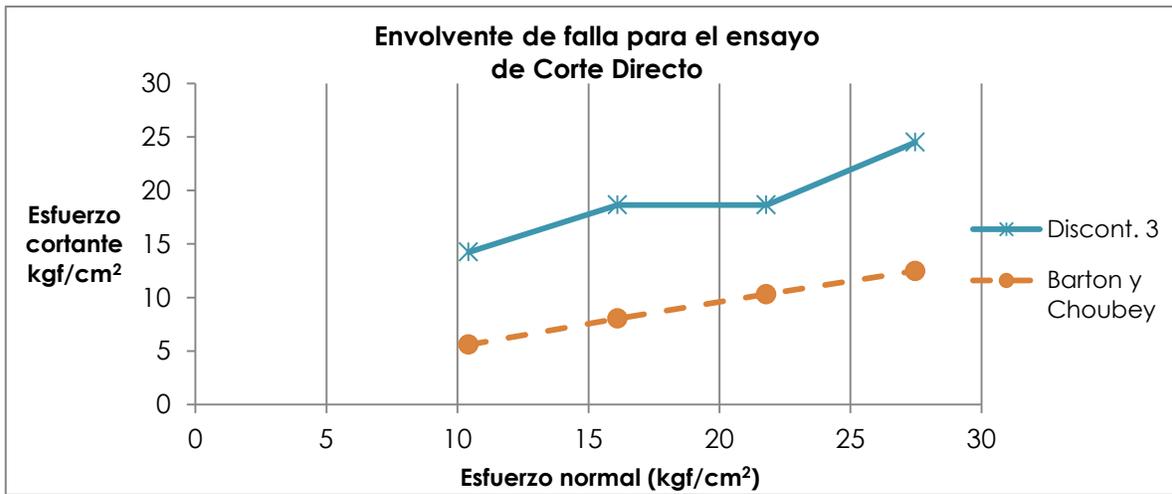


Figura No. 97.- Envoltentes de falla de la zona de La Paloma.

Se observa en la Figura No. 96 y Figura No. 97 que la envolvente de falla generada con el criterio de Barton y Choubey, representada con la línea punteada queda por debajo de la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo de corte directo, en todos los casos, se podría decir que el criterio es un poco más conservador.

En la Figura No. 98 y Figura No. 99 se presentan las envoltentes de falla obtenidas mediante el ensayo de corte directo y la envolvente obtenida con el criterio de Barton y Choubey, de las discontinuidades de la zona de Tres Marías.

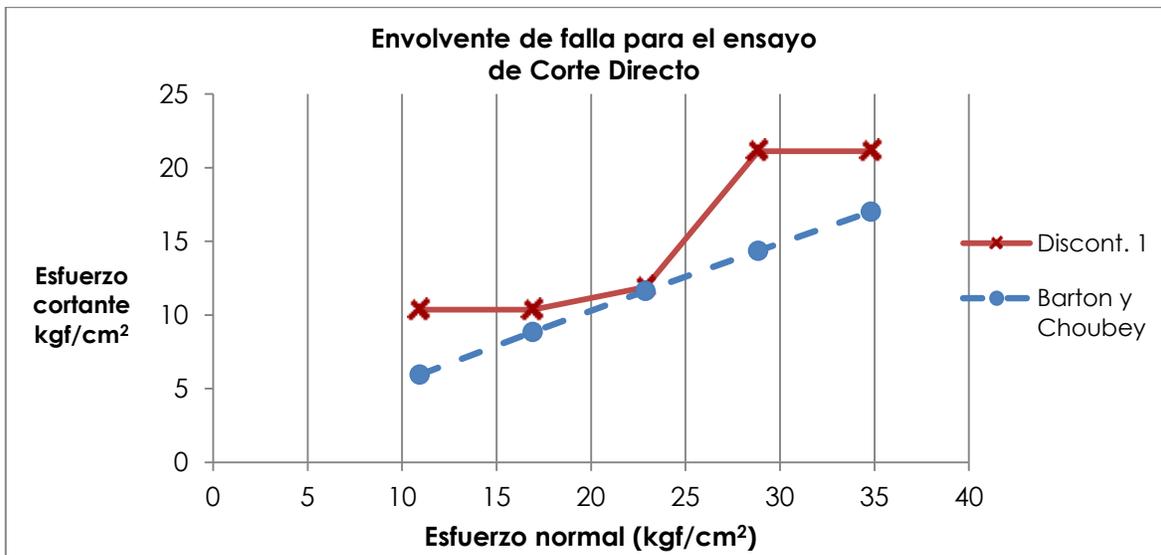


Figura No. 98.- Envoltentes de falla de la zona de Tres Marías.

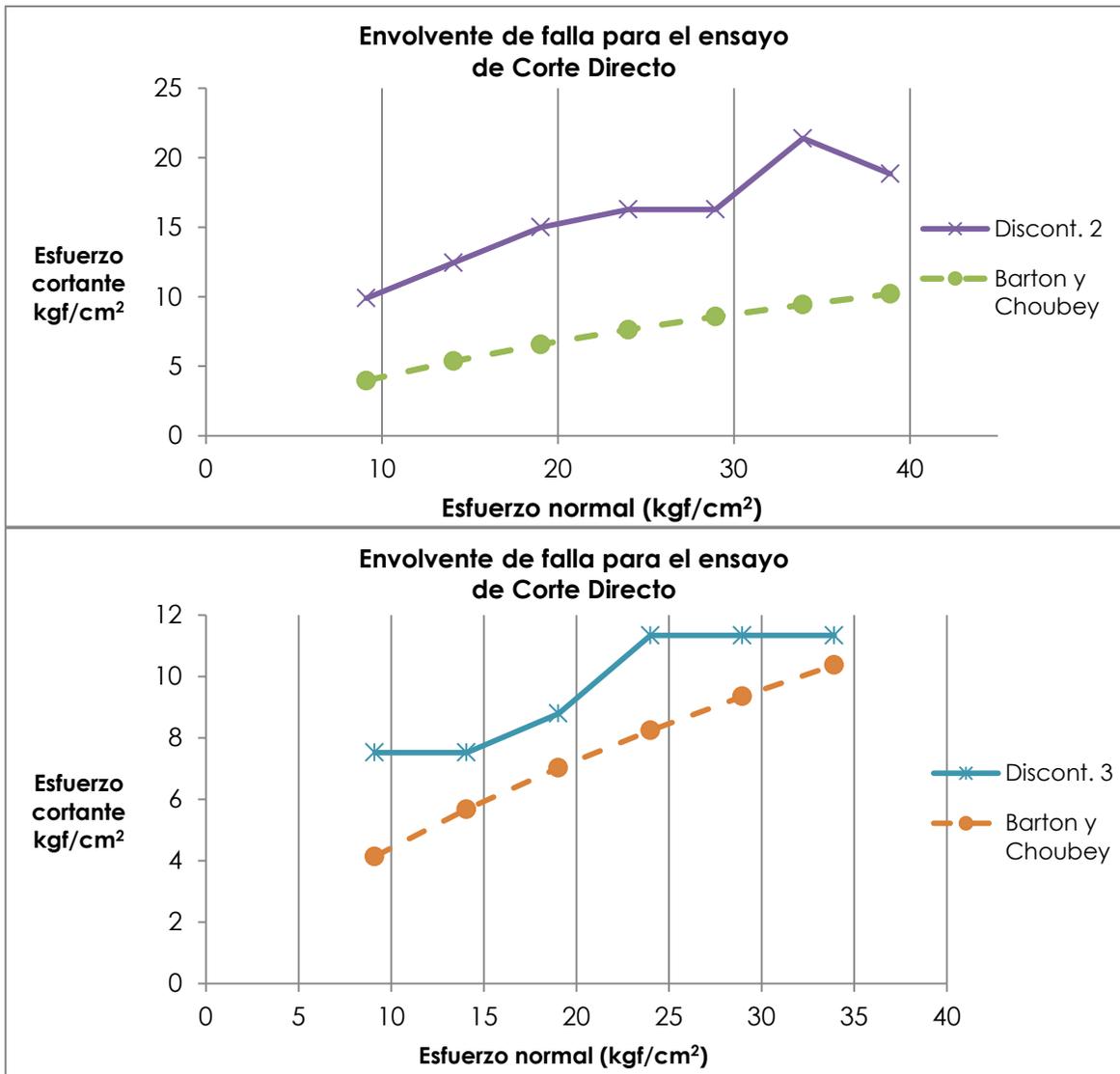


Figura No. 99.- Envolventes de falla de la zona de Tres Marías.

En la Figura No. 98 y Figura No. 99 se observa que al igual que en la zona de La Paloma, las envolventes generadas a partir del criterio de Barton y Choubey quedan por debajo de las envolventes de falla obtenidas del ensayo de corte directo. Por lo que se debe, en caso de no querer realizar la prueba de corte, tomar en cuenta que la variación de valores existe y tener cuidado al utilizar este criterio.



## 5. CONCLUSIONES.

De manera general, determinamos las características mecánicas en las que se encuentra en este momento los materiales de la zona de La Paloma y de Tres Marías, y a su vez pusimos en funcionamiento la máquina de corte directo para rocas que se construyó en la universidad. A continuación se concluyen los resultados a los que llegamos de cada zona.

### 5.1. La Paloma

Los ensayos de propiedades índice realizados en las diferentes zonas de La Paloma nos dan idea del estado actual del talud. La densidad de la roca está relacionada con la resistencia. Los resultados obtenidos nos dicen que va decreciendo con forme la altura disminuye, es decir; la parte alta presenta valores de 2.1gr/ cm<sup>3</sup> en promedio, la parte media 1.75gr/ cm<sup>3</sup> y la parte baja 1.5gr/cm<sup>3</sup>. El índice de durabilidad nos dice que tan susceptible es la roca de ser degradada en presencia de agua. Los resultados muestran que su índice durabilidad va decreciendo cuando la altura disminuye, en la parte alta tenemos un índice de durabilidad en promedio de 95.7%, lo que quiere decir que hay un desgaste del 4.3% que pierde del material, teniendo un índice de clasificación de tipo alta, (Frankling and Chandra, 1972, citado por González de Vallejo *et al*, 2002); la parte media presenta un 88.2%, y su clasificación corresponde a un tipo media, (Frankling and Chandra, 1972); la parte baja de La Paloma es la que más es afectada en el ensayo, el valor promedio que presenta es de 51.75% y su durabilidad se clasifica como baja, (Frankling and Chandra, 1972), ya que se pierde la mitad del material de la muestra. Con respecto a la prueba de intemperismo acelerado, esta se llevó a cabo en material de la parte alta de La Paloma solamente, ya que los resultados de densidad y absorción en las partes media y baja resultaron nos indicaron que el material es de mala calidad. Lo que se obtuvo del ensayo de intemperismo acelerado de la parte alta de La Paloma se observa una variedad de desgastes en diferentes zonas que van en un rango de 9% hasta un 88%, pero en promedio sería 43% de pérdida con respecto al peso inicial de la muestra, lo que es una pérdida considerable. Esto es lo que respecta a las propiedades físicas del talud de La Paloma.

En cuanto a las propiedades mecánicas del talud se tiene lo siguiente. La resistencia a compresión simple obtenida en campo mediante esclerometría de la zona alta, tiene un valor promedio de 592 kgf/cm<sup>2</sup> y corresponde a una clasificación de tipo dura (ISRM, 1981, citado en González *et al.*, 2002), la zona media presenta una resistencia promedio de 226 kgf/cm<sup>2</sup> y su clasificación corresponde a un tipo blanda, casi llegando a ser de tipo moderadamente dura, (ISRM, 1981) y la zona baja presenta una resistencia promedio de 196 kgf/cm<sup>2</sup>,



siendo dentro de la clasificación del ISRM (1981) un tipo blanda. Realizando ensayos en laboratorio para también obtener la resistencia a compresión simple, por medio del ensayo de carga puntual se tiene que la zona alta presenta un valor promedio de  $256.73 \text{ kgf/cm}^2$ , teniendo una clasificación en base a su resistencia de tipo moderadamente dura (ISRM, 1981), la zona media de  $227.7 \text{ kgf/cm}^2$  pertenece a una clasificación de tipo blanda (ISRM, 1981), y la zona baja de  $122.12 \text{ kgf/cm}^2$  siendo de tipo blanda (ISRM, 1981). Se observa en este ensayo que las resistencias que se obtuvieron en comparación con las de esclerometría son menores, pero donde resalta más es en la parte alta del talud ya que hay una diferencia considerable de la mitad de la resistencia con esclerometría, en las dos restantes oscila en un rango de 1 a  $70 \text{ kgf/cm}^2$ .

Hay que tomar en cuenta los casos donde la resistencia es menor, debido a que se han modificado las condiciones naturales del lugar, y en lo que respecta a la falda de La Paloma es un aspecto importante ya que se lleva a cabo el desarrollo de construcciones. Además aunado a esto, si consideramos el agrietamiento, la falla geológica y el temporal de lluvias que reblandece el material, es de vital importancia considerar esta zona para tomar medidas preventivas en el caso de que se presenten caída de bloques o movimientos rototraslativos de material presente en el talud.

En lo que respecta al ensayo de corte directo podemos decir que los valores del ángulo de fricción interno pico del material van en un rango de  $21^\circ$  a  $27^\circ$ , y el ángulo de inclinación a lo largo del talud de La Paloma en una sección crítica (Blvd. Dr. Ignacio Chávez) va de  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , (Hurtado Beltrán, 2010), y las discontinuidades que se tienen en el talud presentan un ángulo de buzamiento de  $5^\circ$  aproximadamente. Si comparamos estos valores en un análisis de estabilidad de taludes de la forma básica de tipo de rotura planar, donde se debe de cumplir que el ángulo de fricción interno del material debe ser menor al ángulo del talud y menor al ángulo de buzamiento de la discontinuidad, e introduciendo estos valores en un programa u hoja de cálculo y determinamos el Factor de Seguridad (F.S.), resulto que son mayores a 1, lo que quiere decir que no se presenta inestabilidad debido a las discontinuidades.

Sin embargo, la disminución de la resistencia de la roca con la altura sugiere un análisis diferente al que se mencionó en el párrafo anterior, puede ser tomando en cuenta la variación de resistencia y una superficie de rotura circular. Por otro lado se observó a la mitad del talud bloques de roca de 2 a 3 m de altura producto de la caída libre. Lo que lleva a proponer simulación de caída de bloques en las zonas susceptibles. Estos factores deben de ser considerados en caso de llevar a cabo nuevas construcciones sobre el talud que podría provocar la reactivación de movimientos.



## 5.2. Tres Marías

En lo que respecta a la zona de Tres Marías se caracterizaron dos sitios de muestreo. En el primer sitio, donde se encuentra la glorieta (ver Figura No. 29), y presentan buenas características de acuerdo a los ensayos llevados a cabo. En cuanto a sus propiedades físicas tenemos que, la densidad en este sitio es de  $2.21 \text{ gr/cm}^3$ , este se asemeja con el anteriormente obtenido de la parte alta de La Paloma, la cual presentó la mejor calidad en las zonas estudiadas. En el ensayo de durabilidad el desgaste que se obtuvo es mínimo ya que se presenta un 95.74% de índice de durabilidad, teniendo una pérdida de 4.26 % de material y su índice de durabilidad se clasifica en alto (Frankling and Chandra, 1972, citado por González de Vallejo *et al*, 2002), en el ataque a intemperismo acelerado la pérdida máxima fue de 34% y 16% con respecto al peso inicial en dos muestras de 5, las demás muestras presentaron un desgaste por debajo del 5%, esto valores nos indican que la roca no ha sido intemperizada, al grado de bajar su calidad. Sin embargo, debemos tomar en cuenta que es una construcción que lleva poco tiempo de ejecutarse y que sería bueno monitorear para predecir su comportamiento.

En cuanto sus propiedades mecánicas tenemos que, su resistencia a compresión simple obtenida en campo mediante esclerómetro tiene un valor promedio de  $472.6 \text{ kgf/cm}^2$  y se clasifica en base a su resistencia en moderadamente dura a dura (ISRM, 1981, citado por González de Vallejo *et al*, 2002). En el ensayo de carga puntual se presenta un valor promedio de  $687.19 \text{ kgf/cm}^2$  siendo su clasificación de tipo dura (ISRM, 1981). Se observa que hay una diferencia de  $215 \text{ kgf/cm}^2$  entre un ensayo y otro.

En lo que respecta al segundo sitio de muestreo, sus características son menores con respecto al primero y en este sitio hay únicamente un talud. En cuanto a sus propiedades físicas, tenemos que la densidad en este sitio presenta un valor promedio de  $1.94 \text{ gr/cm}^3$ , muy cercano a  $2 \text{ gr/cm}^3$ , no difiere mucho con el primer sitio de muestreo. El índice de durabilidad para este sitio es de 97.65% en promedio y su clasificación es alta (Frankling and Chandra, 1972, citado por González de Vallejo *et al*, 2002). Sin embargo, en el ensayo de intemperismo acelerado se tuvo un mayor desgaste en las muestras, teniendo el porcentaje de pérdida más alto, un valor de 80% con respecto al peso inicial de la muestra, y el más bajo fue de 16%. Se observa que con respecto al ensayo de durabilidad ante ciclos de mojado y secado el material no presenta un desgaste tan significativo como en el ensayo de intemperismo, por lo que se debe considerar los valores obtenidos de la prueba de intemperismo con mayor importancia ya que nos da un panorama de cómo será su comportamiento ante agentes externos, el cual en este caso en particular no es favorable.



En cuanto a las propiedades mecánicas tenemos que este segundo sitio de muestreo presenta valores de resistencia a compresión correspondientes a esclerometría con un valor promedio de 392.7 kgf/cm<sup>2</sup> que entran dentro de una clasificación de moderadamente dura (ISRM, 1981, citado por González de Vallejo *et al*, 2002); pero con respecto al primer sitio es inferior en ciertas muestras, pero su comportamiento es parecido. En el ensayo de carga puntual tenemos una resistencia promedio de 631.66 kgf/cm<sup>2</sup> siendo de tipo dura (ISRM, 1981), se aprecia con respecto al otro ensayo que hay una diferencia bastante marcada; por lo que se debe considerar esto a la hora de realizar cálculos.

Del ensayo de corte directo que se realizó en las discontinuidades de esta zona obtuvimos ángulos de fricción interno de pico que va de 15° a 30°, el ángulo de inclinación del talud en esa zona va de 45° a 70° y el ángulo de buzamiento de las discontinuidades van de 25 a 45°; realizando un análisis sencillo y rápido de estabilidad para rotura plana obtuvimos que la mayoría de los taludes se encuentran en condiciones de estabilidad ya que se obtienen valores de factor de seguridad por arriba de 1. Sin embargo, se presentaron algunos casos que son inferiores a 1, pero son muy cercanos al equilibrio crítico, es ahí donde se puede presentar una inestabilidad. Se considera que el primer sitio donde se encuentra la glorieta es de mayor relevancia por la altura que tienen los taludes que va de 8 m y decreciendo a 3.5 m hacia los lados, sin embargo el área donde se construyeron tiene un acotamiento bastante amplio de 2 a 3 m aproximadamente, zona que puede servir para almacenar material en el caso de un caído. En el segundo sitio no hay tanto problema ya que la altura del talud va de 2.5 m a 3 m como máximo. Sin embargo, de manera general para la zona de Tres Marías, el ángulo de inclinación de los taludes es bastante pronunciada por lo que se recomendaría tender o disminuir la pendiente y evitar posibles inestabilidades en esta zona.

### **5.3. Trabajos futuros.**

Por último de manera general, se recomienda llevar a cabo la instrumentación de la máquina de corte directo para obtener envolventes más definidas y facilitar el ensayo reduciendo el número de personal que se requiere. En cuanto a las pruebas que se llevan a cabo para caracterizar la matriz rocosa, se recomienda realizar más estudios ya que no se cuenta con mucha información generada al respecto a estas pruebas realizadas, para el caso de nuestro país.



## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Arreygue Rocha E. (2002). Garduño Monroy V. H., Canuti P., Casaglie N., Iotti A. y Chiesa S. **Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México.** Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 19, No. 2.

ASTM C 88-99a. **Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.**

ASTM C127-04, **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.**

ASTM D 4644-04. **Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks.**

ASTM D 4992-94. **Standard Practice for Evaluation of Rock to be Used for Erosion Control.**

ASTM D 5121-90. **Standard Practice for Preparation of Rock Slabs for Durability Testing.**

ASTM D 5240-04. **Standard Test Method for Testing Rock Slabs to Evaluate Soundness of Riprap by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.**

ASTM D 5313-04. **Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions.**

ASTM D 5607-02. **Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force.**

ASTM D 5731-05. **Standard Test Method for Determination of the Point load Strength Index of Rock.**

Camacho Tauta J. F. (2009). Reyes Ortiz O. J., Nieto Leal A., Millán Montejó S., Rincón Morantes F. **Resistencia al corte en discontinuidades con diferente grado de rugosidad.** Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

CONTROLS. **Equipos de ensayo para la industria de la construcción. Ensayo de rocas.**

Cornelis Klein, (2003) Corneluis S. Hurlbut. **Manual de mineralogía.** Editorial Reverté, S.A., Madrid.



Felicitas García. (2003). Ibarra Rosa E. y Valencia Ma. R. **Rocas minerales**. [http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi\\_rocas/piedra-rosa.htm](http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/piedra-rosa.htm)

Garduño Monroy V. H. (2000). Arreygue Rocha E., Israde Alcántara y Rodríguez Torres G. M. **Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México**. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 18, No. 1.

González de Vallejo L. (2002). Ferrer M., Ortuño L., Oteo C. **Ingeniería Geológica**. Pearson Educación, Madrid.

Hoek E. (2002). Carranz-Torres C., Corkum B.. **El criterio de rotura de Hoek-Brow**. Consulting Engineer, University of Minnesota, RocScience Inc., EUA.

Hurtado Beltrán A. (2010). **Estudio geotécnicos para taludes carreteros en zonas de riesgo**. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Martínez Pastor V., (2002). **La Tierra y su dinámica**. [http://fresno.pntic.mec.es/msap0005/2eso/Tema\\_08/Tema\\_08.html](http://fresno.pntic.mec.es/msap0005/2eso/Tema_08/Tema_08.html)

Martínez Pastor V. (2002). **Rocas-Propiedades características, ejemplos de problemas y glosario de términos**. Universidad de Alicante. España.

Navarrete Seras M. A. (2010). **Caracterización de pétreos sin labrar de la región de Morelia**. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Puell Marín F. (2004). De la Fuente Martín P. y Arenillas Parra M. **La linealización del criterio de Hoek-Brown en el análisis de la estabilidad general de taludes en roca**. Revista de obras públicas, Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil, Madrid.

Ros Avila J. (2009). **Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek & Brown y Mohr Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos**. Universidad Politécnica de Cataluña. Madrid.

Suárez L. O. y Mendieta H. J. (2003). **Ensayo de corte directo de rocas con fisura predeterminada sin relleno con el equipo portátil Hoek**. Universidad Mayor de San Simón, Bolivia.



## 7. ANEXOS.

### 7.1. ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA.

#### La Paloma

Tabla No. 36.- Lecturas y cálculo del ensayo de esclerometría en la zona alta de La Paloma

Zona alta	Datos	Ego Trinchera Oeste	Trinchera Central		Trinche ra Este	Escarpe		Trinchera Central 2		Trinchera Central 2
		Lado Este del tanque	Sur	Norte	Lado Norte	Lado Este	Lado Sur	Lado Norte		
	1	54	56	56	44	53	60	51	50	54
	2	52	50	52	37	44	56	49	40	50
	3	48	49	49	30	40	54	44	30	50
	4	47	46	49	30	34	53	42	30	42
Lecturas con Esclerómetro	5	46	44	49	30	34	52	38	30	40
	6	41	43	47	28	32	50	36		40
	7	40	42	45		32	43	34		
	8	40	41	44		30	40	34		
	9	36	38	40		30	40	30		
	10	34	36	40		26	36	30		
<b>CALCULOS</b>										
Densidad	(gr/ml)	2.066	2.066		2.066	2.066		2.066		2.066
	kN/m <sup>3</sup>	20.261	20.261		20.261	20.261		20.261		20.261
Promedio	----	<b>49.40</b>	<b>49.00</b>	<b>51.00</b>	<b>34.20</b>	<b>41.00</b>	<b>55.00</b>	<b>44.80</b>	<b>36.00</b>	<b>47.20</b>
Gráfica	(Mpa)	65	64	70	37.50	49	90	55	40	62
<b>RESULTADOS</b>										
Promedio	kg/cm <sup>2</sup>	<b>663</b>	<b>683.4</b>		<b>382.5</b>	<b>708.9</b>		<b>484.5</b>		<b>632.4</b>



Tabla No. 37.- Lecturas y cálculo del ensayo de esclerometría en la zona media de La Paloma

Zona media	Datos	Punto 1		Punto 2		Antiguo Banco de Material
		Inicia bajada		Lado	Tanque	
Lecturas con Esclerómetro	1	32	12	24		
	2	30	14	20		
	3	29	13	18		
	4	28	12	18		
	5	27		18		
	6	26		18		
	7	22		17		
	8	22		16		
	9	22		16		
	10	20		14		
<b>CALCULOS</b>						
Densidad	(gr/ml)	1.752	1.752	1.752		
	kN/m <sup>3</sup>	17.181	17.181	17.181		
Promedio	----	<b>29.20</b>	<b>12.75</b>	<b>19.60</b>		
Gráfica	(Mpa)	30.5	16.5	19.50		
<b>RESULTADOS</b>						
Promedio	kg/cm <sup>2</sup>	<b>311.1</b>	<b>168.3</b>	<b>198.9</b>		

Tabla No. 38.- Lecturas y cálculo del ensayo de esclerometría en la zona baja de La Paloma

Zona baja	Datos	División entre Campestre y La Paloma		Punto 3	Punto 4	Punto 5	Parte más baja de La Paloma	
		Canal	Lado Extremo	Lado Poniente de la Iglesia	Lado Ecurrimiento arriba de casas			
Lecturas con Esclerómetro	1	18	20	16	21	18	18	
	2	20	12	18	23	17	14	
	3	24	16	14	20	17	12	
	4	21	18	14	24	16	19	
	5	20	14		23	23	18	
	6	23	12		26	16	16	
	7	16	18		18		16	
	8	16	16		18		18	
	9	22	20		16		15	
	10	20	18		20		15	
<b>CALCULOS</b>								
Densidad	(gr/ml)	1.522	1.522	1.522	1.522	1.522	1.522	
	kN/m <sup>3</sup>	14.926	14.926	14.926	14.926	14.92	14.92	
Promedio	----	<b>20.60</b>	<b>16.00</b>	<b>15.50</b>	<b>22.20</b>	<b>18.20</b>	<b>16.20</b>	
Gráfica	(Mpa)	21	18	17.00	23	18.5	18	
<b>RESULTADOS</b>								
Promedio	kg/cm <sup>2</sup>	<b>214.2</b>	<b>183.6</b>	<b>173.4</b>	<b>234.6</b>	<b>188.7</b>	<b>183.6</b>	

**Tres Marías**

Tabla No. 39.- Lecturas y cálculo del ensayo de esclerometría en la zona de Tres Marías

	Datos	1er sitio			2do sitio	
		Talud Norte			Puente antes del talud Norte	
Lecturas con Esclerómetro	1	40	52	34	40	32
	2	38	44	32	38	30
	3	36	42	30	38	30
	4	32	42	30	38	28
	5	30	42		36	28
	6	30	42			26
	7		42			26
	8		42			26
	9					22
<b>CALCULOS</b>						
Densidad	(gr/ml)	2.212	2.212	2.212	1.941	1.941
	kN/m <sup>3</sup>	21.692	21.692	21.692	19.035	19.035
Promedio	----	<b>35.20</b>	<b>44.40</b>	<b>31.50</b>	<b>38.00</b>	<b>29.60</b>
Gráfica	(Mpa)	41	62	36.00	45	32
<b>RESULTADOS</b>						
Promedio parcial	kg/cm <sup>2</sup>	418.2	632.4	367.2	459	326.4
Promedio total	kg/cm <sup>3</sup>	<b>472.6</b>			<b>392.7</b>	



## 7.2. ENSAYO DE CARGA PUNTUAL.

### La Paloma - Zona alta

Tabla No. 40.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma.

Muestra No.	Geometría de la muestra				Presión (N)	Resultados				Clasificación		
	D	W1	W2	De2		Is	Is (50)	δc	δc	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(kg/cm2)			
1	58.50	84.00	75.00	5921.519	13665.54	2.31	2.80	67.25	685.91	Dura	Dura	Media
2	42.50	70.50	89.00	4315.486	10104.05	2.34	2.65	55.59	567.06	Dura	Dura	Media
3	50.20	60.20	70.00	4160.972	7513.88	1.81	2.03	46.58	475.09	Mod. dura	Mod. dura	Baja
4	40.30	55.50	72.00	3271.112	6866.33	2.10	2.23	46.83	477.66	Mod. dura	Mod. dura	Baja
5	32.00	73.00	65.50	2821.499	6542.56	2.32	2.38	45.27	461.79	Mod. dura	Mod. dura	Baja
6	40.50	84.00	76.00	4125.296	7190.10	1.74	1.95	40.97	417.87	Mod. dura	Mod. dura	Baja
7	40.50	72.00	67.50	3596.743	6218.79	1.73	1.88	39.41	401.94	Mod. dura	Mod. dura	Baja
8	63.50	59.00	69.00	5174.446	6866.33	1.33	1.56	38.29	390.58	Mod. dura	Mod. dura	Baja
9	40.00	70.50	69.00	3552.338	5895.02	1.66	1.80	37.72	384.70	Mod. dura	Mod. dura	Baja
10	41.50	73.00	70.00	3778.020	4923.70	1.30	1.43	30.03	306.33	Mod. dura	Mod. dura	Baja
11	42.50	70.50	62.00	3584.965	2527.79	0.71	0.76	16.06	163.79	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
12	45.50	62.00	62.00	3591.809	2009.76	0.56	0.61	12.75	130.03	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
13	47.50	75.50	62.00	4157.923	2204.02	0.53	0.59	12.48	127.31	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
14	43.50	97.50	97.00	5386.281	2333.53	0.43	0.51	10.81	110.29	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
15	56.00	82.00	80.50	5793.240	2009.76	0.35	0.42	10.06	102.60	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
16	40.00	56.00	81.50	3501.409	1038.44	0.30	0.32	6.72	68.53	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
17	48.50	66.50	66.00	4091.078	779.43	0.19	0.21	4.47	45.59	Muy blanda	Blanda	Muy Baja
18	42.70	60.50	66.00	3438.734	649.92	0.19	0.20	4.26	43.49	Muy blanda	Blanda	Muy Baja
19	37.50	72.00	77.00	3557.113	714.67	0.20	0.22	4.13	42.15	Muy blanda	Blanda	Muy Baja
20	55.00	83.00	66.00	5217.099	714.67	0.14	0.16	3.88	39.57	Muy blanda	Blanda	Muy Baja
						<b>1.08</b>	<b>1.18</b>	<b>25.17</b>	<b>256.73</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Baja</b>

**La Paloma - zona media**

Tabla No. 41.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma.

Muestra No.	Geometría de la muestra				Presión (N)	Resultados				Clasificación		
	D	W1	W2	De2		Is	Is (50)	δc	δc	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(kg/cm2)			
1	42.50	70.50	89.00	4315.486	10104.05	2.34	2.65	55.59	567.06	Dura	Dura	Media
2	39.70	52.30	58.20	2792.755	6866.33	2.46	2.52	47.89	488.50	Mod. dura	Mod. dura	Baja
3	40.11	60.50	62.10	3130.569	6542.56	2.09	2.20	46.17	470.89	Mod. dura	Mod. dura	Baja
4	32.00	73.00	65.50	2821.499	6542.56	2.32	2.38	45.27	461.79	Mod. dura	Mod. dura	Baja
5	41.5	73	75.5	3923.329	6218.79	1.59	1.75	36.84	375.76	Mod. dura	Mod. dura	Baja
6	26.50	48.50	35.50	1417.116	3304.84	2.33	2.05	35.92	366.36	Mod. dura	Mod. dura	Baja
7	41.00	38.00	45.00	2166.417	3304.84	1.53	1.48	31.02	316.40	Mod. dura	Mod. dura	Baja
8	38.00	38.20	38.00	1843.396	3110.58	1.69	1.58	29.94	305.35	Mod. dura	Mod. dura	Baja
9	42.00	39.50	45.00	2259.364	2981.07	1.32	1.29	27.08	276.26	Mod. dura	Mod. dura	Baja
10	40.00	40.00	43.00	2113.578	2657.30	1.26	1.21	25.42	259.32	Mod. dura	Mod. dura	Baja
11	45.5	62	62	3591.809	2009.76	0.56	0.61	12.75	130.03	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
12	44.60	66.80	69.30	3864.320	2009.76	0.52	0.57	12.05	122.87	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
13	43.5	97.5	97	5386.281	2333.53	0.43	0.51	10.81	110.29	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
14	43.20	60.70	70.10	3597.258	1685.99	0.47	0.51	10.68	108.96	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
15	56	82	80.5	5793.240	2009.76	0.35	0.42	10.06	102.60	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
16	40.70	48.70	66	2971.926	1362.21	0.46	0.48	10.01	102.08	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
17	40	56	81.5	3501.409	1038.44	0.30	0.32	6.72	68.53	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
18	47.20	56.90	66	3692.955	1038.44	0.28	0.31	6.45	65.76	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
19	37.5	72	77	3557.113	714.67	0.20	0.22	4.13	42.15	Muy blanda	Blanda	Muy Baja
20	55	83	66	5217.099	714.67	0.14	0.16	3.88	39.57	Muy blanda	Blanda	Muy Baja
						<b>1.09</b>	<b>1.10</b>	<b>22.32</b>	<b>227.70</b>	<b>Blanda</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Muy Baja</b>

**La Paloma - Zona baja**

Tabla No. 42.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma.

Muestra No.	Geometría de la muestra				Presión (N)	Resultados				Clasificación		
	D	W1	W2	De2		Is	Is (50)	δc	δc	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(kg/cm2)			
1	56.00	52.00	64.00	4135.48	3628.62	0.88	0.98	23.58	240.55	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
2	40.00	50.00	45.50	2431.89	2333.53	0.96	0.95	20.03	204.26	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
3	52.00	58.00	47.00	3475.94	2657.30	0.76	0.82	18.94	193.15	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
4	37.00	53.50	44.50	2308.38	2333.53	1.01	0.99	18.87	192.43	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
5	44.00	48.00	41.00	2493.00	2009.76	0.81	0.81	16.92	172.57	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
6	51.00	55.00	50.00	3409.10	2333.53	0.68	0.73	16.88	172.19	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
7	42.50	47.50	46.50	2543.30	2009.76	0.79	0.79	16.66	169.92	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
8	52.00	57.00	48.50	3492.50	2333.53	0.67	0.72	16.57	169.00	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
9	60.00	69.00	52.00	4621.86	2657.30	0.57	0.66	16.17	164.98	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
10	40.00	46.50	40.50	2215.44	1685.99	0.76	0.74	15.55	158.64	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
11	43.00	44.50	45.00	2450.03	1685.99	0.69	0.69	14.39	146.73	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
12	59.00	66.00	53.00	4469.71	2333.53	0.52	0.59	14.28	145.65	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
13	48.00	58.00	45.00	3147.45	2009.76	0.64	0.67	14.12	144.05	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
14	49.00	57.00	45.00	3181.83	2009.76	0.63	0.67	14.00	142.84	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
15	45.00	50.00	41.00	2606.96	1685.99	0.65	0.65	13.71	139.84	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
16	50.00	70.50	51.50	3883.38	2009.76	0.52	0.57	13.14	134.06	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
17	40.00	48.50	36.50	2164.51	1362.21	0.63	0.61	12.79	130.50	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
18	53.00	51.00	57.00	3644.01	1685.99	0.46	0.50	11.58	118.15	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
19	44.50	66.00	48.50	3243.74	1685.99	0.52	0.55	11.57	118.05	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
20	44.00	45.50	48.00	2619.05	1362.21	0.52	0.53	11.04	112.58	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
21	39.00	39.00	57.00	2383.50	1362.21	0.57	0.57	10.74	109.58	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
22	57.00	55.00	62.00	4245.62	1685.99	0.40	0.45	10.74	109.52	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
23	53.00	60.00	47.00	3610.27	1362.21	0.38	0.41	9.43	96.15	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
24	61.00	68.00	55.00	4776.56	1524.10	0.32	0.37	9.04	92.24	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
25	42.00	50.50	50.00	2687.17	1038.44	0.39	0.39	8.25	84.13	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
26	47.00	44.00	51.00	2842.51	1038.44	0.37	0.38	7.90	80.55	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
27	62.00	55.00	70.00	4933.80	1362.21	0.28	0.32	7.88	80.40	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
28	50.00	55.00	47.00	3246.76	1038.44	0.32	0.34	7.80	79.58	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja



29	50.00	48.50	54.00	3262.68	1038.44	0.32	0.34	7.77	79.28	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
30	51.00	49.50	57.00	3457.80	1038.44	0.30	0.32	7.43	75.79	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
31	55.00	60.00	55.00	4026.62	1038.44	0.26	0.29	6.89	70.28	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
32	45.50	48.50	45.00	2708.34	714.67	0.26	0.27	5.64	57.55	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
33	46.00	46.00	47.00	2723.46	714.67	0.26	0.27	5.62	57.30	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
34	55.00	53.50	58.00	3904.07	714.67	0.18	0.20	4.86	49.54	Muy blanda	Blanda	Muy Baja
35	60.00	58.00	64.00	4660.06	390.90	0.08	0.10	2.36	24.12	Muy blanda	Blanda	Muy Baja
						<b>0.52</b>	<b>0.54</b>	<b>11.97</b>	<b>122.12</b>	<b>Blanda</b>	<b>Mod. Blanda</b>	<b>Muy Baja</b>

**Tres Marías – 1er y 2do sitio de muestreo.**

Tabla No. 43.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de Tres Marías.

Muestra No.	Geometría de la muestra				Presión (N)	Resultados				Clasificación		
	D	W1	W2	De2		Is	Is (50)	$\delta_c$	$\delta_c$	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(kg/cm <sup>2</sup> )			
1	39	58	41	2457.99	24350.00	9.91	9.87	187.51	1912.57	Muy dura	Muy dura	Alta
2	53	48	62	3711.49	24997.55	6.74	7.36	169.31	1726.99	Muy dura	Muy dura	Alta
3	45	45	47	2635.61	20464.74	7.76	7.86	165.01	1683.09	Muy dura	Muy dura	Alta
4	47	67	59	3770.06	26940.18	7.15	7.84	164.59	1678.86	Muy dura	Muy dura	Alta
5	58	69	53	4504.72	24350.00	5.41	6.17	148.11	1510.71	Muy dura	Muy dura	Alta
6	50	67	60	4042.54	14636.85	3.62	4.03	92.79	946.42	Dura	Dura	Media
7	45	45	48	2664.25	10751.59	4.04	4.09	85.97	876.87	Dura	Dura	Media
8	45	54	40	2692.90	10751.59	3.99	4.06	85.26	869.63	Dura	Dura	Media
9	47	47	48	2842.51	10104.05	3.55	3.66	76.84	783.72	Dura	Dura	Media
10	47	44	51	2842.51	8808.96	3.10	3.19	66.99	683.26	Dura	Dura	Media
11	54	49	59	3712.77	9456.51	2.55	2.78	66.82	681.54	Dura	Dura	Media
12	60	57	64	4621.86	8808.96	1.91	2.19	53.62	546.92	Dura	Dura	Media
13	55	53	61	3991.61	7513.88	1.88	2.09	50.19	511.98	Dura	Dura	Media
14	48	53	57	3361.35	7513.88	2.24	2.39	50.18	511.80	Dura	Dura	Media
15	43	46	66	3065.96	6866.33	2.24	2.34	49.24	502.25	Mod. dura	Mod. dura	Baja
16	52	50	55	3475.94	6218.79	1.79	1.93	44.32	452.03	Mod. dura	Mod. dura	Baja
17	63	60	67	5093.59	7513.88	1.48	1.73	42.42	432.66	Mod. dura	Mod. dura	Baja
18	49	56	52	3368.99	6218.79	1.85	1.97	41.45	422.84	Mod. dura	Mod. dura	Baja
19	47	54	42	2872.43	4923.70	1.71	1.77	37.14	378.82	Mod. dura	Mod. dura	Baja
20	42	42	45	2326.21	3628.62	1.56	1.53	32.23	328.75	Mod. dura	Mod. dura	Baja
21	45	43	50	2664.25	2981.07	1.12	1.14	23.84	243.13	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
22	64	70	67	5581.88	3628.62	0.65	0.78	19.08	194.63	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
23	58	55	62	4320.10	2981.07	0.69	0.78	18.73	191.05	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
24	46	48	46	2752.74	1685.99	0.61	0.63	13.14	134.07	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
25	48	50	48	2994.66	1685.99	0.56	0.59	12.31	125.59	Blanda	Mod. Blanda	Muy Baja
						<b>2.87</b>	<b>3.06</b>	<b>67.37</b>	<b>687.19</b>	<b>Dura</b>	<b>Dura</b>	<b>Media</b>



Muestra No.	Geometría de la muestra				Presión (N)	Resultados				Clasificación		
	D	W1	W2	De2		Is	Is (50)	δc	δc	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(kg/cm2)			
1	30	58	44	1948.06	14636.85	7.51	7.10	134.97	1376.65	Muy dura	Muy dura	Alta
2	46	66	39	3074.87	18522.11	6.02	6.31	132.53	1351.78	Muy dura	Muy dura	Alta
3	63	74	56	5132.75	19817.20	3.86	4.54	111.21	1134.36	Muy dura	Muy dura	Alta
4	49	48	51	3088.24	15284.40	4.95	5.19	108.99	1111.74	Muy dura	Muy dura	Alta
5	34	59	47	2283.56	12046.68	5.28	5.17	98.21	1001.75	Dura	Dura	Media
6	51	60	70	4220.79	15284.40	3.62	4.07	93.70	955.78	Dura	Dura	Media
7	34	61	52	2435.07	12046.68	4.95	4.92	93.44	953.10	Dura	Dura	Media
8	42	47	51	2620.33	11399.14	4.35	4.40	92.33	941.74	Dura	Dura	Media
9	51	53	49	3279.23	11722.91	3.57	3.80	87.40	891.46	Dura	Dura	Media
10	48	68	56	3749.69	13989.31	3.73	4.09	85.83	875.45	Dura	Dura	Media
11	63	62	65	5093.59	10751.59	2.11	2.48	60.70	619.10	Dura	Dura	Media
12	53	60	47	3610.27	8161.42	2.26	2.46	56.48	576.05	Dura	Dura	Media
13	44	65	51	3249.31	7837.65	2.41	2.56	53.73	548.06	Dura	Dura	Media
14	55	55	56	3886.56	7513.88	1.93	2.14	51.24	522.67	Dura	Dura	Media
15	53	53	47	3374.08	6866.33	2.04	2.18	50.07	510.73	Dura	Dura	Media
16	35	62	57	2640.38	6866.33	2.60	2.63	50.02	510.21	Dura	Dura	Media
17	44	50	39	2493.00	4923.70	1.98	1.97	41.45	422.78	Mod. dura	Mod. dura	Baja
18	35	47	56	2295.01	4923.70	2.15	2.10	39.99	407.85	Mod. dura	Mod. dura	Baja
19	49	56	43	3088.24	4923.70	1.59	1.67	35.11	358.14	Mod. dura	Mod. dura	Baja
20	55	61	50	3886.56	4923.70	1.27	1.40	33.58	342.49	Mod. dura	Mod. dura	Baja
21	54	67	61	4400.32	4923.70	1.12	1.27	30.50	311.08	Mod. dura	Mod. dura	Baja
22	48	62	61	3719.45	4923.70	1.32	1.45	30.40	310.07	Mod. dura	Mod. dura	Baja
23	59	67	54	4487.69	4923.70	1.10	1.25	30.04	306.37	Mod. dura	Mod. dura	Baja
24	40	43	42	2164.51	2981.07	1.38	1.33	28.00	285.60	Mod. dura	Mod. dura	Baja
25	57	62	53	4173.04	4276.16	1.02	1.15	27.60	281.50	Mod. dura	Mod. dura	Baja
26	40	50	49	2508.28	2981.07	1.19	1.19	24.98	254.76	Blanda	Mod. dura	Muy Baja



		<b>2.71</b>	<b>2.87</b>	<b>61.93</b>	<b>631.66</b>	<b>Dura</b>	<b>Dura</b>	<b>Media</b>
--	--	-------------	-------------	--------------	---------------	-------------	-------------	--------------

### 7.3. ENSAYO DE CARGA PUNTUAL – EN DISCONTINUIDADES.

#### La paloma.

Tabla No. 44.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de La Paloma en discontinuidades.

Muestra No.	Geometría de la muestra				Presión (N)	Resultados				Clasificación		
	D	W1	W2	De2		Is	Is (50)	δc	δc	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(kg/cm2)			
1	26	70	67	2267.640	6218.790	2.74	2.68	46.95	478.75	Mod. dura	Mod. dura	Baja
2	36	70	75	3323.155	7513.877	2.26	2.41	45.80	467.04	Mod. dura	Mod. dura	Baja
3	36	74	48	2796.034	7513.877	2.69	2.76	52.36	533.93	Dura	Dura	Media
4	35	80	45	2785.212	6218.790	2.23	2.29	43.47	443.23	Mod. dura	Mod. dura	Baja
						<b>2.48</b>	<b>2.53</b>	<b>47.14</b>	<b>480.74</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Baja</b>
1	32	50	46	1955.696	6218.790	3.18	3.01	57.17	582.96	Dura	Dura	Media
2	39	68	68	3376.631	6218.790	1.84	1.97	37.44	381.79	Mod. dura	Mod. dura	Baja
3	29	72	50	2252.361	2981.073	1.32	1.29	22.62	230.70	Blanda	Mod. dura	Muy Baja
4	32	54	49	2098.299	3628.616	1.73	1.66	31.59	322.09	Mod. dura	Mod. dura	Baja
5	45	43	48	2606.958	6866.333	2.63	2.66	55.83	569.35	Dura	Dura	Media
						<b>2.14</b>	<b>2.12</b>	<b>40.93</b>	<b>417.38</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Baja</b>
1	29	60	47	1975.431	10104.050	5.11	4.85	84.89	865.63	Dura	Dura	Media
2	25	56	51	1702.958	10751.594	6.31	5.79	101.34	1033.39	Muy dura	Muy dura	Alta
3	31	59	58	2309.020	13989.311	6.06	5.95	113.07	1153.00	Muy dura	Muy dura	Alta
4	43	44	53	2655.341	8808.963	3.32	3.36	70.62	720.09	Dura	Dura	Media
5	50	46	55	3214.930	9456.507	2.94	3.11	71.59	730.02	Dura	Dura	Media
						<b>4.75</b>	<b>4.61</b>	<b>88.30</b>	<b>900.43</b>	<b>Dura</b>	<b>Dura</b>	<b>Media</b>

**Tres Marías.***Tabla No. 45.- Cálculo del ensayo de carga puntual en muestras de la zona de Tres Marías en discontinuidades.*

Muestra No.	Geometría de la muestra				Presión (N)	Resultados				Clasificación		
	D	W1	W2	De2		Is	Is (50)	$\delta_c$	$\delta_c$	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bieniawski (1973)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(kg/cm <sup>2</sup> )			
1	42	84	79	4358.299	15284.3974	3.51	3.97	83.46	851.26	Dura	Dura	Media
2	47	67	56	3680.299	13989.3106	3.80	4.15	87.08	888.22	Dura	Dura	Media
3	45	48	48	2750.197	5571.24645	2.03	2.07	43.46	443.33	Mod. dura	Mod. dura	Baja
						3.11	<b>3.40</b>	<b>71.33</b>	<b>727.60</b>	<b>Dura</b>	<b>Dura</b>	<b>Media</b>
1	47	72	63	4039.352	7513.87663	1.86	2.07	43.52	443.87	Mod. dura	Mod. dura	Baja
2	35	84	78	3609.634	7513.87663	2.08	2.26	42.96	438.17	Mod. dura	Mod. dura	Baja
3	56	85	70	5525.860	9456.50682	1.71	2.05	49.10	500.78	Mod. dura	Mod. dura	Baja
						1.88	<b>2.13</b>	<b>45.19</b>	<b>460.94</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Mod. dura</b>	<b>Baja</b>



## 7.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO.

### La Paloma – Discontinuidad No. 1.

Tabla No. 46.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo

**Datos:**

Área parte inferior: 97.05 cm<sup>2</sup>  
 Área parte superior: 97.34 cm<sup>2</sup>  
 Área promedio: 97.20 cm<sup>2</sup>

Presión Manómetro (kgf/cm <sup>2</sup> ):		40	80	120	160	
Carga normal (kgf):		1119.19	1728.99	2338.79	2948.59	
Presión Manómetro	Carga de corte	Esfuerzo cortante	Deformación Horizontal	Deformación Horizontal	Deformación Horizontal	Deformación Horizontal
kg/cm <sup>2</sup>	kg	kg/cm <sup>2</sup>	micras	micras	micras	micras
0	115.81	1.19	0	0	0	0
10	272.85	2.81	5	7	6	13
20	429.89	4.42	25	15	55	49
30	586.93	6.04	75	50	65	66
40	743.97	7.65	95	92	89	83
50	901.01	9.27	214	105	135	98
60	1058.05	10.89		195	191	118
70	1215.09	12.50			200	166
80	1372.13	14.12			385	314.5



Tabla No. 47.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo.

Tiempo	40	80	120	160
	Deformación Vertical	Deformación Vertical	Deformación Vertical	Deformación Vertical
	micras			
0 seg	49.5	73	169	88
1 minuto	49.5	73	171	88
2 minuto	49.5	73	171	89
3 minuto	49.5	73	172	89
4 minuto	49.5	73	172	89
5 minuto	49.5	73	172	89
6 minuto	49.5	73	172	89
7 minuto	49.5	73	172	89
8 minuto	49.5	73	172	89
9 minuto	49.5	73	172	89
10 minuto	49.5	73	172	89

x	y
24.063	14.117
11.515	9.270
12.548	4.847
11.515	4.448
m =	0.3863
b =	4.8220
$y = 0.386x + 4.822$	
x	y
0	4.822
30	16.411
Ángulo = $21.12^\circ$	
Cohesión = 4.822	

**La Paloma – Discontinuidad No. 2.**

Tabla No. 48.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo

**Datos:**Área parte inferior: 116.98 cm<sup>2</sup>Área parte superior: 148.20 cm<sup>2</sup>Área promedio: 132.59 cm<sup>2</sup>

<b>Presión Manómetro (kgf/cm<sup>2</sup>):</b>			<b>40</b>		<b>70</b>		<b>80</b>		<b>120</b>		<b>160</b>		<b>180</b>	
Carga normal (kgf):			1119.19		1576.54		1728.99		2338.79		2948.59		3253.49	
<b>Presión Manómetro</b>	<b>Carga de corte</b>	<b>Esfuerzo cortante</b>	<b>D. H.</b>	<b>D. V.</b>										
kg/cm <sup>2</sup>	kg	kg/cm <sup>2</sup>	micras											
0	115.81	0.87	0	25	0	89	0	84	0	52	0	72	0	59
5	194.33	1.47	6.5	26	16	89	0	84	0	53	2	72	45	73
10	272.85	2.06	13	26	23	90	0.8	84	3	52	5	73	45	74
15	351.37	2.65	19	28	26	91	30	84	18.5	52	9	73.5	46	74
20	429.89	3.24	27	31	30.5	92	120	88.5	20	54	12	75	47.5	74
25	508.41	3.83	38	34	39	94.5	123	90	25	55.5	16	77	48	75
30	586.93	4.43	43	35	46	97	125	91	29	56	19	79	48.5	75
35	665.45	5.02	47	36	67	104	127.5	92	33.5	58	21	80	49.5	75
40	743.97	5.61	50.5	37	111	114	133	94	40	60	23	82	50	76
45	822.49	6.20	57.5	39	164	128	138	96	41	62	26	85	51	76
50	901.01	6.80	62	39.5	238	161	144	98	44	64	29	88	52	76.5
55	979.53	7.39	67	40	273	177	152	101	47.5	61	32	90	52.5	77
60	1058.05	7.98	73	40	301	149	172	103	50	68	36	93	53.5	77.5
70	1215.09	9.16	83.5	39	445	156.5	192.5	109	198	123	141	137	120	120
80	1372.13	10.35	123	32			230	113	317	157	174	137	178	151
90	1529.17	11.53	232	23			237	115	356	170	245	137	220	185
100	1686.21	12.72	260	23.5			268	120	595	220	333	137.5	270	190.5
110	1843.25	13.90	312	22			331	125	690	242			337	222
120	2000.29	15.09	533.5	20			372	129						
130	2157.33	16.27					490	135						
140	2314.37	17.46					571	153						



Tabla No. 49.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo

Tiempo	40	70	80	120	160	180
	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.
	micras					
0 seg	25	90.5	85	53	72	58
1 minuto	26	90	85	53	72	59
2 minuto	25.5	89.5	85	53	72	59
3 minuto	25	89	85	53	72	59
4 minuto	25	89	84.5	53	72	59
5 minuto	25	89	84.5	53	72	59
6 minuto	25	89	84	53	72	59
7 minuto	25	89	84	53	72	59
8 minuto	25	89	84	53	72	59
9 minuto	25	89	84	53	72	59
10 minuto	25	89	84	53	72	59

Envolvente lineal

x		y
	13.040	17.455
	8.441	15.086
	4.599	2.369
	8.441	4.348
	m =	0.5151
	b =	10.7387
	$y = 0.515x + 10.739$	
x		y
	0	10.739
	25	23.615
	Ángulo = 27.25°	
	Cohesión = 10.739	

**La Paloma – Discontinuidad No. 3.**

Tabla No. 50.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo.

**Datos:**Área parte inferior: 112.26 cm<sup>2</sup>Área parte superior: 102.33 cm<sup>2</sup>Área promedio: 107.30 cm<sup>2</sup>

<b>Presión Manómetro (kgf/cm<sup>2</sup>):</b>			<b>40</b>		<b>80</b>		<b>120</b>		<b>160</b>	
Carga normal (kgf):			1119.19		1728.99		2338.79		2948.59	
<b>Presión Manómetro</b>	<b>Carga de corte</b>	<b>Esfuerzo cortante</b>	<b>D. H.</b>	<b>D. V.</b>	<b>D. H.</b>	<b>D. V.</b>	<b>D. H.</b>	<b>D. V.</b>	<b>D. H.</b>	
kg/cm <sup>2</sup>	kg	kg/cm <sup>2</sup>	micras							
0	115.81	1.08	0	0	24.5	0	43	3	86.5	
10	272.85	2.54	16.9	31	31	7	46	5	87.5	
20	429.89	4.01	29	33	32	48	50	8	88.5	
30	586.93	5.47	47	37	33.9	90	54	10.5	90	
40	743.97	6.93	83	44	36	116	57	16	93.5	
50	901.01	8.40	112	54	38	141	60	23	97.5	
60	1058.05	9.86	137	70	42	169	60	30	103	
70	1215.09	11.32	156	85.5	47	198	60	38	107	
80	1372.13	12.79	176	95	50	216	59	51	115	
90	1529.17	14.25	218	111	53	246	55	63	122	
100	1686.21	15.72		142	55	287	51	71	127	
110	1843.25	17.18		178	54	330	44	81	132	
120	2000.29	18.64		220	50	390	34	101	141	
130	2157.33	20.11						120	149	
140	2314.37	21.57						146	157	
150	2471.41	23.03						176	167	
160	2628.45	24.50						230	178	



Tabla No. 51 .- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo

Tiempo	40	80	120	160
	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.
micras				
0 seg	57	26	44	85
1 minuto	57.5	25	44	86
2 minuto	57.5	25	44	86.5
3 minuto	57.5	25	43.5	86.5
4 minuto	57.5	25	43	86.5
5 minuto	57.1	24.5	43	86.5
6 minuto	57.1	24.5	43	86.5
7 minuto	57.1	24.5	43	86.5
8 minuto	57.1	24.5	43	86.5
9 minuto	57.1	24.5	43	86.5
10 minuto	57.1	24.5	43	86.5

Envolvente lineal

x	y
27.481	24.497
16.114	18.643
11.367	5.855
16.114	8.300
m =	0.5151
b =	10.3431
$y = 0.515x + 10.343$	
x	y
0	10.343
28	24.765
Ángulo = 27.25°	
Cohesión = 10.343	

**Tres Marías – Discontinuidad No. 1.**

Tabla No. 52.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo

**Datos:**Área parte inferior: 109.45 cm<sup>2</sup>Área parte superior: 94.88 cm<sup>2</sup>Área promedio: 102.17 cm<sup>2</sup>

<b>Presión Manómetro (kgf/cm<sup>2</sup>):</b>			<b>40</b>		<b>80</b>		<b>120</b>		<b>160</b>		<b>200</b>	
Carga normal (kgf):			1119.19		1728.99		2338.79		2948.59		3558.39	
<b>Presión Manómetro</b>	<b>Carga de corte</b>	<b>Esfuerzo cortante</b>	<b>D. H.</b>	<b>D. V.</b>								
kg/cm <sup>2</sup>	kg	kgf/cm <sup>2</sup>	micras									
0	115.81	1.13	0	71	0	59	0	67	0	49	0	75
5	194.33	1.90	48	72	1	59	0	67	0	50	0	75
10	272.85	2.67	51	73	10	60	4	67	1	50	1	75
15	351.37	3.44	53	73	14	61	5	67	2	50	2	76
20	429.89	4.21	55	73	17	61	6	67	9	50	4	76
25	508.41	4.98	57	74	19	62	7	67	19	50	8	77
30	586.93	5.74	78	77	21	62	13	67	26	50	11	77
35	665.45	6.51	98	81	22	62	14	67	28	50	14	78
40	743.97	7.28	115	84	24	63	15	68	29	50	17	78
45	822.49	8.05	125	87	27	63	16	68	31	51	17	79
50	901.01	8.82	302	92	29	63	18	68	32	51	20	79
55	979.53	9.59	330	94	31	63	19	69	33	51	22	80
60	1058.05	10.36	478	98	38	67	20	69	34	51	24	81
70	1215.09	11.89					74	75	38	52	29	83
80	1372.13	13.43							78	58	39	85
90	1529.17	14.97							112	61	48	88
100	1686.21	16.50							184	79	63	91
110	1843.25	18.04							186	80	86	96
120	2000.29	19.58							191	81	128	104
130	2157.33	21.12							220	88	200	111



Tabla No. 53.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo

Tiempo	40	80	120	160	200
	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.
	micras				
0 seg	72	57	66	49	74
1 minuto	72	59	67	50	75
2 minuto	72	59	67	50	75
3 minuto	72	59	67	50	75
4 minuto	72	59	67	50	75
5 minuto	72	59	67	50	75
6 minuto	72	59	67	50	75
7 minuto	72	59	67	50	75
8 minuto	72	59	67	50	75
9 minuto	72	59	67	50	75
10 minuto	71	59	67	50	75

Envolvente lineal

x	y
28.861	21.116
10.955	10.356
17.906	10.760
10.955	6.583
m =	0.6009
b =	3.7736
$y = 0.601x + 3.774$	
x	y
0	3.774
35	24.805
Ángulo = 31.00°	
Cohesión = 3.774	

**Tres Marías – Discontinuidad No. 2.**

Tabla No. 54.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo

**Datos:**

Área parte inferior: 107.51 cm<sup>2</sup>  
 Área parte superior: 138.23 cm<sup>2</sup>  
 Área promedio: 122.87 cm<sup>2</sup>

<b>Presión Manómetro (kgf/cm<sup>2</sup>):</b>		<b>40</b>	<b>80</b>	<b>120</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>240</b>	<b>280</b>								
Carga normal (kgf):		1119.19	1728.99	2338.79	2948.59	3558.39	4168.19	4777.99								
<b>Presión Manómetro</b>	<b>Carga de corte</b>	<b>Esfuerzo cortante</b>	<b>D. H.</b>	<b>D. V.</b>												
kg/cm <sup>2</sup>	kg	kg/cm <sup>2</sup>	micras												micras	
0	115.81	0.94	0	14	0	23	0	22	0	25	0	49	0	38	0	31
5	194.33	1.58	6	13	9	23	2	22	1	25	0	49	0	38	0	31
10	272.85	2.22	14	13	10	23.5	8	22	7	25	1	49	2	38	1	31
15	351.37	2.86	24	15	12	24.5	10	22	11	25	2	50	8	38	2	31
20	429.89	3.50	28	15.5	14	25	11	23	13	25	3	50	10	38	4	31
25	508.41	4.14	32	16	17	26	12	23	14	25	5	51	12	38	5	32
30	586.93	4.78	37.8	17	21	27	14	24	15	26	7	51	13	38	7	32
35	665.45	5.42	43	17.5	24	28	16	24	16	26	8	52	15	39	8	32
40	743.97	6.05	51	18	30	30	18	25	18	26	10	53	16	39	9	32
45	822.49	6.69	67	19	38	32	22	26	19	26	13	54	18	40	11	33
50	901.01	7.33	103	18	47	34	24	27	21	27	16	55	19	40	13	33
55	979.53	7.97	188	16	62	36	28	28	22	27	19	57	21	40	14	33
60	1058.05	8.61	267	17.5	80	38	33	29	27	28	24	58	22	41	16	34
70	1215.09	9.89	639	16.5	125	40	46	43	29	29	42	64	26	42	22	36
80	1372.13	11.17			235	42	64	36	36	30	50	66	29	43	25	37
90	1529.17	12.45			634	44	102	40	47	43	70	70	32	44	35	39
100	1686.21	13.72					177	46	72	58	94	76	35	45	40	40
110	1843.25	15.00					361	65	192	58	158	87	45	47	62	44
120	2000.29	16.28							396	58	449	121	55	50	90	49
140	2314.37	18.84											82	55	365	79
150	2471.41	20.11											138	63		
160	2628.45	21.39											321	88		



Tabla No. 55.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo

Tiempo	40	80	120	160	200	240	280
	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.
	micras						
0 seg	15.5	23.5	22	25	48	38	34
1 minuto	15	23	22	25	49	38	32
2 minuto	15	23	22	25	49	38	31
3 minuto	15	23	22	25	49	38	31
4 minuto	14.5	23	22	25	49	38	31
5 minuto	14	23	22	25	49	38	31
6 minuto	14	23	22	25	49	38	31
7 minuto	14	23	22	25	49	38	31
8 minuto	14	23	22	25	49	38	31
9 minuto	14	23	22	25	49	38	31
10 minuto	14	23	22	25	49	38	31

Envolvente lineal

x	y
33.924	21.392
19.035	15.002
14.889	6.390
19.035	8.170
m =	0.4292
b =	6.8317
$y = 0.429x + 6.832$	
x	y
0	6.832
40	24.000
Ángulo = 23.23°	
Cohesión = 6.832	

**Tres Marías – Discontinuidad No. 3.**

Tabla No. 56.- Lecturas obtenidas del ensayo de corte directo

**Datos:**Área parte inferior: 107.51 cm<sup>2</sup>Área parte superior: 138.23 cm<sup>2</sup>Área promedio: 122.87 cm<sup>2</sup>

Presión Manómetro (kgf/cm <sup>2</sup> ):			40		80		120		160		200		240	
Carga normal (kgf):			1119.19		1728.99		2338.79		2948.59		3558.39		4168.19	
Presión Manómetro	Carga de corte	Esfuerzo cortante	D. H.	D. V.										
kg/cm <sup>2</sup>	kg	kg/cm <sup>2</sup>	micras											
0	299.89	2.44	11	26	1	76	1	104	1	164	0	176	0	181
5	377.935	3.08	57	33	10	79	5	107	2	165	1	177	1	185
10	455.98	3.71	63	36	40	86	7	110	3	166	2	178	2	194
15	534.025	4.35	70	40	49	94	14	116	5	168	3	179	5	197
20	612.07	4.98	82	47	54	96	20	120	8	170	4	180	6	203
25	690.115	5.62	98	53	61	102	26	124	10	172	6	181	9	211
30	768.16	6.25	113	59	75	108	34	128	12	173	8	182	11	225
35	846.205	6.89	165	75	95	121	44	133	16	175	11	185	15	238
40	924.25	7.52	468	133	342	179	52	137	20	179	15	187	20	245
45	1002.295	8.16					65	145	25	181	20	192	24	257
50	1080.34	8.79					212	189	29	185	26	200	28	264
55	1158.385	9.43							39	194	51	220	40	280
60	1236.43	10.06							197	280	135	286	60	321
70	1392.52	11.33							348	328	327	374	525	403



Tabla No. 57.- Lecturas de deformación vertical obtenida del ensayo de corte directo

Tiempo	40	80	120	160	200	240
	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.	D. V.
	micras					
0 seg	25	74	100	159	171	259
1 minuto	26	75	102	162	175	259
2 minuto	26	75	102	162	175	259
3 minuto	26	75	102	162.5	175	259
4 minuto	26	75	102.5	163	175.5	259
5 minuto	26	75	102.5	163	176	259
6 minuto	26	75	102.5	163	176	259
7 minuto	26	75	103	163	176	259
8 minuto	26	75	103	163.5	176	259
9 minuto	26	75	103	163.5	176	259
10 minuto	26	75	103	163.5	176	259

Envolvente lineal

x	y
23.998	11.333
9.109	7.522
14.889	3.811
9.109	2.332
m =	0.2560
b =	5.1906
$y = 0.256x + 5.191$	
x	y
0	5.191
35	14.150
Ángulo = 14.36°	
Cohesión = 5.191	



## 7.5. CRITERIO DE BARTON Y CHOUBEY.

Tabla No. 58.- Datos para el criterio de Barton y Choubey, de las discontinuidades en estudio.

Lugar	Discontinuidad	Resultados del ensayo Tilt Test		Peso específico	Lecturas con esclerómetro	
		$\phi b$	$\alpha$	$\gamma_{roca}$	r	R
La Paloma	1	31	51	0.00204	21	33
	2	33	64	0.00143	25	38
	3	32	42	0.00208	35	43
Tres Marías	4	35	60	0.00223	26	38
	5	28	57	0.00205	20	27
	6	32	48	0.00188	10	12



Tabla No. 59.- Cálculo del criterio de Barton y Choubey para las discontinuidades de la zona de La Paloma

$\sigma_n$	$\phi_b$	$\phi_r$	$\log_{10} JCS$	JCS	JCS/ $\sigma_n$	JRC	JRC	$\tau$	$\tau$	$\phi_p$	$\phi_p$	$\tau_{pico}$	$\tau_{pico}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(11)	(12)	(9)	(10)	(13)	(14)
		(2)			(1) y (5)	(3) y (6)		(1), (3), (5) y (7)	(1), (3), (5) y (8)	(3) y (7)	(3) y (8)	(1) y (9)	(1) y (10)
kgf/cm <sup>2</sup>								kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>			kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>
Discontinuidad No. 1													
1	31	23.73	1.010	10.234	10.234	27.002	16	0.903	0.836	69.630	50.927	0.566	0.779
11.51	31	23.73	1.010	10.234	0.889	-532.463	16	10.399	4.866	-881.460	50.927	46.487	8.970
17.79	31	23.73	1.010	10.234	0.575	-113.585	16	16.065	6.434	-169.367	50.927	5.093	13.857
24.06	31	23.73	1.010	10.234	0.425	-73.451	16	21.731	7.719	-101.139	50.927	-16.735	18.744
30.34	31	23.73	1.010	10.234	0.337	-57.790	16	27.397	8.800	-74.515	50.927	36.922	23.632
Discontinuidad No. 2													
1.00	33	26.16	1.010	10.234	10.234	37.466	16	2.348	0.911	89.851	53.358	-3.067	-0.049
8.44	33	26.16	1.010	10.234	1.212	452.449	16	19.818	4.393	795.321	53.358	4.590	-0.415
11.89	33	26.16	1.010	10.234	0.861	-580.732	16	27.917	5.574	-961.087	53.358	2.919	-0.585
13.04	33	26.16	1.010	10.234	0.785	-359.544	16	30.616	5.936	-585.067	53.358	-11.689	-0.642
17.64	33	26.16	1.010	10.234	0.580	-160.043	16	41.415	7.261	-245.916	53.358	-20.980	-0.868
22.24	33	26.16	1.010	10.234	0.460	-112.267	16	52.213	8.432	-164.696	53.358	-91.876	-1.095
24.54	33	26.16	1.010	10.234	0.417	-99.635	16	57.612	8.970	-143.222	53.358	85.596	-1.208
Discontinuidad No. 3													
1.00	32	28.28	1.010	10.234	10.234	13.584	9	2.291	0.764	51.372	43.579	1.998	-0.427
10.43	32	28.28	1.010	10.234	0.981	-	(9)	23.901	5.594	-	43.579	5.293	-4.450
16.11	32	28.28	1.010	10.234	0.635	-69.597	(9)	36.924	8.036	-90.035	43.579	29.493	-6.874
21.80	32	28.28	1.010	10.234	0.470	-41.788	9	49.947	10.315	-42.760	43.579	59.956	-9.299
27.48	32	28.28	1.010	10.234	0.372	-31.986	9	62.970	12.477	-26.097	43.579	-39.578	-11.724



Tabla No. 60.- Cálculo del criterio de Barton y Choubey para las discontinuidades de la zona de Tres Marias.

$\sigma_n$	$\phi_b$	$\phi_r$	$\log_{10} JCS$	JCS	JCS/ $\sigma_n$	JRC	JRC	$\tau$	$\tau$	$\phi_p$	$\phi_p$	$\tau_{pico}$	$\tau_{pico}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(11)	(12)	(9)	(10)	(13)	(14)
		(2)			(1) y (5)	(3) y (6)		(1), (3), (5) y (7)	(1), (3), (5) y (8)	(3) y (7)	(3) y (8)	(1) y (9)	(1) y (10)
kgf/cm <sup>2</sup>								kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>			kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>
Discontinuidad No. 1													
1	35	28.68	1.010	10.234	10.234	31.004	5	0.320	0.668	81.391	37.184	-0.299	-0.566
10.95	35	28.68	1.010	10.234	0.934	-1059.732	5	3.506	5.957	-1772.861	37.184	-17.156	-6.198
16.92	35	28.68	1.010	10.234	0.605	-143.362	5	5.416	8.844	-215.030	37.184	-99.334	-9.576
22.89	35	28.68	1.010	10.234	0.447	-89.566	5	7.326	11.632	-123.579	37.184	-40.506	-12.953
28.86	35	28.68	1.010	10.234	0.355	-69.550	5	9.237	14.347	-89.551	37.184	1820.009	-16.330
34.83	35	28.68	1.010	10.234	0.294	-58.875	5	11.147	17.006	-71.404	37.184	39.876	-19.707
Discontinuidad No. 2													
1.00	28	24.67	1.010	10.233	10.233	32.013	14	0.485	0.804	79.088	48.467	0.611	4.309
9.11	28	24.67	1.010	10.233	1.123	639.503	14	4.415	4.320	1111.822	48.467	-2.834	39.252
14.07	28	24.67	1.010	10.233	0.727	-233.743	14	6.821	5.895	-372.696	48.467	31.711	60.639
19.03	28	24.67	1.010	10.233	0.538	-119.963	14	9.226	7.266	-179.271	48.467	-3.855	82.026
24.00	28	24.67	1.010	10.233	0.426	-87.352	14	11.632	8.491	-123.831	48.467	-89.698	103.413
28.96	28	24.67	1.010	10.233	0.353	-71.567	14	14.037	9.601	-96.998	48.467	11.964	124.801
33.92	28	24.67	1.010	10.233	0.302	-62.122	14	16.443	10.618	-80.940	48.467	31.048	146.188
38.89	28	24.67	1.010	10.233	0.263	-55.768	14	18.848	11.555	-70.139	48.467	-63.906	167.575
Discontinuidad No. 3													
1.00	32	26.81	1.010	10.234	10.234	20.975	13	1.200	0.837	62.472	48.915	-0.376	-4.469
9.11	32	26.81	1.010	10.234	1.124	418.885	13	10.932	4.736	738.920	48.915	6.865	-40.709
14.07	32	26.81	1.010	10.234	0.727	-153.168	13	16.888	6.567	-233.571	48.915	-27.152	-62.889
19.03	32	26.81	1.010	10.234	0.538	-78.606	13	22.844	8.202	-106.815	48.915	-0.012	-85.069
24.00	32	26.81	1.010	10.234	0.426	-57.236	13	28.800	9.697	-70.487	48.915	-119.038	-107.250
28.96	32	26.81	1.010	10.234	0.353	-46.893	13	34.756	11.083	-52.904	48.915	15.947	-129.430
33.92	32	26.81	1.010	10.234	0.302	-40.704	13	40.713	12.380	-42.382	48.915	-1153.207	-151.611

