



**UNIVERSIDAD MICHOCANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CIVIL**

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

TESIS:

**“CARACTERIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO
DEL TEZONTLE PARA SU UTILIZACIÓN EN LA CAPA DE
BASE”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

Ing. Damián Martínez Vargas

Director de tesis:

Dr. Carlos Chávez Negrete

Morelia Michoacán, Enero del 2009



Resumen

El objetivo de ésta tesis es el estudio del tezontle, ya que es un material que se utiliza con mucha frecuencia en la construcción de la capa de base y demás capas del pavimento. Por lo cual, es necesario conocer el comportamiento de éste material. Por lo tanto se realizó una caracterización física y mecánica de éste material.

Se estudiaron tres materiales de tezontle y otro material triturado, con la finalidad de realizar comparaciones entre ambos.

Las pruebas índice consistieron en determinar la densidad, porosidad y resistencia de las partículas del material. Se realizaron pruebas triaxiales y de compresión simple, para conocer el comportamiento mecánico del material. Las pruebas mecánicas se realizaron para dos tipos de granulometrías (uniforme y bien graduada) y bajo dos condiciones de humedad (con 5% de humedad aproximadamente y saturando la muestra). En los diferentes procesos de prueba se analizó la rotura de partículas.

Para las pruebas mecánicas se utilizó una prensa digital con adquisición de datos. Se realizó medición de cambios de volumen, utilizando una bureta y panel de control, desarrollado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos.

Aunado a las pruebas índice y mecánicas realizadas, se determinaron los minerales presentes en los materiales, utilizando el microscopio electrónico de barrido.

Finalmente se realizó el análisis de los resultados y las respectivas conclusiones del estudio.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por darme la oportunidad de vivir y de poder cumplir con mis objetivos.

Les agradezco a mis papás, Cipriano Martínez y Fidelina Vargas por brindarme su apoyo incondicional, en la realización de mis estudios y demás proyectos. A mis hermanos Betzabe, Cipriano Adan y Jose Levy por su compañía y cariño.

Le agradezco a mi esposa Alejandra Galán Mercado por su apoyo y paciencia en la diaria convivencia.

Le agradezco al Dr. Carlos Chávez Negrete por toda la enseñanza, apoyo y paciencia brindada para realizar éste trabajo.

Al Dr. Eleazar Arreygue Rocha por los apoyos brindados para la realización de ésta tesis. A todos mis profesores, que con sus enseñanzas me ayudan ser mejor.

A los compañeros del laboratorio de Mecánica de suelos, al maestro Jaime Chora, al Ing. Antonio Hurtado, al Ing. Erick Cervantes y al Ing. Carlos Peniche.

Al Laboratorio de Materiales "Ing. Luis silva Ruelas" y a todos los que laboran en él, en especial a la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán.

DEDICATORIA

A mis papás Cipriano y Fidelina por todas sus enseñanzas y su apoyo brindado en la realización de mis estudios y todo cuanto he hecho en mi vida.

A mis hermanos, Betzabe, Cipriano y Levy a quienes quiero mucho.

A mi esposa Alejandra quien es parte esencial de mi vida.

A toda mi familia y amigos quienes son parte importante de mi vida.

Al Dr. Carlos Chávez y a todos los profesores de que han intervenido en mi formación profesional.

ÍNDICE

RESUMEN	II
Agradecimientos y Dedicatoria.....	III
Índice de Figuras.....	V
Índice de Tablas.....	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	7
ALCANCES	8
ESTUDIOS PREVIOS	9
II. CARACTERÍSTICAS CON LAS QUE DEBE CUMPLIR UN MATERIAL DE BASE Y SOLICITACIONES A LAS QUE ESTÁ SUJETA	15
II.I. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE BASE.....	17
II.I.I Material de base para colocar carpeta de concreto hidráulico	18
II.I.II Material de base para colocar carpeta asfáltica.....	20
II.II. SOLICITACIONES DE CARGA	24
II.II.I Mecanismo de deformación de un material granular.....	29
II.III. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	34
III. PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL	36
III.I. MUESTREO DE MATERIALES	37
III.II. GRANULOMETRÍA	38
III.II.I Rotura de partículas.....	40
III.III. CONTENIDO DE HUMEDAD	41
III.IV. DENSIDAD Y ABSORCIÓN	43
III.V. MASA VOLUMÉTRICA POR EL MÉTODO DE LA PARAFINA	46
III.VI. ÍNDICE DE RESISTENCIA DE CARGA PUNTUAL.....	47
III.VII. ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA PRUEBAS DE COMPRESIÓN SIMPLE Y TRIAXIALES	50
III.VIII. EQUIPO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS	55
III.IX. COMPRESIÓN SIMPLE	58
III.X. COMPRESIÓN TRIAXIAL.....	60
IV. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS	62
IV.I. PRUEBAS DEL MATERIAL 1	63
IV.I.I Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría uniforme.....	67
IV.I.II Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría bien graduada.....	70

IV.II. PRUEBAS DEL MATERIAL 2	74
IV.II.I Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría uniforme	77
IV.II.II Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría bien graduada	79
IV.III. PRUEBAS DEL MATERIAL 3	82
IV.III.I Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría uniforme	86
IV.III.II Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría bien graduada	88
IV.IV. PRUEBAS DEL MATERIAL 4	90
IV.IV.I Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría uniforme	92
IV.IV.II Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría bien graduada	94
V. CONCLUSIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	101
VI. ANEXOS	104
VI.I MINERALOGÍA DE LOS MATERIALES	105
VI.II GRANULOMETRÍAS DEL MATERIAL 1, CON GRANULOMETRÍA INICIAL UNIFORME.....	108
VI.III GRANULOMETRÍAS DEL MATERIAL 1, CON GRANULOMETRÍA INICIAL BIEN GRADUADA	110
VI.IV GRANULOMETRÍAS DEL MATERIAL 2, CON GRANULOMETRÍA INICIAL UNIFORME.....	112
VI.V GRANULOMETRÍAS DEL MATERIAL 2, CON GRANULOMETRÍA INICIAL BIEN GRADUADA	114
VI.VI GRANULOMETRÍAS DEL MATERIAL 3, CON GRANULOMETRÍA INICIAL UNIFORME.....	116
VI.VII GRANULOMETRÍAS DEL MATERIAL 3, CON GRANULOMETRÍA INICIAL BIEN GRADUADA.....	118
VI.VIII GRANULOMETRÍAS DEL MATERIAL 4, CON GRANULOMETRÍA INICIAL UNIFORME	120
VI.IX GRANULOMETRÍAS DEL MATERIAL 4, CON GRANULOMETRÍA INICIAL BIEN GRADUADA	122
VI.X CÍRCULOS DE MOHR DEL MATERIAL 1.....	124
VI.XI CÍRCULOS DE MOHR DEL MATERIAL 2.....	128
VI.XII CÍRCULOS DE MOHR DEL MATERIAL 3	132
VI.XIII CÍRCULOS DE MOHR DEL MATERIAL 4	136

Índice de Figuras

Figura II. 1 Sección estructural de un pavimento	16
Figura II.I. 1.- Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.....	19
Figura II.I.II. 1.- Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa.....	21
Figura II.I.II. 2.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para bases de pavimentos asfálticos y de pavimentos de concreto hidráulico.....	23
Figura II.II. 1.-Esfuerzos inducidos al pavimento bajo una carga en movimiento (Brown, 1996).....	25
Figura II.II. 2.-Variación de los esfuerzos con el tiempo (Brown, 1996).....	26
Figura II.II. 3.-Mediciones de esfuerzos en tramos experimentales (Brown, 1996).....	27
Figura II.II. 4.-Deformaciones medidas en tramos experimentales (Brown, 1996).....	27
Figura II.II. 5.-Tiempo de aplicación de la carga bajo una onda semisenoidal o triangular (Huang, 1993).....	28
Figura II.III. 1.-Acumulación de la deformación por el número de ciclos en materiales granulares (pt176 IMT, 2001).....	29
Figura II.III. 2.-Acumulación de deformación plástica bajo carga repetida (Brown, 1994).....	30
Figura II.III. 3.-Acumulación de deformación permanente (pt176 IMT, 2001).....	31
Figura II.III. 4.-Formación de roderas en un pavimento asfáltico (pt176 IMT, 2001).....	32
Figura II.III. 5.-Medición de deformaciones permanentes en tramo experimental (Brown, 1996).....	32
Figura II.III. 6.-Influencia del agua, drenaje y tipo de material granular en la acumulación de deformación permanente (Brown, 1996).....	33
Figura III.I. 1.-Frente de un banco de material.....	38
Figura III.II. 1.- Cribando material en el juego de mallas.....	39
Figura III.II.I. 1 Curvas granulométricas durante el proceso de prueba.....	41
Figura III.III. 1.-Secando el material en la estufa.....	42

Figura III.IV. 1.-Picnómetro y probeta graduada.....	44
Figura III.IV. 2.- Matraz con material en baño maría y bomba de vacío a la derecha.....	45
Figura III.V. 1.- Balanza con la partícula sumergida en el agua.....	47
Figura III.VI. 1.-Aparato de carga puntual.....	48
Figura III.VI. 2.-Aparato de carga puntual en la prensa universal.....	49
Figura III.VI. 3.- Determinación de dimensiones de las partículas (D5731 – 05 ASTM).....	49
Figura III.VII. 1.-Equipo para compactar.....	52
Figura III.VII. 2.-Tubo con manguera para colocar la membrana.....	43
Figura III.VII. 3.-Probeta terminada.....	54
Figura III.VII. 4.-probeta terminada para las pruebas saturadas.....	55
Figura III.VIII. 1.-Marco de carga digital.....	56
Figura III.VIII. 2.-Panel de control junto con la interface aire-agua y la bureta.....	57
Figura III.VIII. 3.-Vista del equipo para realizar las pruebas.....	58
Figura III.IX. 1.-Prueba de compresión simple.....	59
Figura III.X. 1.-Prueba triaxial en proceso.....	61
Figura IV.I. 1.-Frente del Banco “Joyitas”.....	63
Figura IV.I. 2.-Del lado izquierdo partículas muy porosas y del lado derecho partículas poco porosas.....	64
Figura IV.I. 3 Penetración de las puntas cónicas en la partícula.....	65
Figura IV.I.I. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.....	68
Figura IV.I.I. 2.-Rotura de partículas en pruebas de compresión simple y triaxiales.....	70
Figura IV.I.II. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.....	72
Figura IV.I.II. 2.-Rotura de partículas en pruebas de compresión simple y triaxiales.....	73
Figura IV.II. 1.-Frente del banco “Cerritos”.....	74
Figura IV.II. 2.-Partículas con gran cantidad de poros.....	75
Figura IV.II. 3 Penetración de las puntas cónicas en las partículas del Material 2.....	76
Figura IV.II.I. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.....	78
Figura IV.II.I. 2.-Rotura de partículas.....	79
Figura IV.II.II. 1.-curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.....	81
Figura IV.II.II. 2.-Rotura de partículas.....	82

Figura IV.III. 1.-Frente del Banco “Cerritos”.....	83
Figura IV.III. 2.-Partículas muy porosas.....	84
Figura IV.III. 3 Penetración de las puntas cónicas en las partículas del Material 3.....	85
Figura IV.III.I 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.....	87
Figura IV.III.I 2.-Rotura de partículas.....	88
Figura IV.III.II. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.....	89
Figura IV.III.II. 2.-Rotura de partículas.....	90
Figura IV.IV. 1 Material producto de trituración de roca.....	91
Figura IV.IV.I. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.....	93
Figura IV.IV.I. 2.-Rotura de partículas.....	94
Figura IV.IV.II. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.....	95
Figura IV.IV.II. 2.-Rotura de partículas.....	96
Figura VI.I. 1 Minerales presentes en el Material 1.....	105
Figura VI.I. 2 Minerales presentes en el Material 2.....	105
Figura VI.I. 3 Minerales presentes en el Material 3.....	106
Figura VI.I. 4 Minerales presentes en el Material 4.....	106
Figura VI.I. 5 Vista de la estructura de los materiales, en el microscopio electrónico de barrido.....	107
Figura VI.II. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra.....	108
Figura VI.II. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra.....	109
Figura VI.III. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra.....	110
Figura VI.III. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra.....	111
Figura VI.IV. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra.....	112
Figura VI.IV. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra.....	113
Figura VI.V. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra.....	114
Figura VI.V. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra.....	115
Figura VI.VI. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra.....	116
Figura VI.VI. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra.....	117
Figura VI.VII. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra.....	118
Figura VI.VII. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra.....	119
Figura VI.VIII. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra.....	120

Figura VI.VIII. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra.....	121
Figura VI.IX. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra.....	122
Figura VI.IX. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra.....	123
Figura VI.X. 1 Círculos de Mohr, M-1, G-bGrad.....	124
Figura VI.X. 2 Círculos de Mohr, M-1, G-bGrad-Sat.....	125
Figura VI.X. 3 Círculos de Mohr, M-1, G-Unif.....	126
Figura VI.X. 4 Círculos de Mohr, M-1, G-Unif-Sat.....	127
Figura VI.XI. 1 Círculos de Mohr, M-2, G-bGrad.....	128
Figura VI.XI. 2 Círculos de Mohr, M-2, G-bGrad-Sat.....	129
Figura VI.XI. 3 Círculos de Mohr, M-2, G-Unif.....	130
Figura VI.XI. 4 Círculos de Mohr, M-2, G-Unif-Sat.....	131
Figura VI.XII. 1 Círculos de Mohr, M-3, G-bGrad.....	132
Figura VI.XII. 2 Círculos de Mohr, M-3, G-bGrad-Sat.....	133
Figura VI.XII. 3 Círculos de Mohr, M-3, G-Unif.....	134
Figura VI.XII. 4 Círculos de Mohr, M-3, G-Unif-Sat.....	135
Figura VI.XIII. 1 Círculos de Mohr, M-4, G-bGrad.....	136
Figura VI.XIII. 2 Círculos de Mohr, M-4, G-bGrad-Sat.....	137
Figura VI.XIII. 3 Círculos de Mohr, M-4, G-Unif.....	138
Figura VI.XIII. 4 Círculos de Mohr, M-4, G-Unif-Sat.....	139

Índice de Tablas

Tabla II.I. 1.- Porcentaje de material producto de trituración de roca sana, en función del tránsito esperado.....	18
Tabla II.I.I. 1.- Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.....	18
Tabla II.I.I. 2.- Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.....	20
Tabla II.I.II. 1.- Características granulométricas de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa.....	20
Tabla II.I.II. 2.- Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos.....	22
Tabla II.I.II. 3.- Características granulométricas de los materiales para bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial.....	22
Tabla III.II. 1.-Juego de mallas.....	40
Tabla IV.I. 1.-Características físicas y mecánicas de las partículas.....	64
Tabla IV.I. 2.-Datos para formar las probetas (M-1).....	66
Tabla IV.I. 3.-Granulometrías para formar las probetas.....	66
Tabla IV.II. 1.-Características físicas y mecánicas de las partículas.....	75
Tabla IV.II. 2.-Datos para formar las probetas (M-2).....	76
Tabla IV.III. 1.-Características físicas y mecánicas de las partículas.....	84
Tabla IV.III. 2.-Datos para formar las probetas (M-3).....	85
Tabla IV.IV. 1.-Características físicas y mecánicas de las partículas.....	91
Tabla IV.IV. 2.-Datos para formar las probetas (M-4).....	92
Tabla VI.I. 1 Porcentajes de los elementos que contienen los materiales.....	107
Tabla VI.X. 1 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-1, G-bGrad.....	124
Tabla VI.X. 2 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-1, G-bGrad-Sat.....	125
Tabla VI.X. 3 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-1, G-Unif.....	126
Tabla VI.X. 4 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-1, G-Unif-Sat.....	127
Tabla VI.XI. 1 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-2, G-bGrad.....	128
Tabla VI.XI. 2 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-2, G-bGrad-Sat.....	129

Tabla VI.XI. 3 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-2, G-Unif.....	130
Tabla VI.XI. 4 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-2, G-Unif-Sat.....	131
Tabla VI.XII. 1 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-3, G-bGrad.....	132
Tabla VI.XII. 2 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-3, G-bGrad-Sat.....	133
Tabla VI.XII. 3 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-3, G-Unif.....	134
Tabla VI.XII. 4 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-3, G-Unif-Sat.....	135
Tabla VI.XIII. 1 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-4, G-bGrad.....	136
Tabla VI.XIII. 2 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-4, G-bGrad-Sat.....	137
Tabla VI.XIII. 3 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-4, G-Unif.....	138
Tabla VI.XIII. 4 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-4, G-Unif-Sat.....	139

I. Introducción

Los caminos surgieron como respuesta al impulso del hombre por alcanzar mejores condiciones de vida. La palabra camino proviene del celtolatino *camminus*, y significa tierra hollada por donde se transita habitualmente. De lo anterior se tiene un principio de definición de camino, que es: tierra pisada con tanta persistencia que permite el tránsito de un lugar a otro, sin mayores esfuerzos y sin perder el rumbo (Grupo Apasco, "DE TRAZOS E INGENIO", 2000).

Desde la antigüedad la construcción de carreteras ha sido uno de los primeros signos de civilización avanzada. Cuando las ciudades de las primeras civilizaciones empezaron a aumentar de tamaño y densidad de población, la comunicación con otras regiones se tornó necesaria para hacer llegar suministros alimenticios o transportarlos a otros consumidores. Entre los primeros constructores de carreteras se encuentran los mesopotámicos, hacia el año 3500 a.C.; los chinos que construyeron la Ruta de la Seda (la más larga del mundo), y desarrollaron un sistema de carreteras en torno al siglo XI a.C. En el siglo I d.C. el geógrafo griego Estrabón registró un sistema de carreteras que partían de la antigua Babilonia; los escritos de Herodoto, historiador griego del siglo V a.C., mencionan las vías construidas en Egipto para transportar los materiales con los que construyeron las pirámides (Biblioteca Encarta 2005).

De las carreteras aún existentes, las más antiguas fueron construidas por los romanos. La Vía Apia empezó a construirse alrededor del 312 a.C. Las calzadas romanas tenían un espesor de 90 a 120 cm y estaban compuestas por tres capas de piedras argamasadas cada vez más finas, con una capa de bloques de piedras encajadas en la parte superior (Biblioteca Encarta 2005).

Durante las tres primeras décadas del siglo XIX, dos ingenieros británicos, Thomas Telford y John Loudon McAdam, y un ingeniero de caminos francés, Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet, perfeccionaron los métodos y técnicas de construcción de carreteras. El sistema de Telford implicaba cavar una zanja e instalar cimientos de roca pesada. Los cimientos se levantaban en el centro para que la carretera se inclinara hacia los bordes permitiendo el desagüe. La parte superior de la carretera consistía en una capa de 15 cm de piedra quebrada compacta (Biblioteca Encarta 2005).

McAdam mantenía que la tierra bien drenada soportaría cualquier carga. En el método de construcción de carreteras de McAdam, la capa final de piedra quebrada se colocaba directamente sobre un cimiento de tierra que se elevaba del terreno circundante para asegurarse de que el cimiento desaguaba. El sistema de McAdam, llamado "macadamización", se adoptó en casi todas partes, sobre todo en Europa. Sin embargo, los cimientos de tierra de las carreteras macadamizadas no pudieron soportar los camiones pesados que se utilizaron en la I Guerra Mundial. Como resultado, para construir carreteras de carga pesada se adoptó el sistema de Telford (Biblioteca Encarta 2005).

La popularidad de la bicicleta, que comenzó en la década de 1880, y la introducción del automóvil una década más tarde, llevó a la necesidad de tener más y mejores carreteras. El considerable aumento del tráfico de automóviles durante la siguiente década demostró la ineficacia de los viejos métodos de pavimentación. Durante la I Guerra Mundial, la construcción de carreteras incluía el drenaje del subsuelo, una cimentación adecuada, una base de hormigón y una capa superficial adicional de hormigón o pavimento bituminoso para soportar el repentino aumento del tráfico pesado (Biblioteca Encarta 2005).

Para cualquier país una de las principales fuentes de desarrollo es su infraestructura carretera, esto es debido a que se conectan los grandes centros de población y las zonas industriales, a su vez proporcionan al campo una vía comercial para los productos agrícolas y ganaderos. Debido a la importancia que tienen las carreteras para cada país, es importante construirlas con la calidad debida, pues el éxito en el transporte de bienes o servicios depende en gran medida de la situación del viaje en su medio principal de traslado, así como el de las carreteras.

La estructura de la carretera está formada por un conjunto de capas sensiblemente horizontales, de diferentes espesores y calidades, las cuales soportan de manera adecuada las cargas y permiten la circulación de vehículos de manera rápida, cómoda y segura, permaneciendo sus características a lo largo del tiempo, con un mantenimiento adecuado.

Los aspectos a tomar en cuenta para el diseño de pavimentos son la calidad de los materiales, la magnitud y frecuencia del tráfico y el clima (Apuntes de Diseño de Pavimentos, MIT, FIC, UMSNH). Y con un diseño correcto construir caminos adecuados para ser transitados.

Sin embargo, la situación física de las carreteras en México, es sin duda alguna, inadecuada para el paso constante de automóviles, transporte de pasajeros o de carga.

Los daños que presentan los pavimentos son en general, gran cantidad de baches, deformaciones, así como poca durabilidad. Lo que ocasiona un costo elevado de mantenimiento, demora en el traslado de mercancías de los centros de producción a los centros de consumo, daños en los vehículos, congestionamiento y pérdida de tiempo, así como gran cantidad de accidentes.

La situación física de la red carretera se ha visto rebasada por los cambios constantes que ha tenido, considerando que la carga aplicada al pavimento es mayor a la prevista, lo que provoca un desgaste considerable en el mismo, aunado a esto, se encuentran los factores climatológicos, los materiales usados en la construcción o mantenimiento de las redes carreteras y la inadecuada conducta de los transeúntes al tirar basura o derramar sustancias. Si en 1950 la carretera más importante de México podía tener 5 ó 6,000 vehículos diarios, de los que un 10% eran camiones de carga; hoy es posible contemplar en la red básica mexicana carreteras con 3 ó 4 veces mayor número de vehículos, además de que la proporción de vehículos de carga aumentó grandemente, hasta niveles de 30 ó 40% del tránsito diario (Rico R. A., 1998).

El mal estado de las carreteras incide en los costos de operación del transportista, ya que una carretera dañada hace que el camión tarde más en su recorrido y la unidad se perjudique en llantas, suspensión y caja de velocidad, entre otros.

El problema de los pavimentos dañados es algo que nos afecta a todos, ya que debemos trasladarnos a los lugares de trabajo o recreación, además se requiere el movimiento de mercancías, y si las vías de comunicación no están en buen estado no podremos hacerlo adecuadamente.

Algunas de las causas por las que se dañan los pavimentos son la falta de conocimiento de los materiales, utilización de materiales inadecuados, negligencia al momento de construirlos, falta de un adecuado control de calidad, así como las condiciones climatológicas.

Para la construcción de la estructura de pavimento se utilizan materiales granulares, los cuales son extraídos de bancos de material, o bien, producto de la trituración de rocas.

Debido a que la región de Morelia se encuentra sobre el eje neovolcánico, cuenta con gran cantidad de depósitos de materiales volcánicos, entre los cuales está el llamado "tezontle" o escoria volcánica. Debido a que existe gran cantidad de éste material, se utiliza mucho para la construcción de capas de pavimento, sin embargo, se dice que es un material inadecuado para tal fin, ya que es muy poroso, además se cree que es causante de daños en los pavimentos. Así mismo en la norma de la SCT se menciona que para la conformación de la capa de base, se debe utilizar material producto de la trituración de roca sana.

Por lo antes mencionado y debido a que no se han realizado estudios acerca de este material, es importante conocer sus características físicas y mecánicas, por lo que en éste trabajo de tesis se realizará una caracterización física y mecánica de las partículas de "tezontle" en forma individual y del conjunto. Por lo tanto se realizarán pruebas índice a las partículas y pruebas de compresión simple y triaxiales, utilizando dos granulometrías, una uniforme y otra bien graduada, la cual cumple para un material de base, y probadas bajo dos condiciones de humedad.

OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es el estudio del tezontle, ya que es un material muy usado en la construcción de capas granulares de pavimentos y además no se cuenta con información acerca de su comportamiento. Debido a ello, se realizarán diferentes pruebas que nos ayudarán a definir sus características físicas y mecánicas.

Para este trabajo se utilizarán tres materiales de tezontle y un material triturado, en cada uno de los cuales se determinará la resistencia de las partículas en forma individual, así como caracterizar el material para ser utilizado en capa de base.

Para determinar su comportamiento mecánico se realizarán pruebas triaxiales, utilizando dos tipos de granulometrías, una uniforme y otra bien graduada, dichas pruebas se realizarán bajo dos condiciones de humedad, con bajo contenido de humedad y saturando la muestra. Lo anterior para comparar su comportamiento con diferente granulometría y humedad, así como comparar el comportamiento del tezontle con el material triturado. Lo cual nos ayudará a tener un mayor conocimiento acerca del comportamiento de los materiales granulares, lo que nos ayudará a mejorar el diseño de pavimentos, así como su construcción.

ALCANCES

Los alcances de esta tesis son los siguientes:

En primer lugar, tener un conocimiento más amplio y con bases acerca del comportamiento del tezontle. Conocer si en realidad el tezontle tiene baja resistencia y es causante de los daños en los pavimentos, también se desea determinar la granulometría con la cual tiene un mejor comportamiento mecánico y determinar si es adecuado para su utilización en la capa de base. Al compararlo con el material triturado, estar en condiciones de decir las ventajas y desventajas de utilizar uno u otro material. Y por último dar a conocer los resultados obtenidos de dicha investigación.

ESTUDIOS PREVIOS

El tezontle es un material que se ha estudiado muy poco, por lo que es difícil encontrar bibliografía que hable acerca del comportamiento de éste material.

De los estudios que se han realizado se encuentra un artículo que trata acerca de la obtención de la densidad de la partícula de la escoria volcánica por medio del picnómetro (Tamari S., 2005).

De lo que se puede encontrar más información es acerca del comportamiento de materiales granulares diferentes al tezontle, como se menciona más adelante.

Las propiedades mecánicas de una masa granular dependen de la forma y rugosidad de las partículas y de la composición granulométrica, además de otros parámetros.

Solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del material; la experiencia indica que los suelos gruesos bien graduados tienen un comportamiento ingenieril más favorable, entendiendo como suelo bien graduado, aquél que posee una amplia gama de tamaños.

En los suelos gruesos, el comportamiento mecánico e hidráulico está principalmente definido por la compacidad de los granos y su orientación, características que se destruyen, al realizarse la prueba de granulometría.

Los suelos granulares son moderadamente compresibles bajo altas presiones, y la compresión y deformación que sufren está acompañada por el rompimiento de las partículas del suelo.

Como un primer intento para entender la compresibilidad de las arenas Terzaghi (1925, citado por Chávez C. 1996), realizó pruebas de compresión confinada en suelos arenosos y arcillosos donde observó que la compresibilidad de los suelos fue similar; haciendo notar que los cambios de volumen en la arena no fueron tan grandes como los que ocurrieron en la arcilla para una misma magnitud de carga.

Terzaghi y Peck (1948, citado por Chávez C., 1996) ensayaron arenas sujetas a pruebas de consolidación unidimensional en las que concluyeron que los asentamientos presentados eran similares a los observados en algunas arcillas. Por primera ocasión fue observado el rompimiento de partículas, el cual explicaba la alta compresibilidad de las arenas sujetas a presiones elevadas. La deformación no fue instantánea y continuaba sobre un considerable periodo de tiempo.

Roberts y de Souza (1958, citado por Chávez C., 1996) probaron diferentes arenas y *observaron que las arenas angulosas se rompían y comprimían más que las arenas redondeadas bajo presiones moderadamente bajas*. Por otro lado, bajo presiones muy elevadas se observaron pequeñas diferencias en el comportamiento de suelos angulares y redondeados. Se concluyó también que un suelo graduado uniformemente presentaba más rotura que un suelo bien graduado.

En la realización de pruebas triaxiales drenadas en arenas de grano medio (Vésic y Barksdale, 1963, citado por lee y Farhoomand, 1967) en un amplio rango de presiones de confinamiento hasta un máximo de 700 kg/cm^2 , se *concluyó que el rompimiento de partículas se incrementa con el aumento de la presión confinante*.

Hall y Gordon (1963, citado por Chávez C., 1996) realizaron pruebas triaxiales drenadas en suelos granulares con tamaños de partícula hasta de 3" de diámetro y presiones de confinamiento máximas de 45 kg/cm² y observaron que durante el ensaye existe un gran rompimiento de partículas especialmente durante la etapa de corte, *observándose más rompimiento en un suelo uniforme.*

Marsal (1966) reportó los resultados de pruebas triaxiales en gravas gruesas y el rompimiento de fragmentos de roca hasta de 20 cm usando una cámara triaxial de 1.13 m de diámetro y una altura de 2.5 m, y con presiones de confinamiento máximas de 25 kg/cm². Los resultados a los que llegó Marsal muestran que la rotura de partículas está íntimamente ligada a la naturaleza del suelo, es decir, la resistencia de los granos y origen geológico. *El material grueso se comprime y se rompe más que el material fino,* y el material con partículas frágiles muestra mayor cantidad de compresión y rompimiento de partículas.

Ensayes triaxiales realizados a una arena de Ottawa (arena muy redondeada) indican que son mucho menos compresibles y más resistentes al rompimiento que las arenas finas subangulares a subredondeadas.

Estado Actual del Conocimiento Karimov (1972, citado por Chávez C., 1996) ha puesto de manifiesto que puede establecerse una buena correlación entre la capacidad de absorción de agua de la roca y la resistencia obtenida al impacto, deduciendo que los materiales de balasto procedentes de rocas de mayor resistencia poseen índices de capacidad de absorción de agua menores.

Entre los parámetros básicos utilizados para definir la forma de las partículas están: lo deleznable y forma aplanada de éstas, elongación, esfericidad, redondez y angularidad. Lo aplanado se refiere a la relación

del espesor de la partícula en relación a su ancho (dimensión promedio) y la elongación se refiere a la relación largo a ancho, la esfericidad se refiere a que tanto la forma de la partícula se parece a una esfera, finalmente, la redondez o su inverso, la angularidad, es una medición de lo puntiagudo de sus filos o esquinas de una partícula individual.

Selig y Roner (1987) realizaron pruebas en agregados con distintas formas de partícula. En la forma plana variaron la orientación de las partículas con orientaciones aleatorias y orientadas, dicha orientación varió de 0, 45 y 65 grados a partir de la horizontal. Se observó que los especímenes de partículas planas con orientación aleatoria tienen una resistencia que es significativamente más grande que la resistencia de especímenes con forma de partícula no aplanada con una relación de vacíos similar. Los especímenes con las partículas orientadas horizontalmente tuvieron la resistencia más grande de todos. *La desventaja de incrementar las partículas planas se refleja en el incremento de la abrasión, incrementándose la rotura, por lo tanto, se incrementa la deformación permanente acumulada bajo carga repetida y decrece la rigidez.*

Kjellman y Jacobson (citado por Chávez C. 1996) mostraron la influencia desfavorable de las formas extremadamente planas en la deformación plástica, en relación a la forma cúbica. Dunn y Bora (1972, citado por Selig y Roner, 1987) realizaron pruebas en un agregado de caliza triturado en un dispositivo triaxial especial y utilizando tamaños de partícula de 4.8 a 38 mm y con un porcentaje de partículas planas que varió de 0 a 100% del espécimen. *Cualquier porcentaje de partículas planas incrementó la resistencia al corte, pero los resultados se inclinan a que el rango de 25% al 75% de partículas planas es mejor que el 100%.*

En un estudio europeo (1970, citado por Chávez C. 1996) el módulo de elasticidad se calculó tomando como base las pruebas de carga sobre especímenes de balasto confinados por anillos de acero. *El módulo de elasticidad del balasto con partículas planas resultó menor que para el balasto con partículas equidimensionales.*

Lee y Farhoomand (1967) realizaron pruebas triaxiales en gravas y arenas, las cuales eran subredondeadas y angulosas. Concluyeron que *las partículas angulosas se comprimen y se rompen más que las subredondeadas* (Chávez C. 1996).

En resumen, las formas angulosas, aplanadas y la rugosidad de las partículas incrementan la resistencia al esfuerzo cortante pero aumentan la deformabilidad de la masa granular.

Cuando un material granular grueso se ensaya a niveles de esfuerzo de intermedio a elevado, uno de los aspectos más sobresalientes que se produce es la rotura de granos. Este fenómeno genera cambios en la composición granulométrica, afectando las propiedades mecánicas del material y, sobre todo, su compresibilidad.

Los factores que afectan a la rotura de granos, además del nivel de esfuerzos aplicado son:

- a) Heterogeneidad (composición mineralógica).
- b) Defectos (fisuras).
- c) Resistencia a la tensión de la roca.
- d) Concentración de esfuerzos en los contactos.

En las capas de base y sub-base de pavimentos de materiales granulares son muy usados. Es conocido que el cambio de humedad

altera las propiedades mecánicas de estas capas. El módulo de resiliencia disminuye en la medida que el contenido de humedad aumenta. Así mismo, las deformaciones permanentes se incrementan de una manera significativa cuando aumenta el contenido de humedad (Chávez C. 1996).

En los estudios clásicos donde se estudia la influencia de la humedad en el comportamiento de los materiales se ensayan dos condiciones de humedad: la saturada y la no saturada.

El material no saturado se ensaya con un contenido de humedad correspondiente a la humedad relativa del ambiente donde se utilizará el material. Nobari y Duncan realizaron dos ensayos triaxiales drenados, donde se observa la diferencia que existe en el comportamiento de materiales granulares saturados y secos. En estos resultados se observa claramente que la resistencia al corte del material seco es mayor que la del material saturado; así mismo la dilatancia es mayor en el material seco (Chávez C. 1996).

Lo anterior son sólo algunos de los estudios realizados en materiales granulares, pero evidentemente falta mucho más que trabajar en el estudio de materiales como el tezontle.

II. Características con las que debe cumplir un material de Base y solicitaciones a las que está sujeta

La estructura del pavimento (ver Figura II. 1) está formada por las terracerías (terraplén, subyacente y subrasante), la capa de sub-base, base y carpeta asfáltica o de concreto hidráulico.

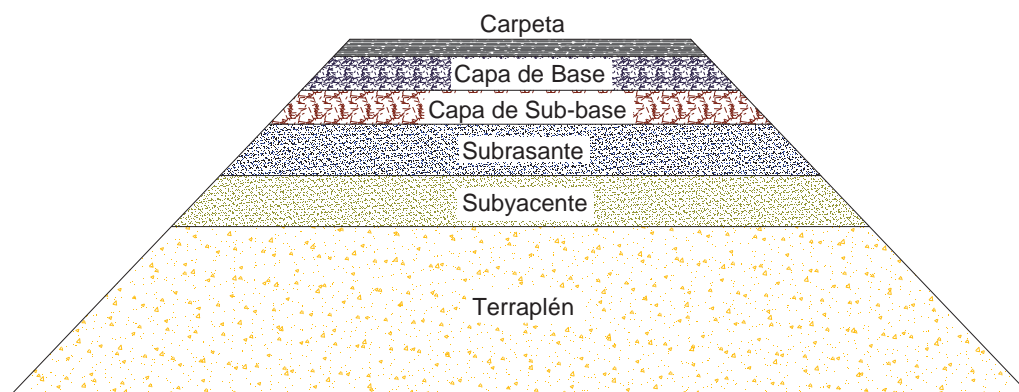


Figura II. 1 Sección estructural de un pavimento

La base se construye sobre la sub-base o la subrasante, y sus funciones (Bustamante O. F., 1996) son las siguientes:

- Formar una capa de apoyo para recibir y resistir las cargas del tránsito a través de la capa que constituye la superficie de rodamiento (carpeta asfáltica o losa de concreto hidráulico).
- Transmitir estas cargas, adecuadamente distribuidas, a las terracerías.
- Impedir que la humedad de las terracerías ascienda por capilaridad.
- En caso de introducirse agua por la parte superior, permitir que el líquido descienda hasta la capa subrasante, donde se desaloja al exterior.

II.I. Características del material de base

Los materiales granulares que se utilizan en la construcción de bases hidráulicas, se mencionan en la Norma N-CMT-4-02-002-04 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), y de acuerdo a ella, según el tratamiento que recibieron, pueden ser:

1. Materiales cribados. Son las arenas, gravas y limos, así como las rocas alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria. Si contienen entre 5 – 25% de partículas mayores de 3" y no más de 25% que pase la malla No. 200, requerirán de un tratamiento de cribado, para satisfacer la composición granulométrica.
2. Materiales parcialmente triturados. Son los poco o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al extraerlos quedan sueltos o pueden ser disgregados, que contienen de 25 – 75% de partículas mayores de 3", requieren de un tratamiento mecánico de trituración parcial y cribado, para satisfacer la composición granulométrica.
3. Materiales totalmente triturados. Son los materiales extraídos de un banco o pepenados, que requieren un tratamiento mecánico de trituración total y cribado, para satisfacer la composición granulométrica.
4. Materiales mezclados. Son los que se obtienen mediante la mezcla de dos o más de los materiales mencionados

anteriormente, en las proporciones necesarias para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en esta Norma.

En la Normativa de la SCT se mencionan los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales para construcción de bases para pavimentos asfálticos o de concreto hidráulico.

En la Tabla II.I. 1 se indican los porcentajes de material producto de trituración de roca sana requeridos para bases, en función del tránsito esperado durante la vida útil del pavimento.

Tabla II.I. 1.- Porcentaje de material producto de trituración de roca sana, en función del tránsito esperado.

	Tránsito esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL), ejes equivalentes acumulados de 8.2 ton		
% material producto de la trituración de roca sana	>10 millones	1 – 10 millones	<1 millón
	100	75 mín	50 mín

II.I.I Material de base para colocar carpeta de concreto hidráulico

El material que se utilice para la construcción de la base, cuando después de ésta se coloque una carpeta de concreto hidráulico, debe cumplir con las características granulométricas que se establecen en la Tabla II.I.I. 1, y en la Figura II.I.I. 1 se muestra la zona granulométrica recomendable.

Tabla II.I.I. 1.- Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
37.5	1 ½"	100
25	1"	70 – 100
19	¾"	60 – 100
9.5	3/8"	40 – 100
4.75	No. 4	30 – 80
2	No. 10	21 – 60
0.85	No. 20	13 – 44
0.425	No. 40	8 – 31
0.25	No. 60	5 – 23
0.15	No. 100	3 – 17
0.075	No. 200	0 – 10

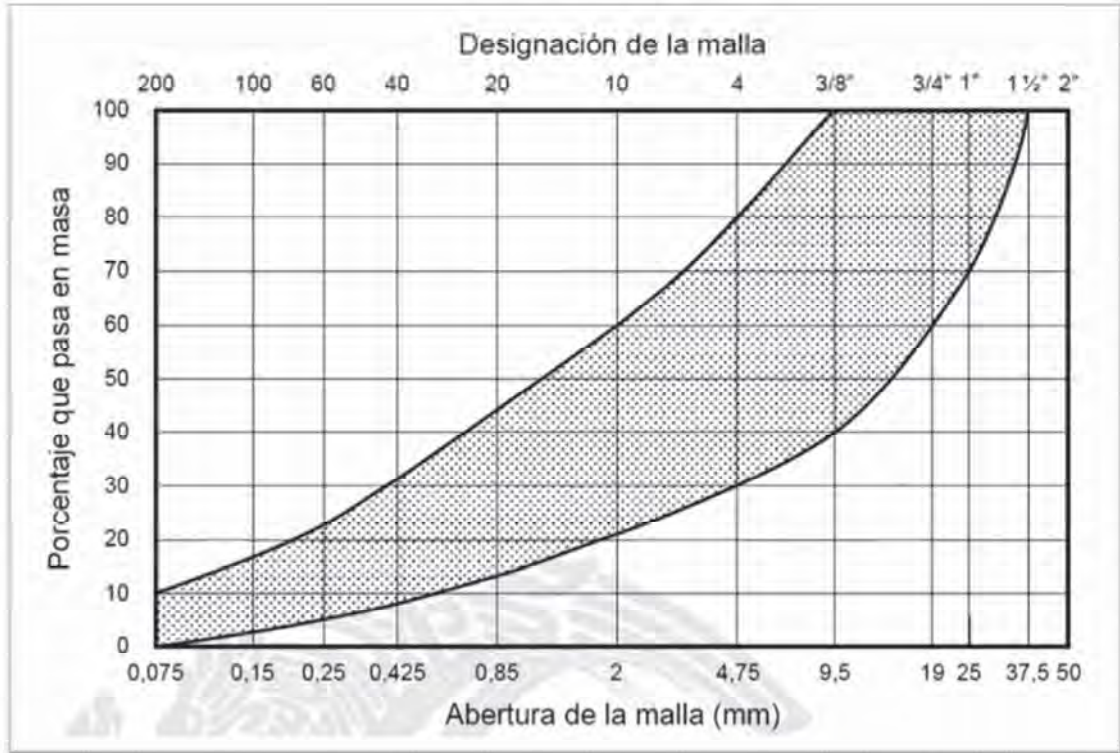


Figura II.I.I. 1.- Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.

En la Tabla II.I.I. 2 se indican los requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.

Tabla II.I.I. 2.- Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.

Característica	Valor %
Límite líquido, máximo	25
Índice plástico, máximo	6
Equivalente de arena, mínimo	40
Valor Soporte de California (CBR), mínimo	80
Desgaste Los Ángeles, máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40
Grado de compactación, mínimo	100

II.I.II Material de base para colocar carpeta asfáltica

Cuando inmediatamente después de la construcción de la base se coloque una carpeta de mezcla asfáltica de granulometría densa, el material para la base tendrá las características granulométricas que se indican en la Tabla II.I.II. 1 y se muestran en la Figura II.I.II. 1.

Tabla II.I.II. 1.- Características granulométricas de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa.

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
37.5	1 ½"	100	100
25	1"	70 – 100	70 – 100
19	¾"	60 – 100	60 – 86
9.5	3/8"	40 – 100	40 – 65
4.75	No. 4	30 – 80	30 – 50
2	No. 10	21 – 60	21 – 36
0.85	No. 20	13 – 44	13 – 25
0.425	No. 40	8 – 31	8 – 17
0.25	No. 60	5 – 23	5 – 12
0.15	No. 100	3 – 17	3 – 9
0.075	No. 200	0 – 10	0 – 5

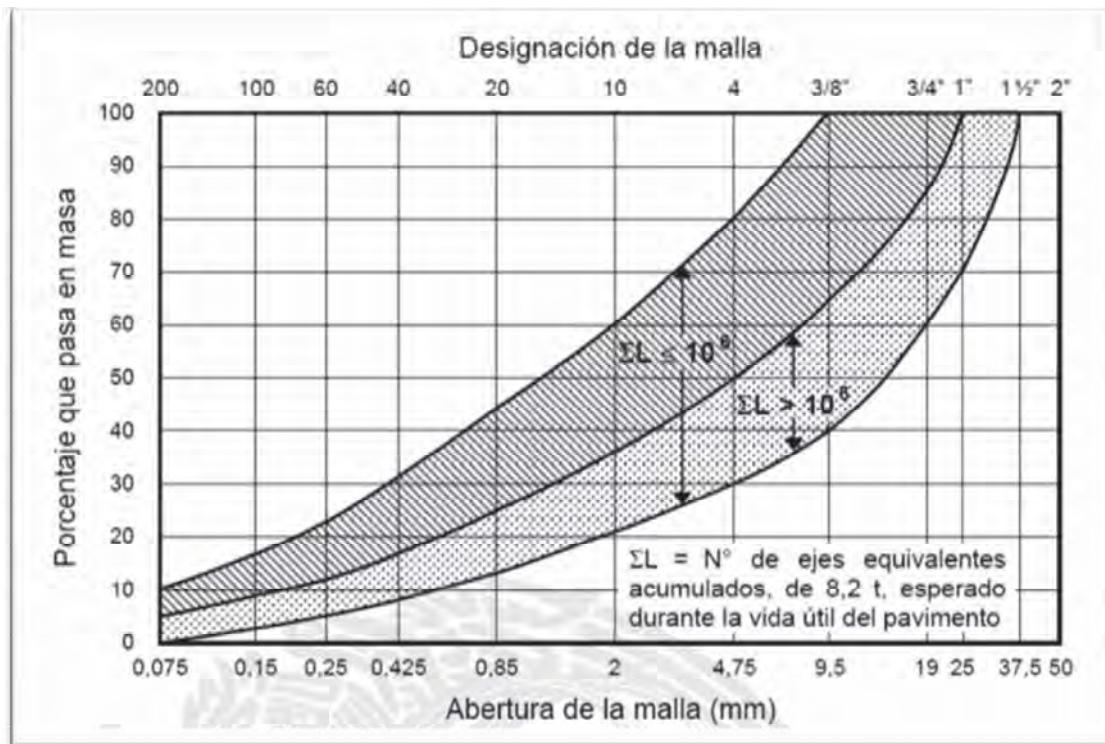


Figura II.I.II. 1.- Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa.

En la

Tabla II.I.II. 2 se indican los requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa.

Tabla II.I.II. 2.- Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos.

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
Límite líquido, máximo	25	25
Índice plástico, máximo	6	6
Equivalente de arena, mínimo	40	50
Valor Soporte de California (CBR), mínimo	80	100
Desgaste Los Ángeles, máximo	35	30

Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40	35
Grado de compactación, mínimo	100	100

Cuando la base es cubierta únicamente con un tratamiento asfáltico superficial, el material para la base debe cumplir con las características granulométricas que se indican en la Tabla II.I.II. 3 y se muestran en la Figura II.I.II. 2.

Tabla II.I.II. 3.- Características granulométricas de los materiales para bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial.

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
37.5	1 ½"	100	100
25	1"	100	70 – 100
19	¾"	60 – 100	60 – 85
9.5	3/8"	40 – 83	40 – 65
4.75	No. 4	30 – 67	30 – 50
2	No. 10	21 – 50	21 – 36
0.85	No. 20	13 – 37	13 – 25
0.425	No. 40	8 – 28	8 – 17
0.25	No. 60	5 – 22	5 – 12
0.15	No. 100	3 – 17	3 – 9
0.075	No. 200	0 – 10	0 – 5

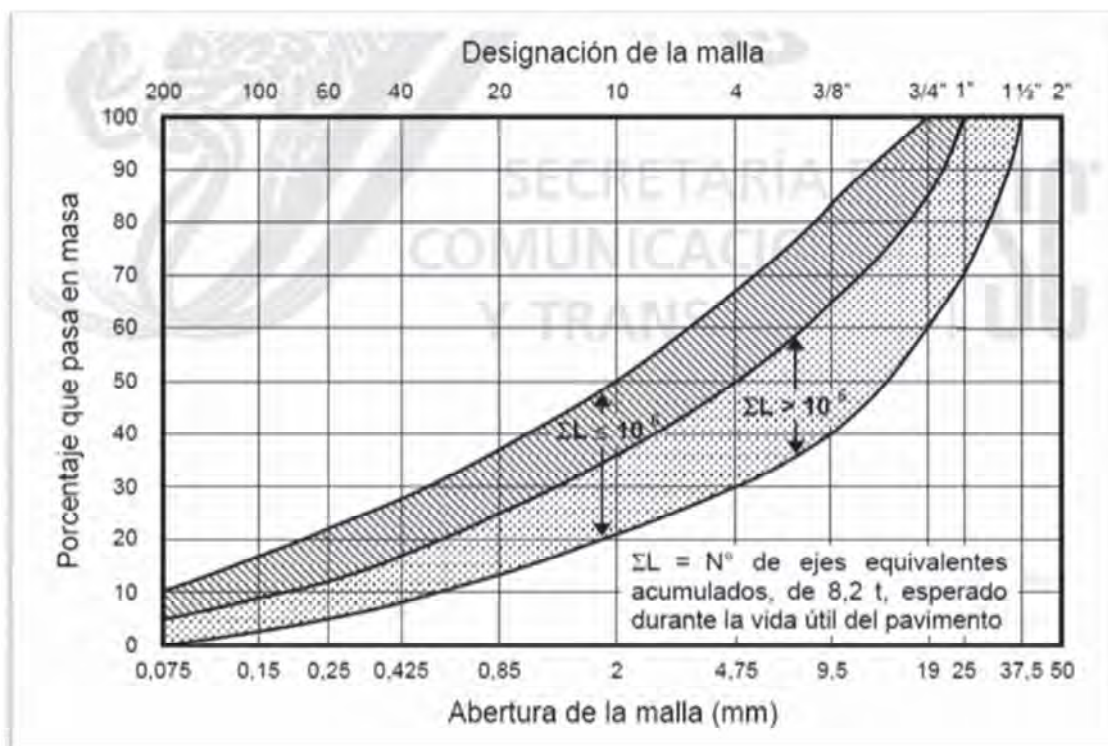


Figura II.I.II. 2.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para bases de pavimentos asfálticos y de pavimentos de concreto hidráulico.

La curva granulométrica del material por emplear debe tener una forma semejante a la de las curvas mostradas en Figura II.I.I. 1, Figura II.I.II. 1 y Figura II.I.II. 2, sin cambios bruscos de pendiente. La relación entre el porcentaje en masa que pase la malla No. 200 al que pase la malla No. 40 no será mayor de 0.65.

Cuando la granulometría del material obtenido de un banco no cumpla con los requisitos establecidos en la Norma, se podrá mezclar con otros materiales, en la proporción adecuada para que cumpla dichos requisitos, en ningún caso es aceptable mezclar con materiales finos que agreguen plasticidad a la mezcla.

II.II. Solicitaciones de carga

Los materiales que constituyen los pavimentos, así como el terreno natural, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes.

El patrón de esfuerzos aplicados a un pavimento por el paso de vehículos es muy complejo, ya que se aplican pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes, los cuales son transitorios y cambian con el tiempo conforme la carga avanza. Además los esfuerzos cortantes cambian de sentido conforme la carga pasa, lo que provoca una rotación de los ejes de esfuerzos principales.

Se puede hacer una consideración en cuanto a los cambios de magnitud en el tiempo, debido al esfuerzo que inducen los vehículos al pavimento: cuando la rueda del vehículo se encuentre alejada del punto considerado, el esfuerzo en dicho punto es el provocado por el peso del material; a medida que el vehículo se acerca, el esfuerzo se incrementa hasta llegar a un máximo en el momento en que está sobre el punto considerado; a medida que se aleja, el esfuerzo disminuye hasta desaparecer (ver Figura II.II. 1).

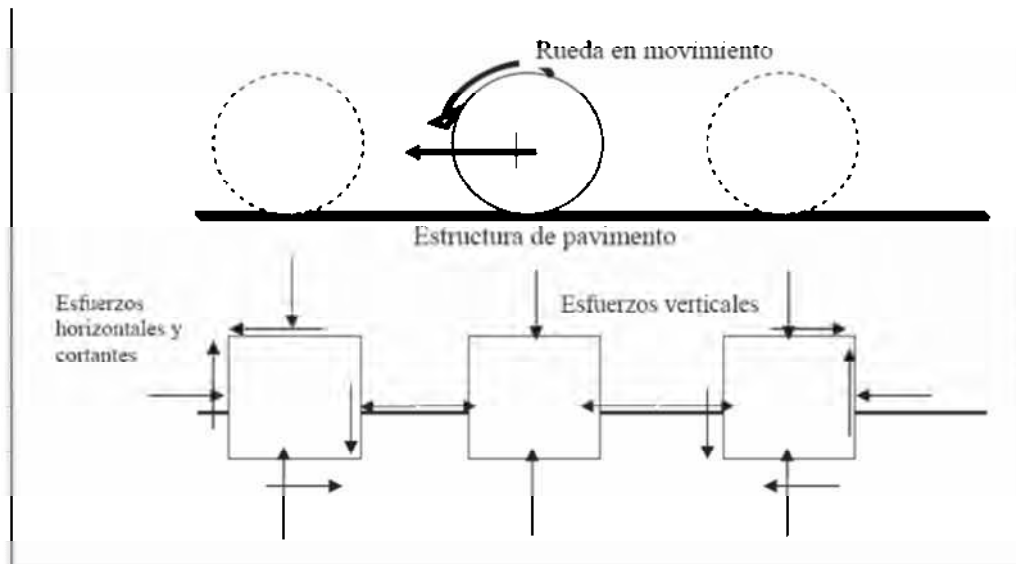


Figura II.II. 1.-Esfuerzos inducidos al pavimento bajo una carga en movimiento (Brown, 1996)

En la Figura II.II. 2 se observa que el esfuerzo cortante aumenta conforme la rueda avanza, hasta llegar a un valor máximo, decreciendo

hasta llegar a cero en el momento en que el esfuerzo vertical es máximo e incrementarse nuevamente pero con signo contrario hasta llegar a un máximo y luego disminuir llegando a cero, describiendo una onda senoidal completa. También se muestran los esfuerzos horizontales inducidos al suelo, por las cargas aplicadas. Este proceso se repite de manera cíclica por el paso de las cargas vehiculares.

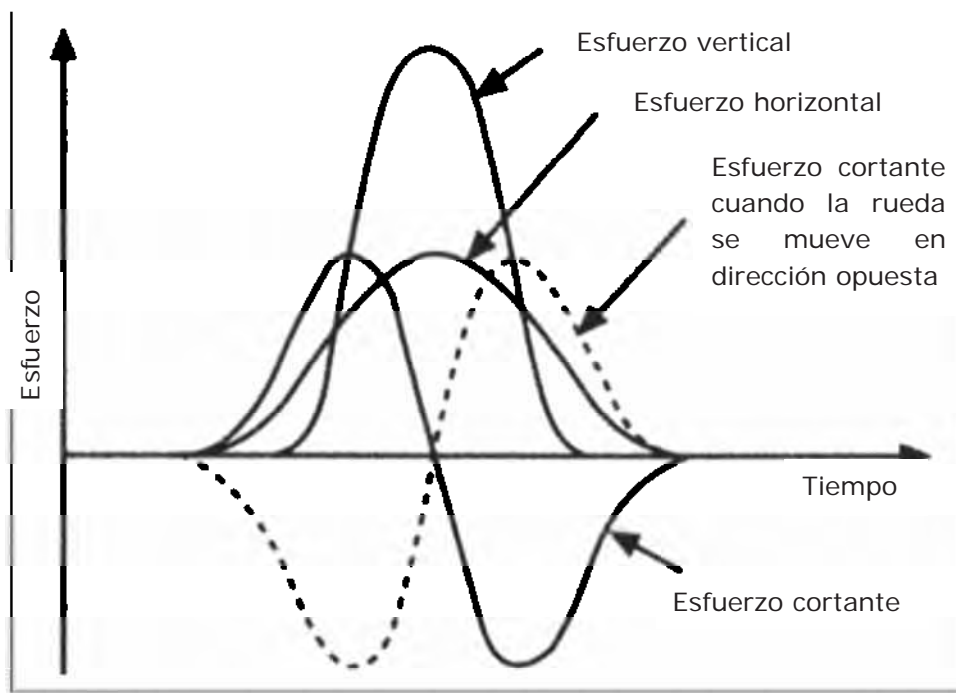


Figura II.II. 2.-Variación de los esfuerzos con el tiempo (Brown, 1996)

Con el fin de tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que se aplican a los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizados varios trabajos experimentales tanto a escala natural como en muestras probadas en el laboratorio, obteniéndose mucha información del comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales.

Brown, 1996, obtuvo gráficas de esfuerzo y deformaciones como resultado de la instrumentación de una estructura de pavimento a la cual se le aplicó carga repetida por medio del paso de un tractocamión.

En la Figura II.II. 3 y Figura II.II. 4 se muestran las mediciones de esfuerzos y deformaciones, en los cuales se observa cómo se incrementan al acercarse al punto de medición y decrecen al alejarse del mismo. Estos esfuerzos y deformaciones dependen de varios factores como son la magnitud de la carga aplicada y las características de los materiales que conforman el pavimento.

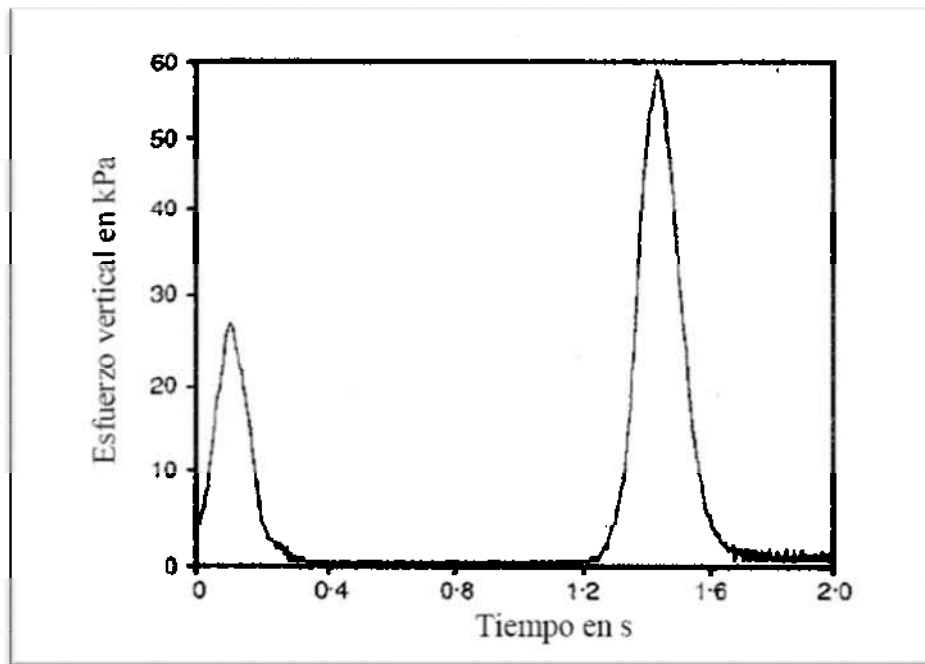


Figura II.II. 3.-Mediciones de esfuerzos en tramos experimentales (Brown, 1996)

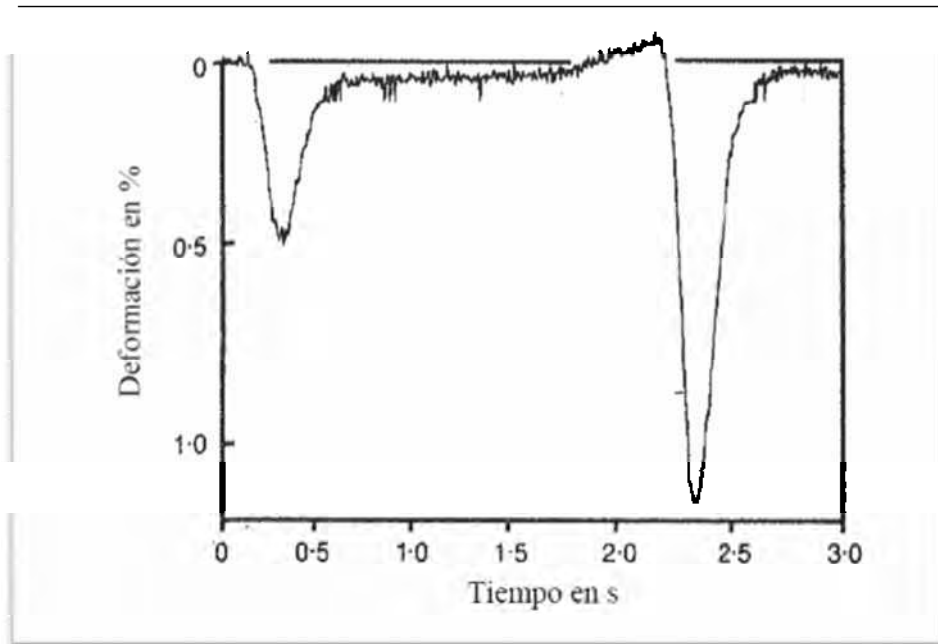


Figura II.II. 4.-Deformaciones medidas en tramos experimentales (Brown, 1996)

En base en las investigaciones realizadas se puede suponer que los pulsos de esfuerzo que una rueda de carga induce al pavimento se acercan a una función de tipo senoidal o triangular, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto de medición.

Barksdale (citado en Huang, 1993) investigó los pulsos de esfuerzo vertical en diferentes puntos dentro de una estructura de pavimento flexible, encontrando que el tiempo de duración del pulso de carga se puede relacionar con la velocidad del vehículo y la profundidad del punto considerado.

En la Figura II.II. 5 se observa como la duración del pulso de carga se incrementa al disminuir la velocidad del vehículo, así como al incrementarse la profundidad del punto de medición.

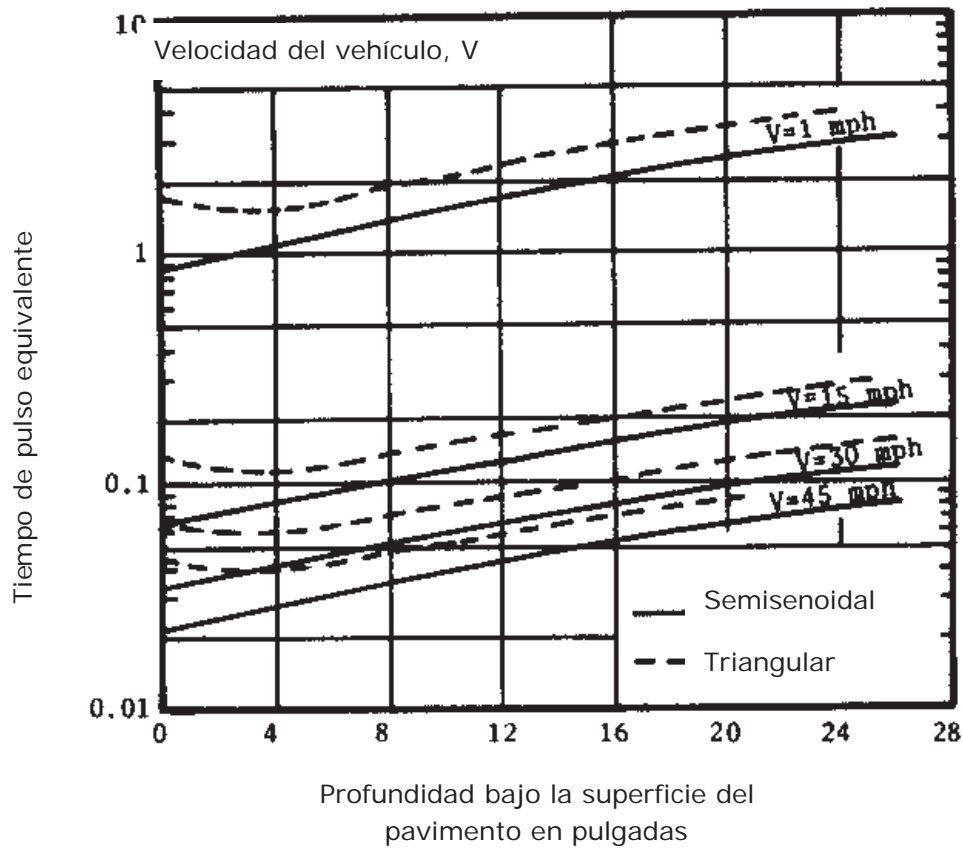


Figura II.II. 5.-Tiempo de aplicación de la carga bajo una onda semisenoidal o triangular (Huang, 1993)

II.II.I Mecanismo de deformación de un material granular

Un material granular que está sujeto a carga cíclica, experimenta una deformación cuya magnitud depende de factores como el nivel de la carga aplicada, área de contacto, condiciones de confinamiento, características del propio material, etc. La deformación total, tiene dos componentes: la deformación recuperable o elástica, medible una vez que la carga deja de actuar sobre el material; la otra denominada deformación permanente (pt176 IMT, 2001). Lo anterior se ve en la Figura II.II.I. 1.

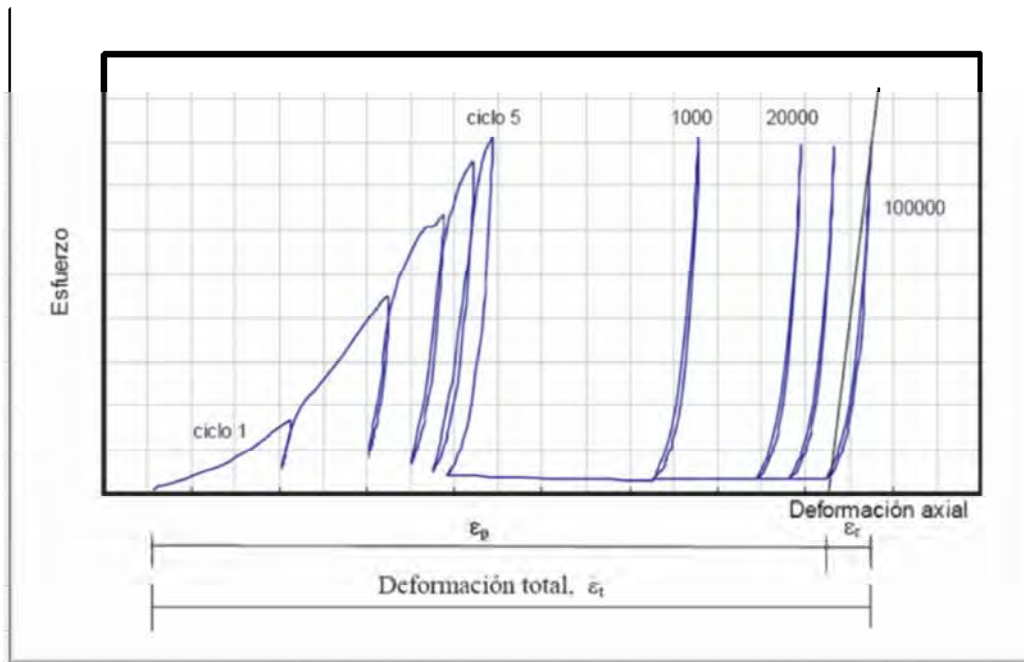


Figura II.II.I. 1.-Acumulación de la deformación por el número de ciclos en materiales granulares (pt176 IMT, 2001)

Se sabe que la mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos ya que experimentan alguna deformación permanente después de la aplicación de una carga. Aunque si la carga es pequeña comparada con la resistencia del material y se repite gran número de veces, la deformación por cada aplicación de carga es casi totalmente recuperable y proporcional a la magnitud de la carga, considerándose elástica.

En los primeros ciclos de carga la deformación es considerable, al incrementarse las repeticiones la deformación plástica decrece. Después de algunos miles de repeticiones de carga la deformación es casi totalmente recuperable, llegando a una condición de equilibrio, siempre y cuando el esfuerzo desviador no sea muy grande como para llevar la muestra a la falla.

En la Figura II.II.I. 2 se observa como para un esfuerzo desviador muy alto, la velocidad de acumulación de la deformación plástica se incrementa llevando al espécimen de prueba a la falla.

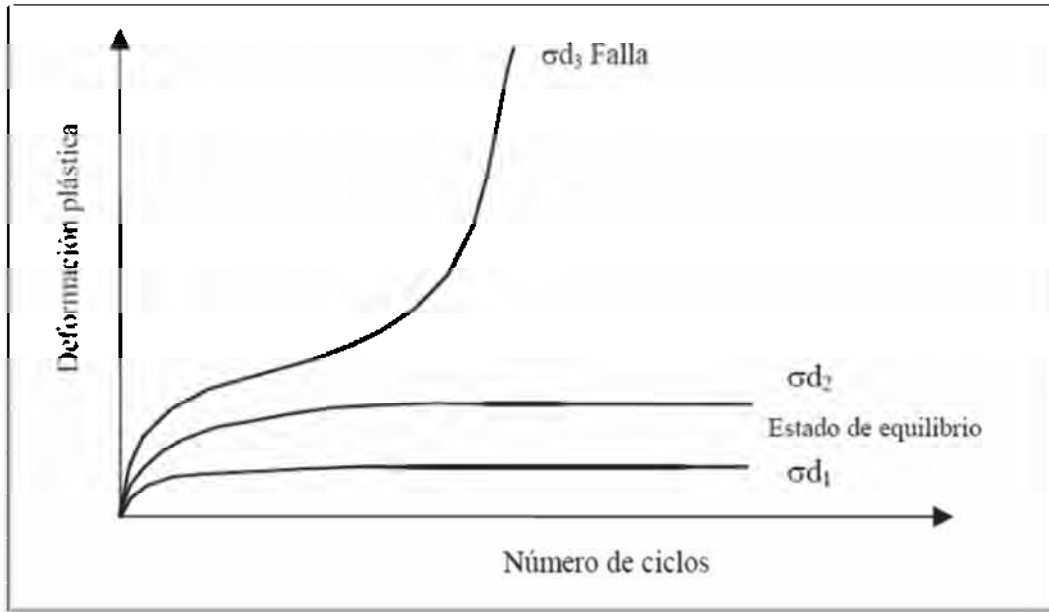


Figura II.II.I. 2.-Acumulación de deformación plástica bajo carga repetida (Brown, 1994)

En la Figura II.II.I. 3 se muestra el proceso de acumulación de la deformación permanente para un material granular sujeto a carga cíclica, al aumentar el número de ciclos, para un esfuerzo de magnitud constante.

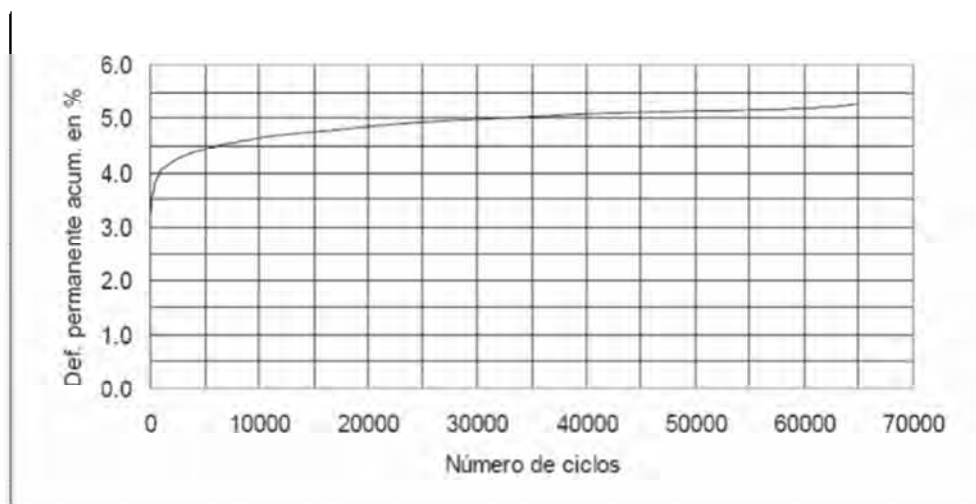


Figura II.II.I. 3.-Acumulación de deformación permanente (pt176 IMT, 2001)

En la Figura anterior se observa que la acumulación de la deformación permanente presenta tres fases: la primera es casi instantánea, se presenta

en las primeras decenas de repeticiones de carga, produciéndose aproximadamente el 70% de la deformación total. Enseguida se presenta una fase transitoria en la que la deformación se acumula gradualmente durante los primeros miles de ciclos de carga. La última es una fase estable en la que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña y la deformación permanente se aproxima a su valor máximo.

Uno de los factores más importantes en la caracterización de los materiales para pavimentación es la deformación permanente que experimentan debido a la repetición de cargas, ya que en muchos casos los pavimentos llegan a su falla debido al grado de deformación que han sufrido, llegando a niveles de rechazo.

La formación de roderas es una de las formas de deterioro de los pavimentos flexibles, las cuales generan acumulación de deformación permanente en la superficie que puede transmitirse a las capas inferiores, como se observa en la Figura II.II.I. 4.

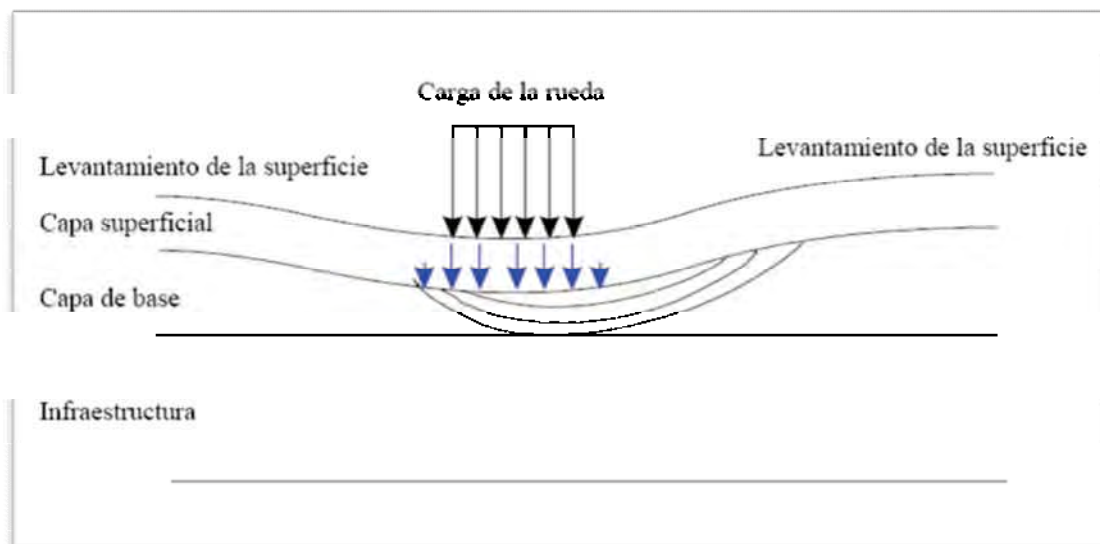


Figura II.II.I. 4.-Formación de roderas en un pavimento asfáltico (pt176 IMT, 2001)

En la Figura II.II.I. 5 se muestran mediciones de deformación realizadas a lo largo de 4 años, en las diferentes capas de un pavimento asfáltico (Brown, 1996).

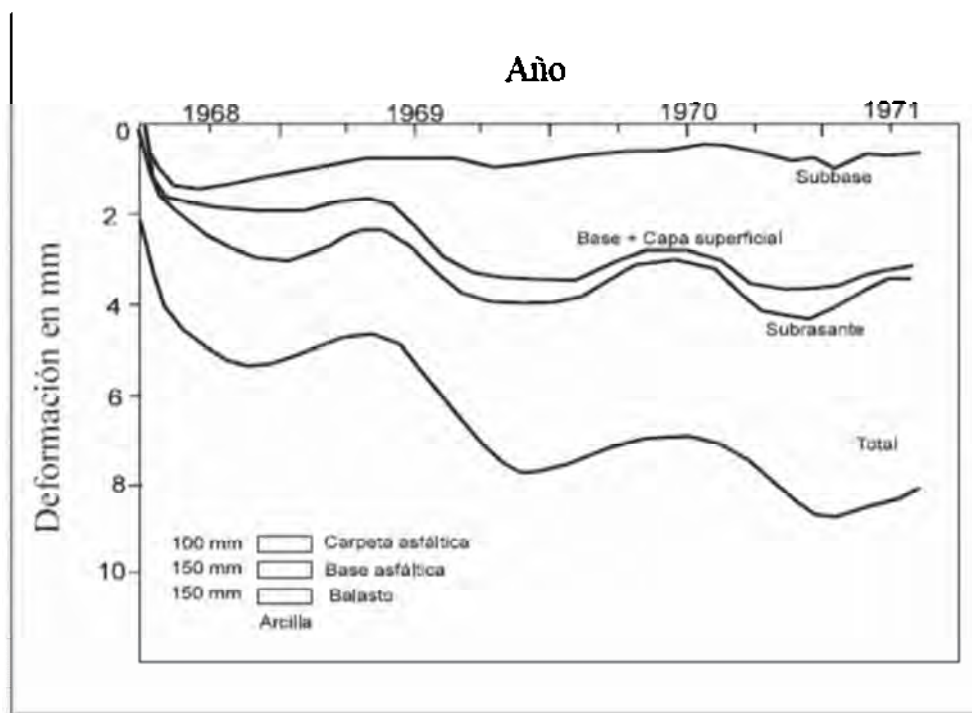


Figura II.II.I. 5.-Medición de deformaciones permanentes en tramo experimental (Brown, 1996)

Brown (1996), señala que en pavimentos con capas asfálticas gruesas, las deformaciones permanentes se generan en dichas capas, mientras que en el caso de pavimentos con capas asfálticas delgadas, la mayor parte de las deformaciones permanentes se generan en las capas granulares y la subrasante.

Brown (1996), en uno de los experimentos realizados midió la acumulación de deformación permanente de 4 materiales granulares de calidad diferente, a los cuales, en el proceso de aplicación de las cargas, se les inyectó agua, controlando las condiciones de drenaje para conocer la influencia de un buen drenaje en el comportamiento de los materiales.

En la Figura II.II.I. 6 se observa la ventaja de utilizar un material granular de buena calidad como el G1, que corresponde a una roca triturada. Además se muestra mediante líneas punteadas la influencia positiva de un drenaje efectivo.

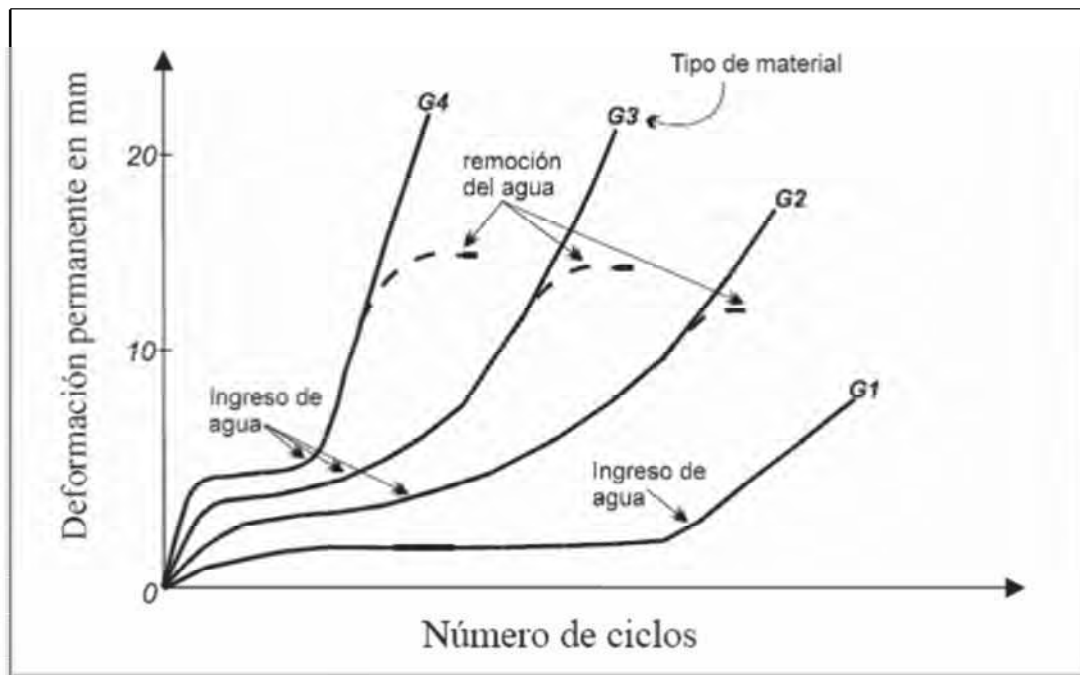


Figura II.II.I. 6.-Influencia del agua, drenaje y tipo de material granular en la acumulación de deformación permanente (Brown, 1996)

II.III. Conclusiones del capítulo

Las capas que componen la estructura del pavimento se realizan con materiales granulares, las cuales deben cumplir con ciertas características de calidad, entre las cuales está el tipo de material y la granulometría.

De las capas del pavimento, la que debe cumplir con una mayor calidad, es la capa de base, ya que dicha capa debe soportar mayores presiones de carga.

Debido a lo anterior en la normativa de la SCT, se menciona que el material utilizado para conformar la capa de base, debe ser un material producto de la trituración de roca sana, además de que la granulometría debe ser bien graduada.

Los materiales que forman el pavimento están sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes.

Los esfuerzos que se transmiten al pavimento, debido al paso de los vehículos, varía dependiendo del tiempo de aplicación de la carga, así como de la profundidad.

Para conocer más acerca de la naturaleza cíclica de las cargas que se aplican a los materiales que forman el pavimento, se han realizado experimentos en laboratorio, así como a escala natural, obteniendo mucha información del comportamiento de los materiales.

En base en las investigaciones realizadas se puede suponer que los pulsos de esfuerzo que una rueda de carga induce al pavimento se acercan a una función de tipo senoidal o triangular, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto de medición.

Uno de los factores más importantes en la caracterización de los materiales para pavimentación es la deformación permanente que experimentan debido a la repetición de cargas, ya que en muchos casos los pavimentos llegan a su falla debido al grado de deformación que han sufrido, llegando a niveles de rechazo.

Brown, 1996, realizó experimentos de deformación en cuatro materiales granulares de calidad diferente, controlando las condiciones de drenaje, encontrando que el material de mejor calidad (material producto de trituración de roca) presentó menor deformación y al ingresar el agua, la deformación no fue tan grande como en los materiales de menor calidad.

Tanto en la normativa de la SCT como en las investigaciones realizadas por Brown, los materiales que se recomiendan para conformar la estructura del pavimento, son triturados.

III. Planteamiento del programa experimental

Para este trabajo se analizarán tres materiales de tezontle y un material producto de trituración de roca sana. Tanto los materiales de tezontle como el material triturado provienen de la región de Morelia.

Los materiales en estudio se clasificarán en Material 1 (M-1), Material 2 (M-2), Material 3 (M-3) y Material 4 (M-4), siendo los tres primeros materiales de tezontle y el cuarto el material triturado.

Cada uno de los materiales, será sometido a diferentes ensayos, en los cuales se hará una caracterización de las partículas en forma individual, para conocer sus propiedades físicas y mecánicas. Una vez realizado lo anterior, se procederá a analizar el material en conjunto para conocer sus propiedades mecánicas y comportamiento mecánico.

Para analizar el material en conjunto, se realizarán probetas para ensayarlas en pruebas de compresión simple y pruebas triaxiales. Para las pruebas se utilizarán dos granulometrías, una bien graduada correspondiente a un material de base y otra uniforme, además que se ensayarán bajo dos condiciones de humedad. También se analizará la rotura de partículas, tanto después del proceso de compactación, como después de la prueba. Los resultados del tezontle se compararán con el material triturado, así como analizar el comportamiento con cada una de las granulometrías y condiciones de humedad.

Enseguida se describen cada una de las pruebas a las que fueron sometidos los materiales en estudio.

III.I. Muestreo de Materiales

De acuerdo a la Norma M-MMP-1-01-03 de la Secretaría de comunicaciones y Transportes (SCT), el muestreo consiste en obtener una

porción representativa del material con el que se pretende construir una terracería o del material que ya forma parte de ella. El muestreo además incluye las operaciones de envase, identificación y transporte de las muestras.

Procedimiento: la obtención de las muestras de material de tezontle se realizó del frente de un banco (Figura III.I. 1), tomando material de todos los tamaños, desde gravas a finos. Se tomaron dos muestras de material de 40 kg aproximadamente, de cada uno de los materiales.



Figura III.I. 1.-Frente de un banco de material

En el muestreo se buscó obtener tezontle con diferentes porosidades, para posteriormente realizar comparaciones en su comportamiento mecánico.

III.II. Granulometría

De acuerdo a la Norma M-MMP-1-06-03 de la SCT, la prueba de granulometría permite determinar la composición por tamaños de las partículas que integran los materiales empleados para terracerías, mediante

su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo (ver Figura III.II. 1), para posteriormente obtener la masa retenida en cada malla, calcular su porcentaje respecto al total y determinar el porcentaje en masa que pasa por cada una de las mallas.



Figura III.II. 1.- Cribando material en el juego de mallas

Procedimiento: las muestras de cada uno de los materiales en estudio (M-1, M-2, M-3 y M-4), se cribaron por una serie de mallas, las cuales se muestran en la

Tabla III.II. 1, con la finalidad de obtener muestras de cada uno de los tamaños. La malla de mayor abertura que se utilizó fue la de $\frac{1}{2}$ " , esto debido a que el tamaño máximo de partícula que se puede utilizar es de un sexto del diámetro de la probeta para prueba triaxial (D4767 – 04 ASTM), y esta malla cumple con esa restricción.

Eliminado

Tabla III.II. 1.-Juego de mallas

Fracción	Malla	
	Designación	Abertura nominal (mm)
Grava	½"	12.5
	3/8"	9.5
	¼"	6.3
	No. 4	4.75
Arena con finos	No. 10	2.0
	No. 20	0.85
	No. 40	0.425
	No. 60	0.25
	No. 100	0.15
	No.200	0.075

Cabe mencionar que la granulometría de un material influye en su comportamiento mecánico, por lo que en este trabajo se analizarán dos tipos de granulometrías, realizando probetas para ser probadas en pruebas de compresión simple y pruebas triaxiales.

La formación de las probetas se realizará utilizando granulometría uniforme, que será de material que pasa la malla de 3/8" y se retiene en la malla de ¼". Y también utilizando granulometría bien graduada, que tendrá desde tamaños de partícula que pasen la malla de ½", pasando por todos los tamaños, hasta partículas que pasen la malla No. 200.

III.II.I Rotura de partículas

Marsal en 1965 desarrolló un índice de rotura de granos, resultado de sus estudios en el diseño y construcción de presas de tierra y enrocamiento,

llevando a cabo pruebas triaxiales a gran escala, en las cuales notó gran rompimiento de partículas (CFE, 1980).

Para determinar este índice de rotura de granos, se determinan las curvas granulométricas, inicial (1), después de compactar (2) y después de la prueba triaxial (3), como se muestra en la Figura III.II.I. 1. Las diferencias en el porcentaje retenido, representan en cada fracción, la fragmentación producida. Algunas de esas diferencias son positivas y otras negativas. Como medida de la rotura de partículas, B, se adoptó la suma de los valores positivos.

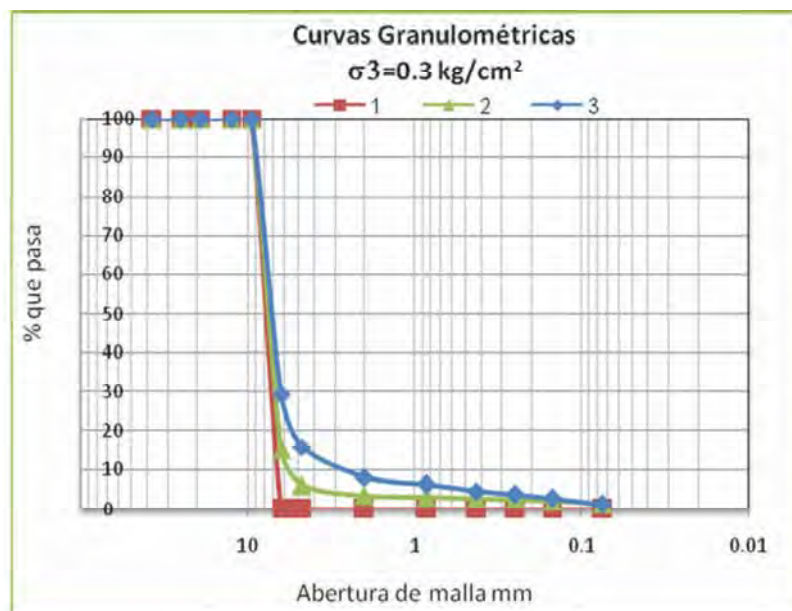


Figura III.II.I. 1 Curvas granulométricas durante el proceso de prueba

Se obtiene el parámetro B entre las granulometrías 1 y 2, así como entre 2 y 3, de cada prueba realizada.

III.III. Contenido de humedad

El procedimiento de prueba descrito en la Norma M-MMP-1-04-03 de la SCT, permite determinar el contenido de agua en los materiales para

terracerías, el cual da una idea cualitativa de su consistencia o de su probable comportamiento. La prueba consiste en secar una muestra de material en el horno y determinar el porcentaje de la masa del agua, con relación a la masa de los sólidos.

Procedimiento: la prueba consiste en obtener una muestra del material húmedo, secarlo en el horno, obtener su peso seco y determinar el porcentaje de la masa del agua, con relación a la masa de los sólidos. También se puede realizar de forma más rápida, utilizando una fuente de calor para secar el material húmedo (ver Figura III.III. 1).



Figura III.III. 1.-Secando el material en la estufa

Así como la granulometría influye en el comportamiento mecánico de los materiales, igualmente lo hace el contenido de humedad, y para observar lo anterior se variarán las condiciones de humedad, tanto en las pruebas de compresión simple como en las triaxiales. Las pruebas se realizarán utilizando un bajo contenido de humedad y saturando la muestra.

III.IV. Densidad y Absorción

De acuerdo a la Norma M-MMP-1-05-03 de la SCT, estas pruebas permiten determinar las relaciones masa-volumen de los materiales, respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción de los materiales. La densidad relativa del suelo se refiere a la relación entre la masa del suelo seco y el volumen del suelo. La densidad relativa de sólidos es un número abstracto que representa la relación entre la masa volumétrica de la fase sólida del material a la temperatura del lugar, y la masa volumétrica del agua a 4°C. La absorción del material es la masa del agua o líquido que penetra en los espacios entre las partículas de un suelo y en las oquedades de las partículas gruesas, cuando se le deja sumergido en agua, durante 24 horas y se expresa en por ciento con relación a la masa de sólidos del material.

Procedimiento: se toma una porción del material retenido en la malla No. 4 y se satura durante 24 hr., posteriormente se seca el material superficialmente con la ayuda de una franela, se obtiene su peso húmedo (Ph), enseguida se coloca en el picnómetro (ver Figura III.IV. 1), el cual está lleno de agua, el agua que sale del picnómetro al colocar el material se capta en una probeta graduada, donde se determina el volumen desalojado (V), realizado lo anterior se retira el material del picnómetro y se coloca en una charola para secarlo en la estufa y obtener el peso seco (Ps).

Con los valores del volumen y pesos obtenidos se procede a calcular lo siguiente:

$$\text{Densidad del material (gr/ml)} = \frac{P_s}{V} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100 \quad \text{Ec. 2}$$



Figura III.IV. 1.-Pícnómetro y probeta graduada

Si la absorción de un material es alta así también será su porosidad, ya que entre más poros tenga el material mayor será la cantidad de agua que pueda absorber. Igualmente si la densidad del material aumenta, también lo hará su resistencia.

Para obtener el valor de la densidad relativa de sólidos (S_s), se obtiene una porción de material que pase la malla No. 40 y se seca en el horno durante 24 hrs. Se retira el material del horno, se deja enfriar y se toma una muestra de 50 gr (W_s) que se coloca en el matraz, previamente calibrado, con la ayuda de un embudo, se le agrega agua aproximadamente a la mitad de su capacidad y se coloca en baño maría durante 10 minutos

(ver Figura III.IV. 2). Pasado ese tiempo se retira el matraz y con la ayuda de una bomba de vacío se succiona el aire, realizado lo anterior, se agrega agua hasta la marca de aforo del matraz, se seca el exterior y el interior del cuello y se pesa (W_{fsw}). Enseguida se toma la temperatura con un termómetro y se entra en la curva de calibración del matraz para obtener el valor de W_{fw} .



Figura III.IV. 2.- Matraz con material en baño maría y bomba de vacío a la derecha

Finalmente se aplica una fórmula para obtener la densidad relativa de sólidos. Dicho procedimiento se realiza por duplicado y si la diferencia entre ambos es menor o igual al 2%, se obtiene un promedio, de lo contrario se realiza otra prueba hasta que se cumpla lo anterior.

$$S_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}} \quad \text{Ec. 3}$$

III.V. Masa volumétrica por el método de la parafina

De acuerdo a la Norma M-MMP-1-08-03 de la SCT, esta prueba permite determinar la masa volumétrica del material. Esta masa volumétrica es la que corresponde a la condición que tienen los materiales, y en general, es la que se refiere al terreno natural sin haber sido removido. En este caso se les realiza a las partículas de tezontle.

Procedimiento:

- se sujeta con un hilo la partícula de tezontle y se determina su masa (W_m),
- se toma el espécimen por un extremo y se sumerge brevemente en la parafina fluidificada cuantas veces sea necesario para formar una capa delgada alrededor de la partícula,
- se determina el peso de la partícula cubierta de parafina (W_{mp}),
- mediante el hilo se suspende el espécimen en la balanza, de tal forma que quede sumergido en el agua del vaso colocado sobre el soporte de la balanza (ver Figura III.V. 1),
- se determina el peso sumergido en el agua del espécimen cubierto de parafina (W'_{mp}),
- se repite el procedimiento para otros especímenes.
- se calcula el volumen de la parafina, utilizando su masa volumétrica

$$(\gamma_p), \quad V_p = \frac{W_{mp} - W_m}{\gamma_p} \quad \text{Ec. 4}$$

- se calcula el volumen de cada uno de los especímenes sin parafina

$$V_m = V_{mp} - V_p \quad \text{Ec. 3}; \quad V_{mp} = \frac{W_{mp} - W'_{mp}}{\gamma_o} \quad \text{Ec. 5}$$

- se calcula la masa volumétrica de cada uno de los especímenes

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad \text{Ec. 6}$$



Figura III.V. 1.- Balanza con la partícula sumergida en el agua

Los datos que se obtienen en ésta prueba y el valor de la densidad relativa de sólidos servirán para determinar la porosidad de las partículas de tezontle. Ayudados de la prueba de Índice de carga puntual se verá la influencia de la porosidad en la resistencia de las partículas.

III.VI. Índice de resistencia de carga puntual

De acuerdo a la Norma D 5731-05 de la ASTM, esta prueba es una medida para la determinación de la resistencia de la roca, así como estimar la resistencia de la roca en la prueba de compresión sin confinar. Dicha prueba consiste en colocar partículas en el aparato de carga puntual (ver Figura III.VI. 1), apoyadas en dos piezas cónicas, para después aplicarles

carga por medio de un gato hidráulico hasta llevarlas a la falla, dicha presión es registrada en un manómetro.

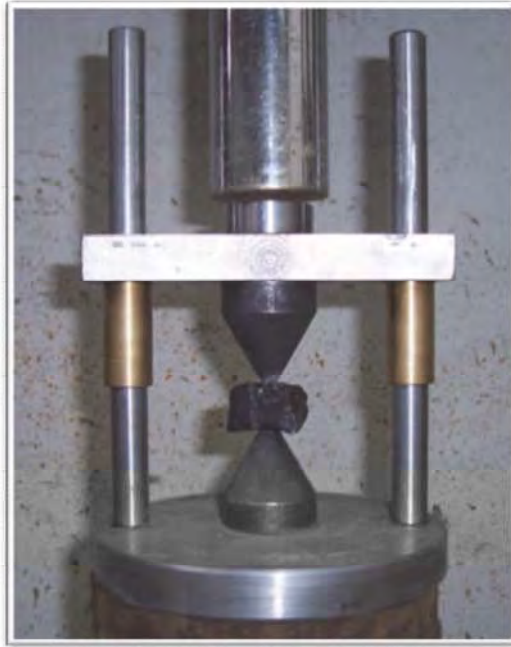


Figura III.VI. 1.-Aparato de carga puntual

El aparato de carga puntual se coloca en una prensa universal, la cual cuenta con un gato hidráulico y manómetros para medir la presión (ver Figura III.VI. 2).



Figura III.VI. 2.-Aparato de carga puntual en la prensa universal

Esta prueba se aplica tanto a partículas regulares como irregulares, que tengan una dimensión entre 30 mm a 85 mm. Cuando se trata de partículas irregulares se determinan su sección transversal promedio y espesor, para estimar su área y determinar un diámetro equivalente (ver Figura III.VI. 3).

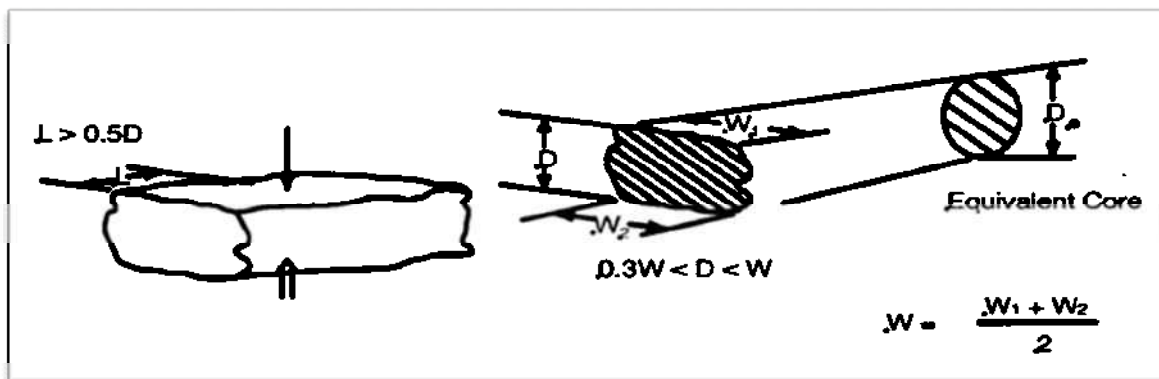


Figura III.VI. 3.- Determinación de dimensiones de las partículas (D5731 – 05 ASTM)

Procedimiento: primeramente se realiza la selección de las partículas que serán probadas, posteriormente se miden sus dimensiones (ver Figura III.VI. 3), y se colocan en el aparato de carga puntual, se toma la distancia entre las dos puntas cónicas que hacen contacto con la partícula y se procede a aplicar carga hasta la falla (P). Utilizando la ecuación de calibración del manómetro, se transforma en carga el esfuerzo registrado. De la fórmula para obtener el área de un círculo, $A = \frac{\pi D^2}{4}$, se despeja el diámetro, el cual será un diámetro equivalente, $D_e^2 = \frac{4A}{\pi}$, el área resulta de multiplicar el diámetro de la partícula por el ancho promedio (W). Mediante la fórmula para el Índice de Carga Puntual, obtenemos la resistencia de la roca:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad \text{Ec. 7}$$

Los datos obtenidos del índice de carga puntual servirán para hacer observaciones acerca de la resistencia de la roca con respecto a su porosidad.

III.VII. Elaboración de probetas para pruebas de compresión simple y triaxiales

Para la elaboración de las probetas es muy importante considerar el peso específico de las partículas, el cual se obtuvo por el método de la parafina, para poder determinar la cantidad de material requerido para formarlas.

Un dato muy importante para la formación de las probetas será el volumen de partícula, el cual será el mismo para todas. Tomando como base el Material 1, se elabora una probeta y se determina el peso específico de

muestra (γ_m), el cual junto con los datos de peso específico de partícula y las dimensiones de la probeta, servirán para obtener las cantidades de material y volumen de partícula necesarios para formar las probetas.

Se obtiene la cantidad de material seco necesario para formar las probetas del Material 1.

$$Wp1 = \gamma_m * V_m \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$Wp1$: peso de las partículas 1

γ_m : peso específico de la muestra

V_m : volumen de la muestra o probeta

Con el valor de $Wp1$ se procede a calcular el volumen de las partículas 1, que será el mismo para los otros materiales.

$$Vp1 = \frac{Wp1}{\gamma_{p1}} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$Vp1$: volumen de las partículas 1

γ_{p1} : peso específico de las partículas del Material 1

con el valor de $Vp1$ se procede a calcular la cantidad de material necesaria para formar las probetas utilizando los otros materiales.

$$Wp2 = Vp1 * \gamma_{p2} \quad \text{Ec. 10}$$

$$Wp3 = Vp1 * \gamma_{p3} \quad \text{Ec. 11}$$

$$Wp4 = Vp1 * \gamma_{p4} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

W_{p2} , W_{p3} y W_{p4} : cantidad de material necesaria para formar las probetas de los materiales 2, 3 y 4.

γ_{p1} , γ_{p2} y γ_{p3} : peso específico de las partículas de los materiales 2, 3 y 4.

Las probetas tendrán un diámetro de 7.66 cm y una altura de 15 cm y el tamaño máximo de partícula que tendrán será de un sexto de su diámetro, por lo que sólo se utilizará material que pase la malla de $\frac{1}{2}$ ".

El procedimiento para formar las probetas será el mismo tanto para el caso que se utilice granulometría uniforme como bien graduada. El equipo necesario para formar las probetas de material es el siguiente: compresor, martillo neumático, molde, base de cámara triaxial y membrana de látex. El equipo para compactar se muestra en la Figura III.VII. 1.



Figura III.VII. 1.-Equipo para compactar

Una vez que se tiene la cantidad de material necesaria para formar la probeta se le agrega agua y se homogeniza, de tal forma que la humedad que tenga el material será de aproximadamente el 4.5%, previo a esto, la membrana de látex está puesta en el molde que se encuentra sobre la base de la cámara triaxial. La muestra de suelo se colocará dentro del molde en cuatro capas, compactando cada una con la ayuda del martillo neumático y escarificando con una espátula antes de colocar la siguiente capa, esto hasta la altura de 15 cm que debe tener la probeta. Enseguida se coloca el cabezal y se retira el molde para colocar otra membrana con la ayuda de un tubo que cuenta con una manguera para succionar (ver Figura III.VII. 2).



Figura III.VII. 2.-Tubo con manguera para colocar la membrana

Una vez colocada la segunda membrana, se utilizan dos abrazaderas para presionar la membrana contra el cabezal y contra la base donde se encuentra la probeta. En la Figura III.VII. 3 se observa la probeta terminada, lista para colocar la cámara triaxial.



Figura III.VII. 3.-Probeta terminada

Cuando se realicen las pruebas saturando la muestra, se colocará una manguera que va del cabezal a una válvula que conduce el agua fuera de la cámara triaxial (ver Figura III.VII. 4).



Figura III.VII. 4.-probeta terminada para las pruebas saturadas

III.VIII. Equipo para realizar las pruebas

El equipo necesario para realizar las pruebas de compresión simple y triaxiales consta de un marco de carga, panel de control, bureta y abastecimiento de agua (garrafón).

El marco de carga es una prensa HUMBOLT Master Loader-3000 neumática (ver Figura III.VIII. 1), que consta de:

- marco de acero, ajustable a la altura deseada,
- celda de carga para medir la carga axial aplicada,
- transductor para medir el desplazamiento axial,
- placa de base para colocar la cámara triaxial,

- sistema digital para controlar la velocidad de prueba y visualizar los valores de carga y desplazamiento aplicados durante la prueba,

La prensa puede manejarse desde la propia máquina o mediante un software instalado en la computadora, en el cual se realiza la adquisición de datos de la prueba.



Figura III.VIII. 1.-Marco de carga digital

El panel de control se utiliza para controlar el paso de agua y aire hacia la bureta, interface aire-agua y cámara triaxial. Consta de una serie de válvulas y manómetros, para regular la presión de confinamiento que se le aplica a las muestras, así como el agua que penetra en las probetas, cuando se requiera (ver Figura III.VIII. 2).



Figura III.VIII. 2.-Panel de control junto con la interface aire-agua y la bureta

La bureta se encuentra junto al panel de control (ver Figura III.VIII. 2), la cual tiene aceite de color rojo en su interior. Se utiliza para medir los cambios de volumen que sufre la probeta durante la prueba.

El abastecimiento de agua se encuentra en una repisa sobre el panel de control, el cual sirve para inyectar agua a la interface aire-agua, la bureta y la cámara triaxial. En la Figura III.VIII. 3 se muestra una vista general el equipo para realizar las pruebas



Figura III.VIII. 3.-Vista del equipo para realizar las pruebas

III.IX. Compresión Simple

Esta prueba permite determinar los parámetros de la resistencia al esfuerzo cortante de una masa de suelo, obteniendo sus características de esfuerzo – deformación, sin utilizar presión de confinamiento.

Procedimiento: se realiza la probeta de material, la cual está encerrada en la cámara triaxial, enseguida se coloca en la prensa, donde se ajustan la celda de carga y el transductor de desplazamiento. Se llena la cámara con agua y se conecta a la bureta, únicamente para medir los cambios de volumen de la probeta durante la aplicación de la carga, ya que en esta prueba no se aplica presión de confinamiento. Realizado lo anterior, se aplica carga a la probeta, utilizando el programa de adquisición de datos, y al mismo tiempo se registran los cambios de volumen a intervalos de 0.2 mm aproximadamente. La velocidad a la que se aplica la carga es de 1

mm/min y se detendrá hasta que la muestra falle. La prueba en proceso se muestra en la Figura III.IX. 1.

Cuando se trate de muestras saturadas, se procederá de la misma forma, con la diferencia que después de llenar la cámara con agua, se procederá a saturar la probeta, inyectando agua por la parte inferior inundando la muestra y saliendo por el cabezal en la parte superior hacia el exterior de la cámara.

Ya sea que se trate de probetas realizadas con poca humedad o saturando la muestra, después de ser ensayadas se determinará la humedad de prueba.



Figura III.IX. 1.-Prueba de compresión simple

III.X. Compresión triaxial

Esta prueba permite determinar las características de resistencia y esfuerzo – deformación de un suelo sujeto a esfuerzos cortantes al aplicar una carga axial, mientras se le aplica una presión de confinamiento.

Procedimiento: es muy similar a la prueba de compresión simple, salvo algunas diferencias, ya que en esta prueba se aplica al suelo un esfuerzo de confinamiento mediante agua y aire. Después de llenar la cámara triaxial con agua, se conecta a la bureta, para enseguida aplicar presión de confinamiento y consolidar la muestra. Se toman lecturas en la bureta del cambio de volumen que sufre la muestra, producto de la presión de confinamiento, a intervalos de tiempo hasta que el cambio sea muy pequeño. Después del proceso de consolidación, se procede a aplicar carga axial a la muestra, mediante el programa de adquisición de datos y al mismo tiempo registrando los cambios de volumen al aplicar la carga, de la misma manera como se hace en la prueba de compresión simple. En la Figura III.X. 1 se muestra la prueba triaxial en proceso.



Figura III.X. 1.-Prueba triaxial en proceso

Cuando se trata de muestras saturadas, después de llenar la cámara se procede a saturar la probeta, inyectando agua por la parte inferior.

IV. Resultados obtenidos y análisis

IV.I. Pruebas del Material 1

El Material 1 es un tezontle de color negro, procedente de uno de los frentes del Banco "Joyitas" (ver Figura IV.I. 1), del cual se obtuvo una muestra para su posterior análisis.



Figura IV.I. 1.-Frente del Banco "Joyitas"

Se determinaron, por medio del microscopio electrónico de barrido, los minerales presentes en el Material 1 (ver Figura VI.I.1), de los cuales el aluminio y el silicio, fueron los que se tomaron más en cuenta para realizar las comparaciones con los demás materiales. El Material 1 tiene mayor cantidad de silicio (ver Tabla VI.I.1), lo que le da mayor resistencia. En la Figura VI.I.5 se observa la microestructura de los materiales, en el Material 1 se observa que al romperse las partículas, se generan partículas de diferentes tamaños y una gran cantidad de polvo, siendo lo contrario a lo que se observa a simple vista, cuando se compacta el material y no se presenta mucha rotura de partículas.

El Material 1 presenta una gran variación en la porosidad de sus partículas, encontramos partículas muy porosas, así como también otras con estructura muy cerrada (ver Figura IV.I. 2).



Figura IV.I. 2.-Del lado izquierdo partículas muy porosas y del lado derecho partículas poco porosas

Se determinaron densidades y absorción del material, así como el peso específico y porosidad. Para determinar la densidad relativa de los sólidos se molieron las partículas y se siguió el procedimiento utilizado para suelos que pasan la Malla No. 4, ya que si se utiliza el procedimiento para suelos retenidos en dicha malla (M-MMP-1-05-03, SCT), los valores de la densidad relativa de sólidos resultan muy pequeños. Para obtener el peso específico y la porosidad se ensayaron varias partículas para después obtener un promedio. Por otro lado también se determinó el índice de resistencia de carga puntual, determinando la resistencia de varias partículas y obteniendo también un promedio. En la Tabla IV.I. 1 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla IV.I. 1.-Características físicas y mecánicas de las partículas

Material	1
Densidad relativa aparente gr/cm³	2.05
Absorción %	4.54

Densidad relativa de sólidos S_s	2.642
Peso específico de las partículas gr/cm^3	2.176
Porosidad %	21.1
Índice de resistencia de carga puntual kg/cm^2	46.3

De la tabla anterior se observa que el material no tiene tan alta absorción, sin embargo la porosidad si es alta. En la prueba de carga puntual la mayoría de las partículas tuvieron alta resistencia, con excepción de las partículas muy porosas. En las partículas muy porosas, antes de llegar a la carga de ruptura presentaban penetración de las puntas cónicas (ver Figura IV.I. 3).

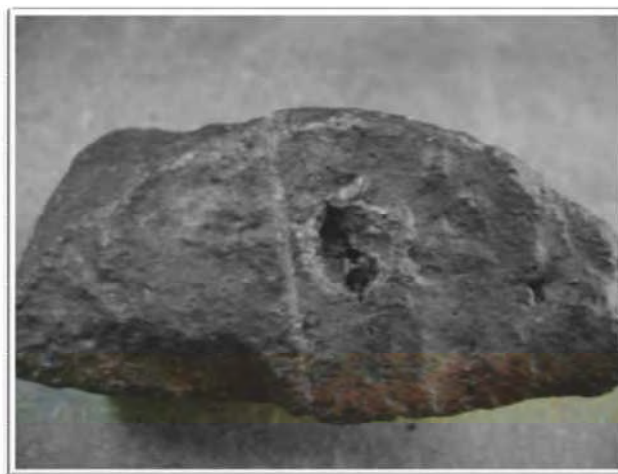


Figura IV.I. 3 Penetración de las puntas cónicas en la partícula

Con el dato del peso específico de las partículas y las dimensiones de la probeta, se obtiene la cantidad de material necesaria para formarlas (ver Tabla IV.I. 2). La cantidad de material necesaria para formar las probetas depende de la granulometría del material, ya que cuando se tiene una granulometría bien graduada el acomodo de las partículas es mejor que cuando se tiene una uniforme. Por lo anterior al utilizar la granulometría bien graduada tendremos un peso específico y peso de partícula mayor.

Tabla IV.I. 2.-Datos para formar las probetas (M-1)

Granulometría uniforme	
Peso específico de la probeta γ_m , ton/m ³	1.374
Peso de las partículas W_p , gr	950
Volumen de las partículas V_p , cm ³	436.58
Granulometría bien graduada	
Peso específico de la probeta γ_m , ton/m ³	1.707
Peso de las partículas W_p , gr	1180
Volumen de las partículas V_p , cm ³	542.28

Se determina una granulometría bien graduada la cual debe cumplir con la establecida para un material de base. En la Tabla IV.I. 3 se muestran los porcentajes que pasan por cada malla.

Tabla IV.I. 3.-Granulometrías para formar las probetas

Malla		Granulometría uniforme	Granulometría bien graduada
Designación	Abertura nominal (mm)		
		% que pasa	
1/2"	12.5	----	100
3/8"	9.5	100	75
1/4"	6.3	0	60
No. 4	4.75	0	53
No. 10	2.0	0	36
No. 20	0.85	0	25
No. 40	0.425	0	17
No. 60	0.25	0	12
No. 100	0.15	0	8
No. 200	0.075	0	3

IV.I.I Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría uniforme

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas al material, utilizando granulometría uniforme bajo las dos condiciones de humedad.

En las gráficas esfuerzo – deformación mostradas en la Figura IV.I.I. 1, se observa que al aumentar la presión de confinamiento, aumenta el esfuerzo desviador, independientemente del contenido de humedad. Además se observa que al aumentar el contenido de humedad, bajo una misma presión de confinamiento, el esfuerzo desviador disminuye. Otra característica que presenta el material es la variación volumétrica durante la prueba. Se observa que en la prueba de compresión simple se presenta mayor dilatancia que en las pruebas triaxiales, y aún mayor cuando se satura el material. Por otra parte en las pruebas triaxiales la dilatancia aumenta conforme disminuye la presión de confinamiento, a excepción de lo que sucede con la prueba de 0.45 kg/cm^2 de presión de confinamiento, con bajo contenido de humedad, donde la expansión es mayor que con un confinamiento de 0.3 kg/cm^2 .

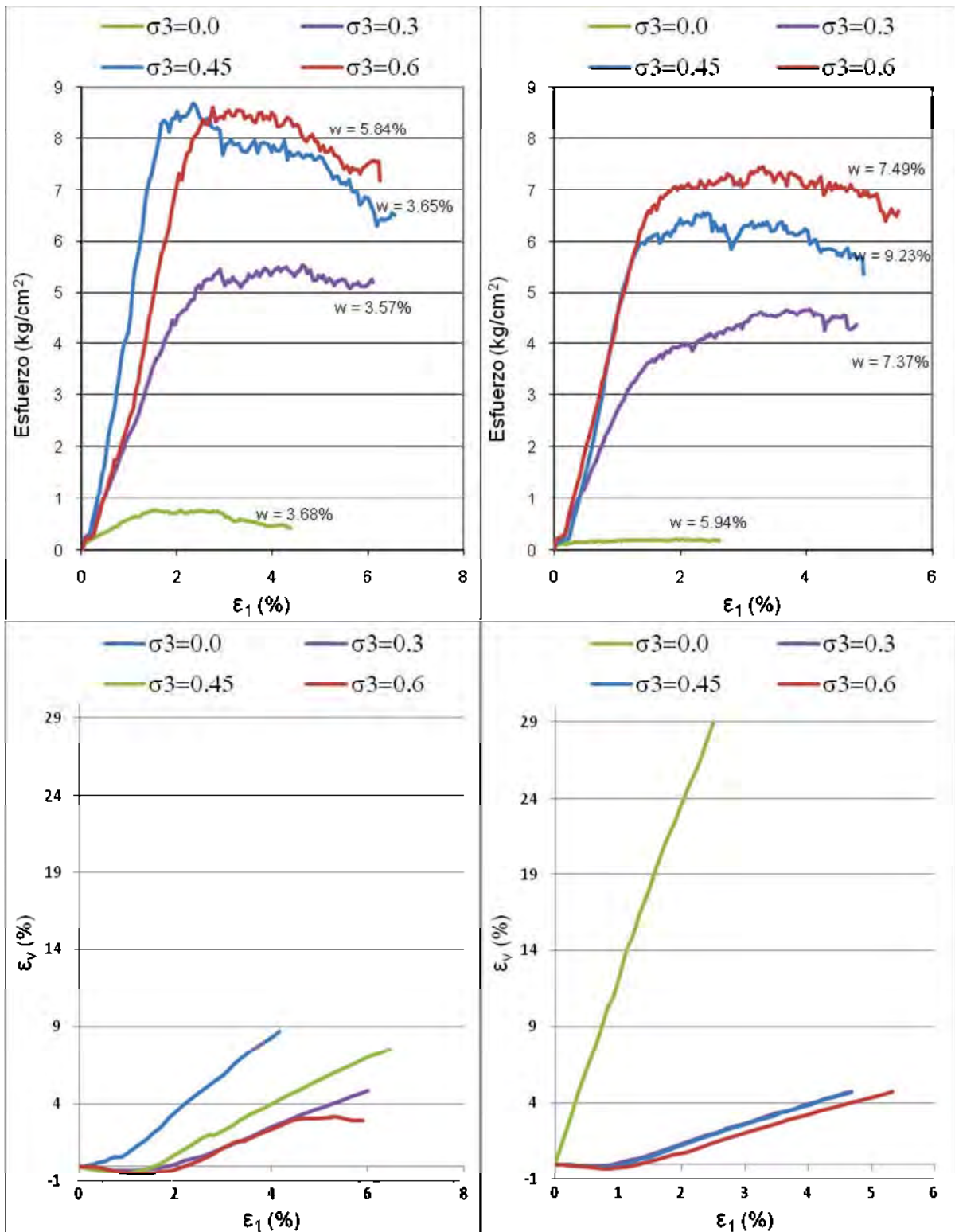


Figura IV.I.I. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial

Para el análisis de las granulometrías del material, tanto con granulometría inicial uniforme como bien graduada se utilizará la siguiente nomenclatura:

- Granulometría inicial, correspondiente a la curva granulométrica 1.
- Granulometría después de compactar, correspondiente a la curva granulométrica 2.
- Granulometría después de la prueba, correspondiente a la curva granulométrica 3.

Esta numeración se utilizará para el posterior análisis de las granulometrías y de la rotura de partículas. Además esta misma numeración se utilizará para todos los demás materiales en estudio.

Las curvas granulométricas del material, con granulometría inicial uniforme, bajo las dos condiciones de humedad, se muestran en el anexo VI.II.

En base a las curvas granulométricas se analiza la rotura de partículas que presenta el material después de compactar y después de la prueba, mediante la obtención del parámetro B de rotura de Marsal (ver Figura IV.I.I. 2).

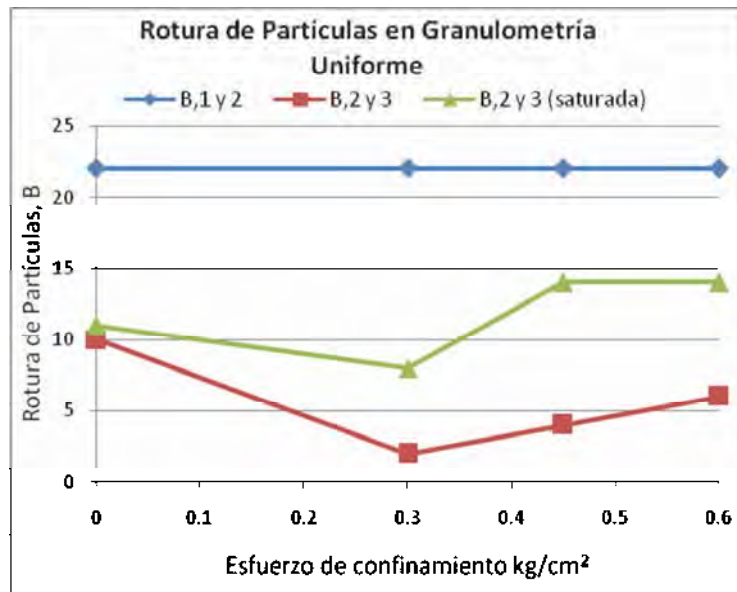


Figura IV.I.I. 2.-Rotura de partículas en pruebas de compresión simple y triaxiales

En la Figura IV.I.I. 2 se observa que en la etapa de compactación se presenta mayor rotura de partículas, mientras que durante la prueba la rotura es menor. En las pruebas realizadas con bajo contenido de humedad, la mayor rotura de partículas se presenta en la prueba de compresión simple, y en las pruebas triaxiales al aumentar el confinamiento también lo hace la rotura de partículas. En las pruebas saturadas la rotura de partículas también aumenta al incrementarse el confinamiento y en general la rotura es mayor que en las pruebas con bajo contenido de humedad.

IV.I.II Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría bien graduada

Ahora se muestran las curvas esfuerzo – deformación y deformación volumétrica-deformación axial del material utilizando granulometría bien graduada (Figura IV.I.II. 1), en las cuales se observa que al incrementarse el esfuerzo de confinamiento, aumenta el esfuerzo desviador, bajo las dos condiciones de humedad; en las pruebas realizadas con bajo contenido de

humedad, el esfuerzo desviador es mayor que en las pruebas en que se satura la muestra. El material presenta, bajo las dos condiciones de humedad, poca compresión y después mucha dilatación, siendo mayor en las pruebas con bajo contenido de humedad.

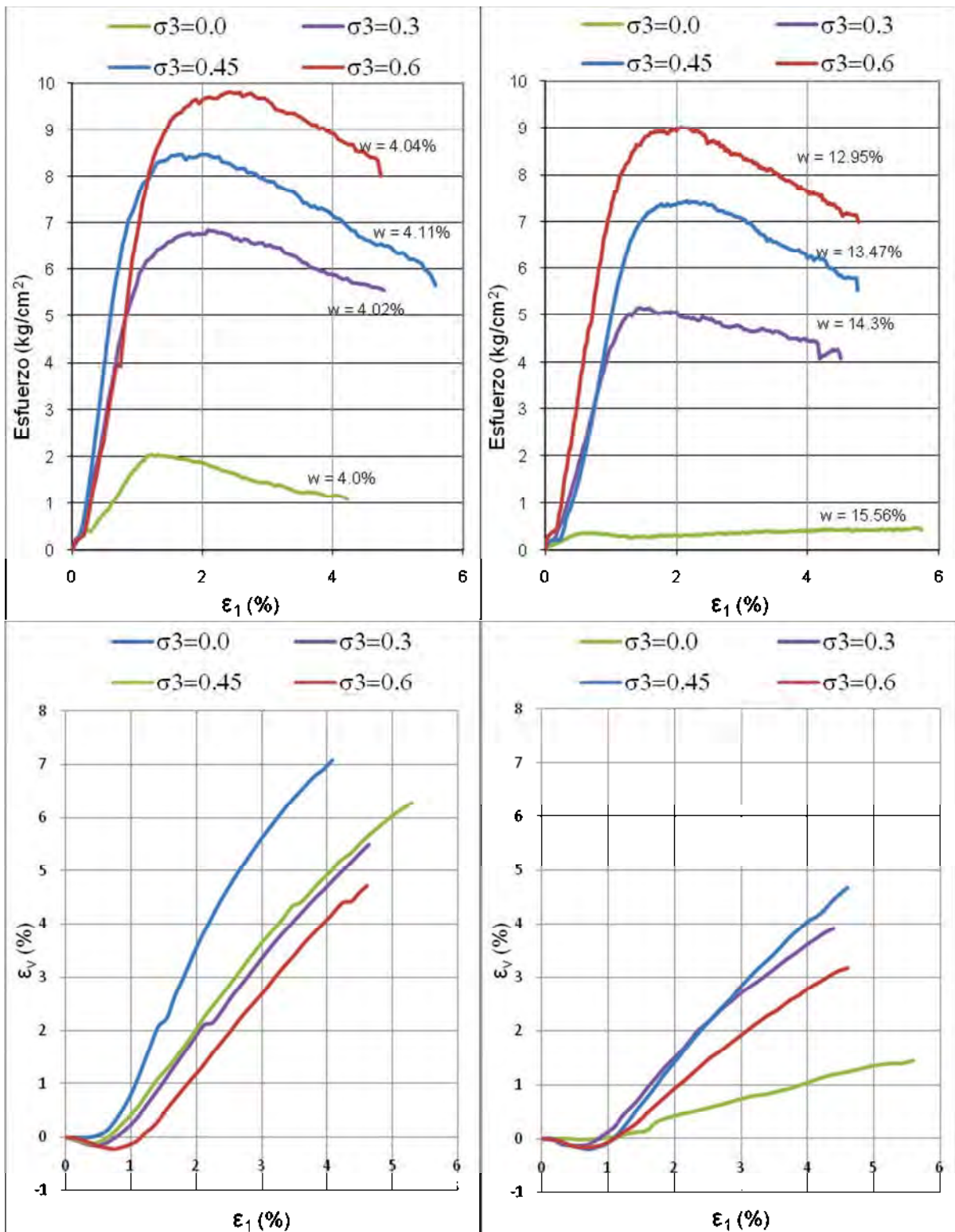


Figura IV.I.II. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial

Las curvas granulométricas del material, con granulometría inicial bien graduada, bajo las dos condiciones de humedad, se muestran en el anexo VI.III.

En dichas curvas no se observan cambios considerables en la granulometría del material, se puede decir que se mantiene la misma granulometría, aún después de compactar.

Ya teniendo las granulometrías se analiza la rotura de partículas.

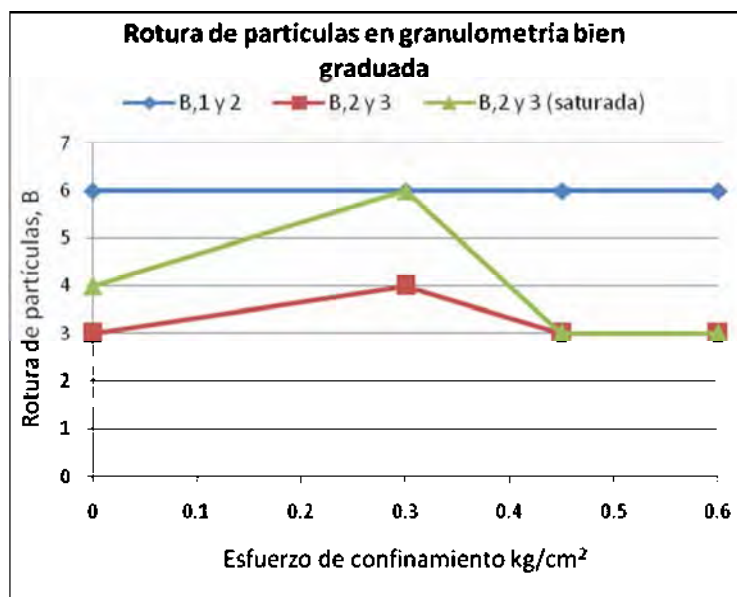


Figura IV.I.II. 2.-Rotura de partículas en pruebas de compresión simple y triaxiales

Al utilizar la granulometría bien graduada también la mayor rotura de partículas se presenta durante la compactación del material. Además durante la prueba la rotura de partículas es mayor cuando se satura la muestra.

IV.II. Pruebas del Material 2

El material 2 es un tezontle de color rojo, procedente de uno de los frentes del Banco "Cerritos" (ver Figura IV.II. 1), localizado en la parte alta del mismo.



Figura IV.II. 1.-Frente del banco "Cerritos"

Se determinaron los minerales presentes en el Material 2, de los cuales el aluminio y el silicio se tomaron como referencias para realizar comparaciones con los demás materiales. En la Figura VI.I.2 se presentan en forma gráfica los minerales. Este material tiene menor cantidad de silicio, por lo que tiene menor resistencia que el Material 1 (ver Tabla VI.I.1). En la microestructura del material (ver Figura VI.I.5) se observa que al romperse, resultan partículas de aproximadamente el mismo tamaño y no genera polvo, contrario a lo que resulta de compactar el material, donde se presenta gran rotura de partículas y mucho polvo.

Todas las partículas del Material 2 presentan gran cantidad de poros (ver imagen 12).



Figura IV.II. 2.-Partículas con gran cantidad de poros

En la Tabla IV.II. 1 se muestran los resultados de las pruebas índice realizadas al material.

Tabla IV.II. 1.-Características físicas y mecánicas de las partículas

Material	2
Densidad relativa aparente gr/cm^3	1.29
Absorción %	20.35
Densidad relativa de sólidos S_s	2.561
Peso específico de las partículas gr/cm^3	1.518
Porosidad %	40.7
Índice de resistencia de carga puntual kg/cm^2	17.49

Las partículas presentan densidad y peso específico bajo, con una muy alta absorción debida a la gran cantidad de poros. Para obtener la densidad relativa de sólidos, se molió el material y se utilizó el procedimiento descrito en el inciso III.IV. Por las características de densidad y absorción, el material

presenta un porcentaje de porosidad muy alto, lo que también trae como consecuencia que el material presente poca resistencia. Al realizar la prueba de índice de resistencia de carga puntual, las puntas cónicas penetran en las partículas (ver Figura IV.II. 3), por la gran cantidad de poros que tienen.



Figura IV.II. 3 Penetración de las puntas cónicas en las partículas del Material 2

En la Tabla IV.II. 2 se muestran los datos para formar las probetas, tanto al utilizar granulometría uniforme como bien graduada. Debido al bajo peso específico de las partículas, el peso de las partículas y peso específico de la probeta son bajos.

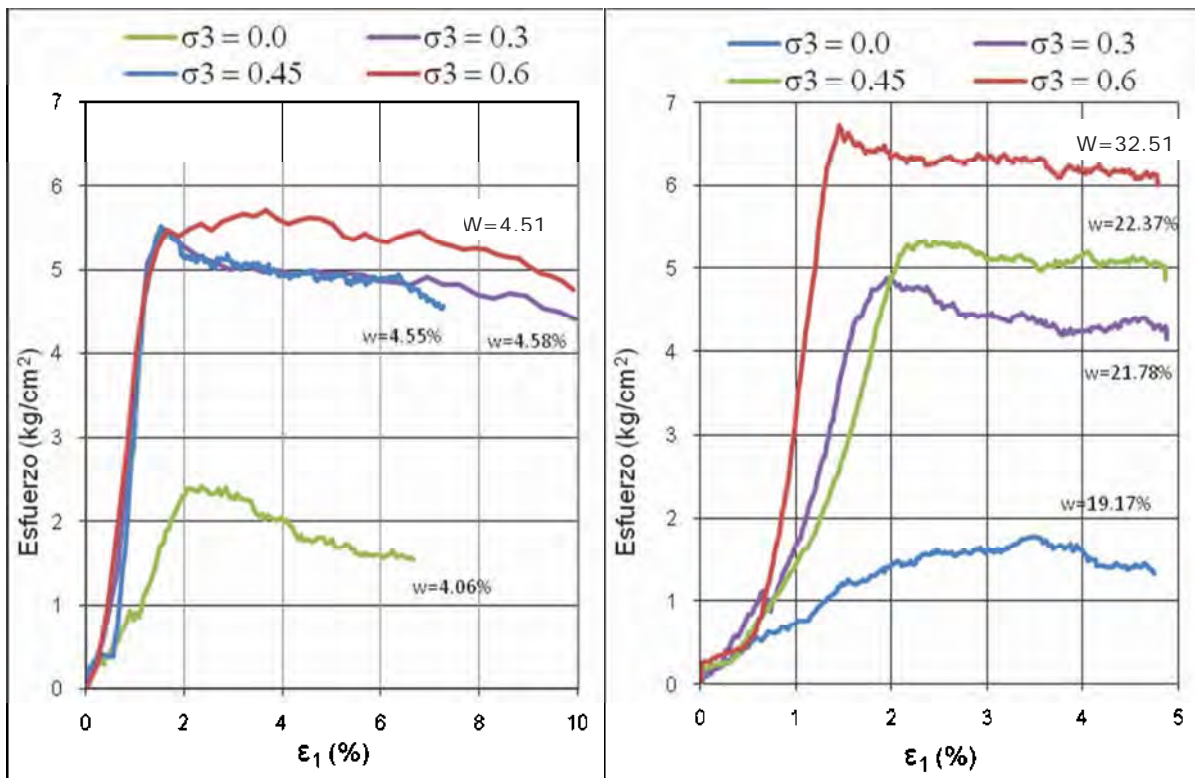
Tabla IV.II. 2.-Datos para formar las probetas (M-2)

Granulometría uniforme	
Peso específico de la probeta γ_m , ton/m ³	0.959
Peso de las partículas W_p , gr	662.73
Volumen de las partículas V_p , cm ³	436.58
Granulometría bien graduada	
Peso específico de la probeta γ_m , ton/m ³	1.191
Peso de las partículas W_p , gr	823.18
Volumen de las partículas V_p , cm ³	542.28

La granulometría a utilizar es la misma que para los otros materiales.

IV.II.I Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría uniforme

En la Figura IV.II.I. 1 se muestran las curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial.



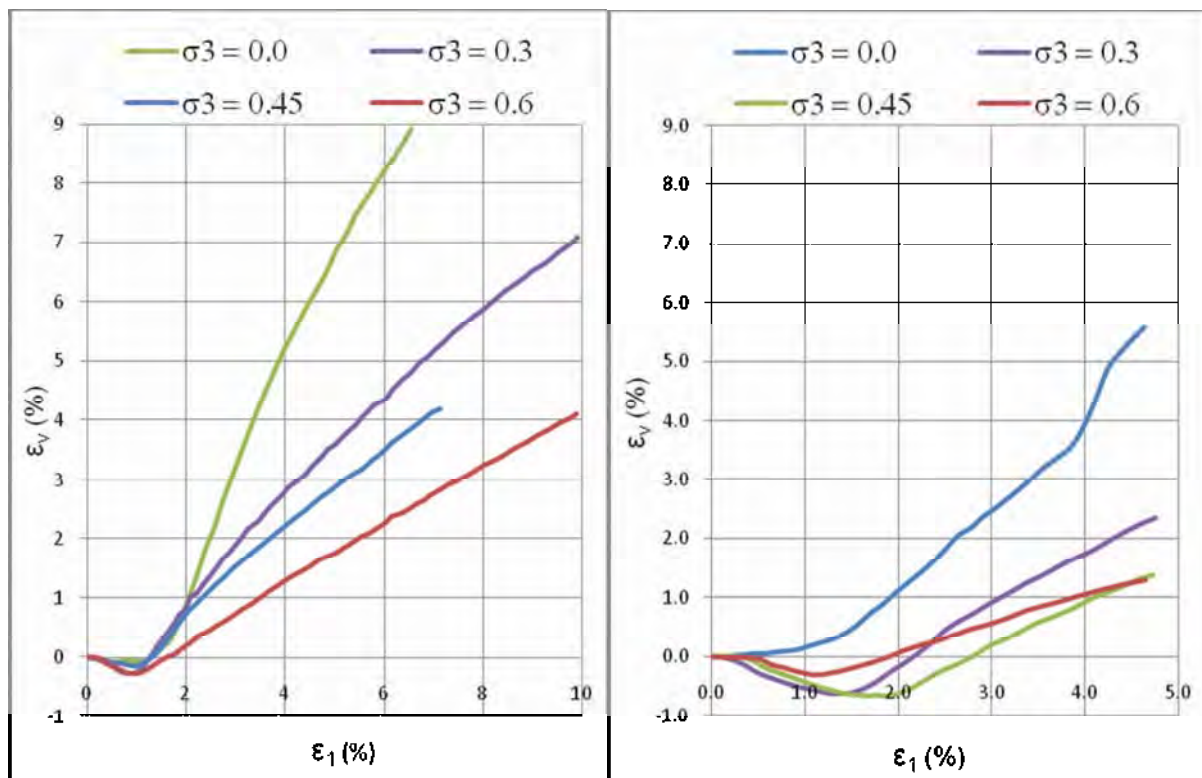


Figura IV.II.I. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial

En la figura anterior se observa que al incrementarse el esfuerzo de confinamiento aumenta el esfuerzo desviador, bajo las dos condiciones de humedad. En las pruebas realizadas con bajo contenido de humedad se obtienen esfuerzos mayores que en las pruebas donde se satura la muestra, excepto con el $\sigma_3=0.6 \text{ kg/cm}^2$, donde se presenta un esfuerzo desviador mayor al saturar la muestra.

Con bajo contenido de humedad el material se comprime muy poco y después mucha dilatancia, mientras que cuando se satura la muestra el material se comprime más y después presenta un poco de dilatancia.

En las curvas granulométricas (ver anexo VI.IV) se observan los cambios de granulometría después de compactar y después de la prueba.

En la etapa de compactación es donde se presentan mayores cambios en la granulometría del material, y durante la prueba cambia muy poco, bajo las dos condiciones de humedad.

En la Figura IV.II.I. 2 durante la compactación se presenta gran rotura de partículas y durante la prueba es muy poca. Debido a que las partículas son muy porosas y con poca resistencia, al compactar las probetas, se presenta mucha rotura de partículas. Durante la prueba también hay rotura de partículas pero no tanto como durante la compactación, mientras que en la prueba de compresión simple se presenta mayor rotura que en las pruebas triaxiales.

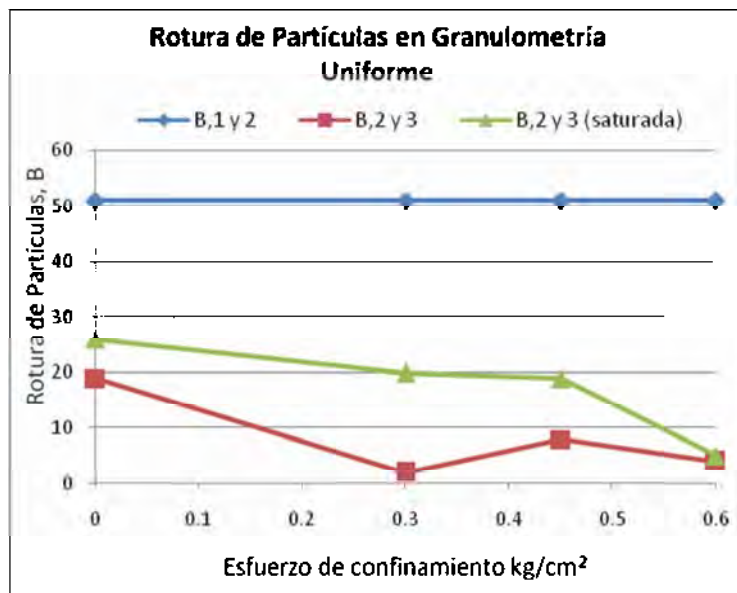
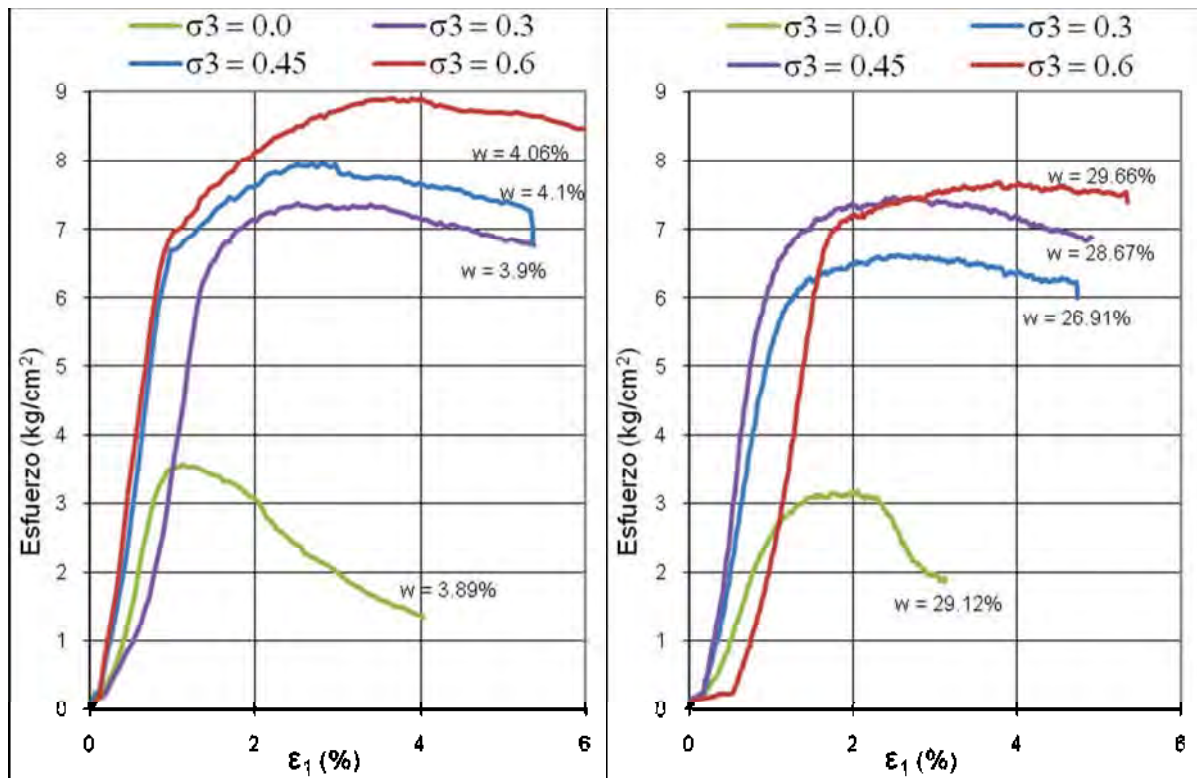


Figura IV.II.I. 2.-Rotura de partículas

IV.II.II Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría bien graduada

En la Figura IV.II.II. 1 se observan los resultados de las pruebas de compresión simple y triaxiales, en las cuales, al incrementarse el esfuerzo de confinamiento también aumenta el esfuerzo desviador, bajo las dos

condiciones de humedad. En las pruebas realizadas con bajo contenido de humedad se obtienen esfuerzos desviadores mayores que en las pruebas donde se satura la muestra. El material presenta, bajo las dos condiciones de humedad, un poco de compresión y mayor dilatancia, siendo en la prueba de compresión simple con bajo contenido de humedad donde se presenta mayor dilatancia.



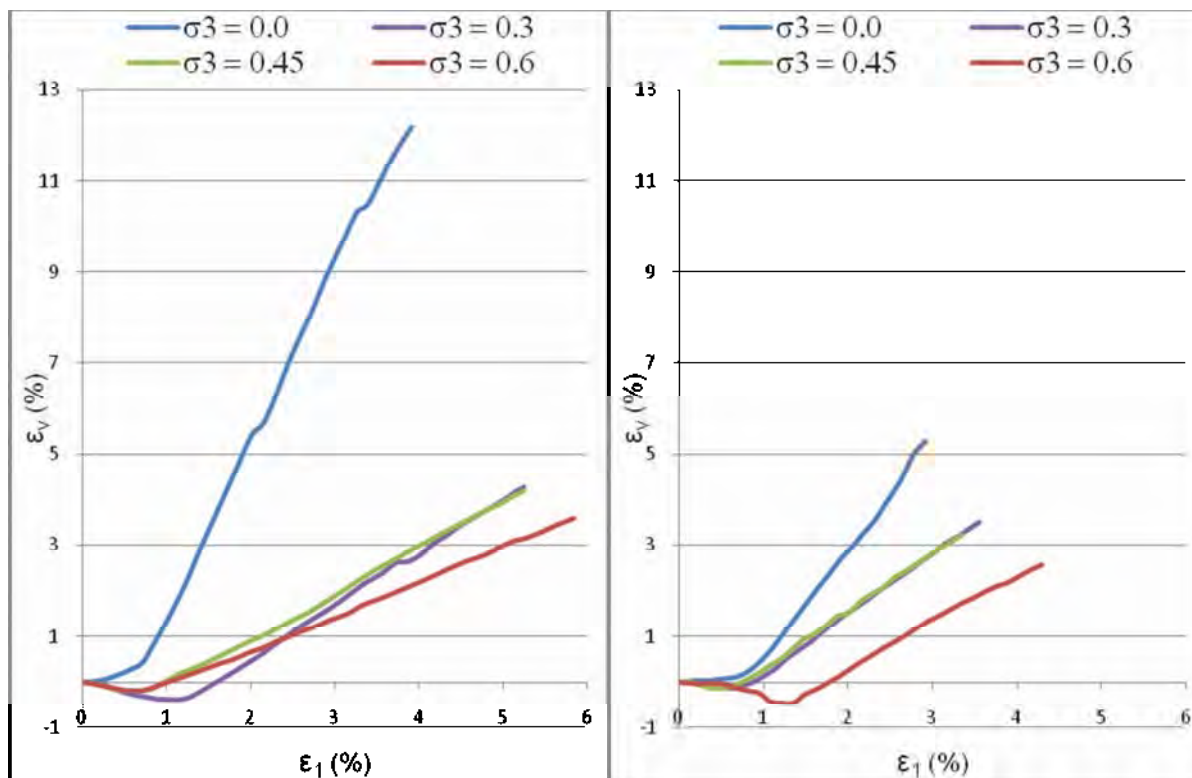


Figura IV.II.II. 1.-curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial

En las curvas granulométricas (ver anexo VI.V) se observan los cambios de granulometría después de compactar y después de la prueba. En la etapa de compactación se presentan pocos cambios en la granulometría del material, mientras que durante la prueba prácticamente no hay cambios, bajo las dos condiciones de humedad.

En la Figura IV.II.II. 2 se observa que en la etapa de compactación es donde se presenta mayor rotura de partículas, mientras que durante la prueba no se presenta mucha rotura, lo anterior ocurre en las dos condiciones de humedad.

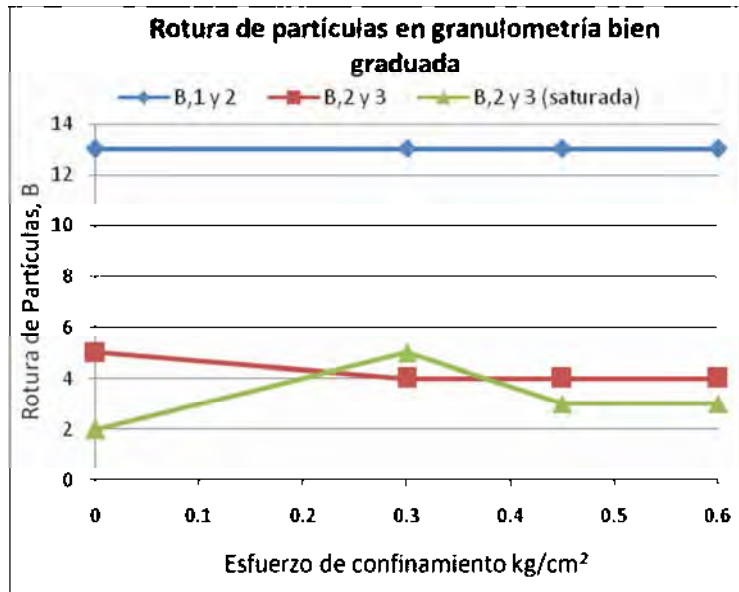


Figura IV.II.II. 2.-Rotura de partículas

IV.III. Pruebas del Material 3

El material 3 es un tezontle de color negro, procedente de uno de los frentes del Banco "Cerritos" (ver Figura IV.III. 1), localizado en la parte alta y baja del mismo.



Figura IV.III. 1.-Frente del Banco "Cerritos"

Se determinaron los minerales presentes en el Material 3, de los cuales el aluminio y el silicio se tomaron como referencias para realizar comparaciones con los demás materiales. En la Figura VI.I.3 se presentan en forma gráfica los minerales. Este material tiene menor cantidad de silicio, por lo que tiene menor resistencia que el Material 2 (ver Tabla VI.I.1). En la microestructura del material (ver Figura VI.I.5) se observa que al romperse, resultan partículas de una gran cantidad de tamaños y se genera polvo, contrario a lo que resulta de compactar el material, donde se presenta poca rotura de partículas y poco polvo.

Las partículas el Material 3 también presentan gran cantidad de poros (ver imagen 22).



Figura IV.III. 2.-Partículas muy porosas

En la Tabla IV.III. 1 se muestran los resultados de las pruebas índice realizadas al material.

Tabla IV.III. 1.-Características físicas y mecánicas de las partículas

Material	3
Densidad relativa aparente gr/cm^3	1.29
Absorción %	20.22
Densidad relativa de sólidos S_s	2.583
Peso específico de las partículas gr/cm^3	1.495
Porosidad %	42.1
Índice de resistencia de carga puntual kg/cm^2	13.67

Las partículas presentan densidades y peso específico bajos, una absorción alta y por lo tanto alto porcentaje de porosidad, lo que ocasiona que las partículas tengan poca resistencia. En la prueba de índice de carga puntual las puntas cónicas penetran en las partículas (ver Figura IV.III. 3), debido a la porosidad de las mismas.

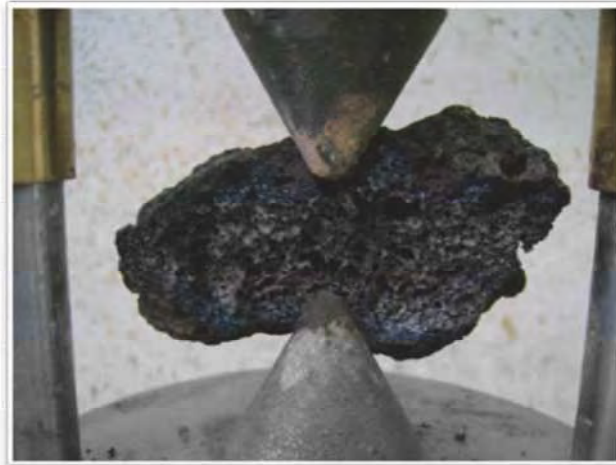


Figura IV.III. 3 Penetración de las puntas cónicas en las partículas del Material 3

En base al peso específico de las partículas se obtiene la cantidad de material necesaria para formar las probetas, con las dos granulometrías.

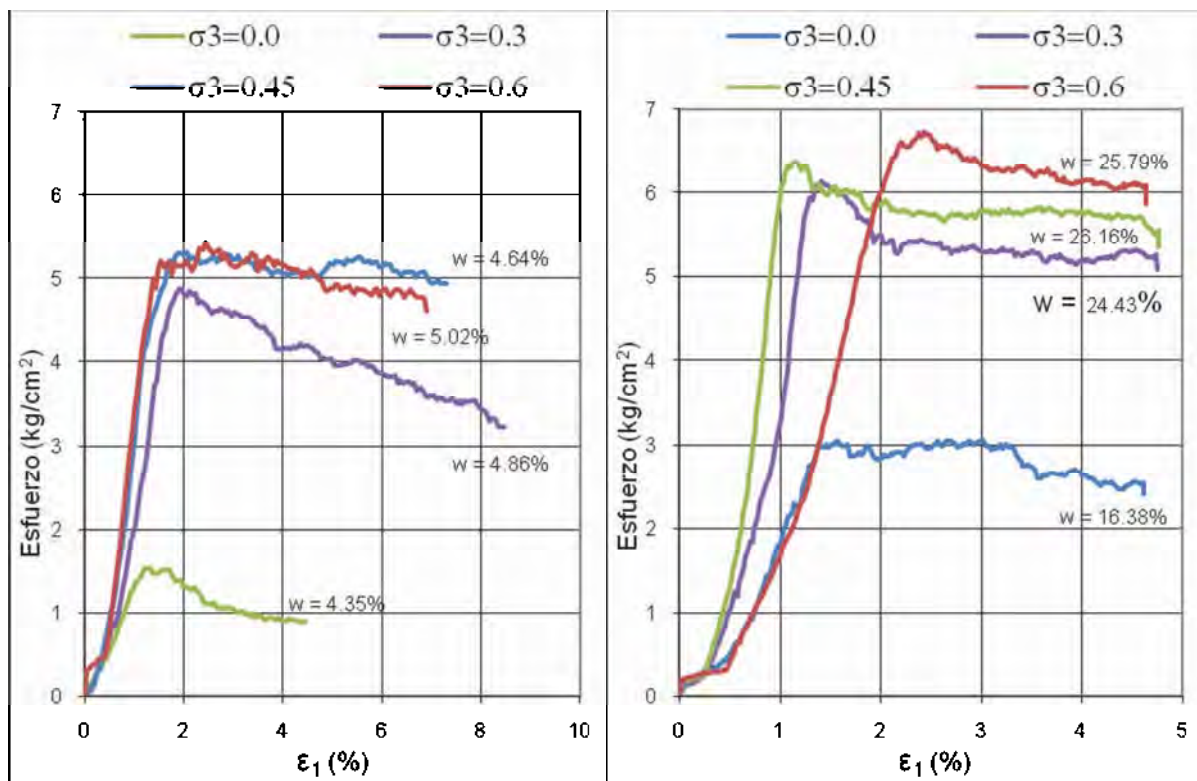
En la Tabla IV.III. 2 se muestran los datos para formar las probetas, tanto al utilizar granulometría uniforme como bien graduada. Debido al bajo peso específico de las partículas, el peso de las partículas y peso específico de la probeta son bajos.

Tabla IV.III. 2.-Datos para formar las probetas (M-3)

Granulometría uniforme	
Peso específico de la probeta γ_m , ton/m ³	0.944
Peso de partícula W_p , gr	652.69
Volumen de partícula V_p , cm ³	436.58
Granulometría bien graduada	
Peso específico de la probeta γ_m , ton/m ³	1.173
Peso de partícula W_p , gr	810.71
Volumen de partícula V_p , cm ³	542.28

IV.III.I Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría uniforme

En la Figura IV.III.I 1 se muestran las curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial, en ellas se observa que al incrementar el esfuerzo de confinamiento también aumenta el esfuerzo desviador. Sin embargo en las pruebas realizadas con bajo contenido de humedad se obtienen esfuerzos desviadores menores a los obtenidos en las pruebas donde se satura la muestra. En las pruebas con bajo contenido de humedad se observa mayor dilatación que en las pruebas saturadas, y en éstas últimas hay mayor compresión.



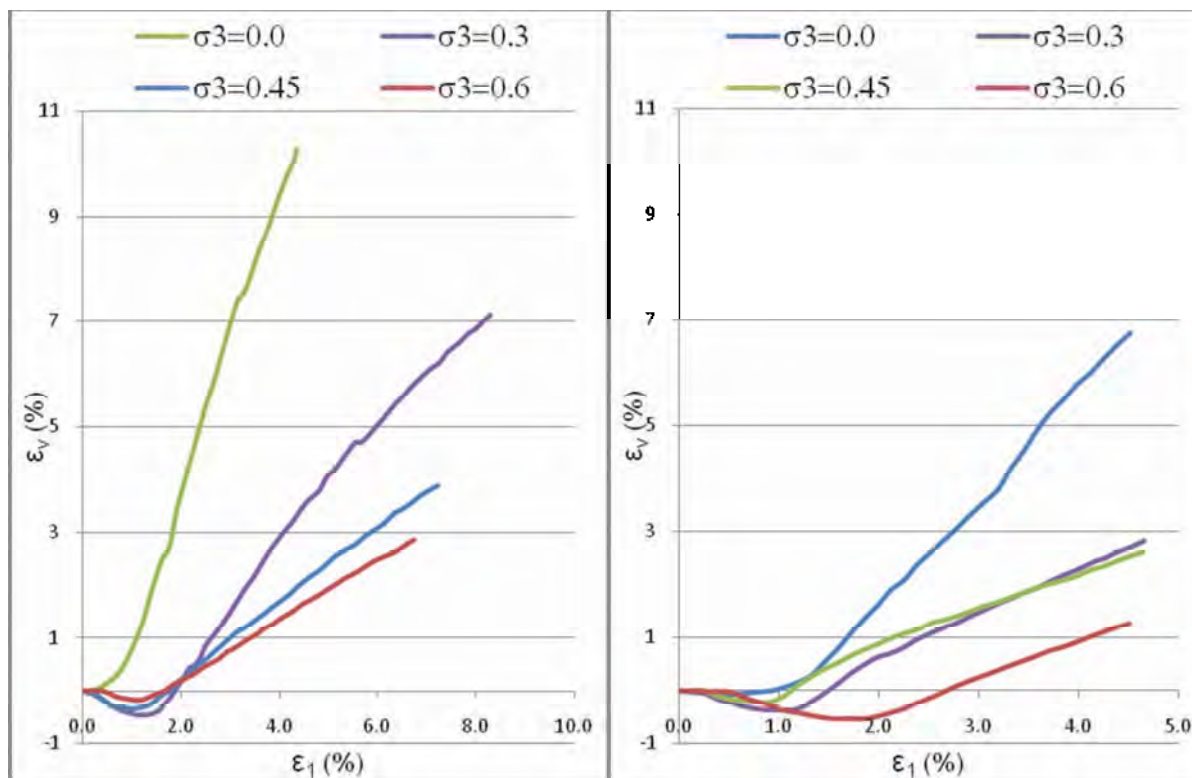


Figura IV.III.I 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial

Las granulometrías del material, con granulometría inicial uniforme, bajo las dos condiciones de humedad se muestran en el anexo VI.VI, en ellas se observa que durante la prueba también se presentan muchos cambios granulométricos.

En la Figura IV.III.I 2 se observa que en los confinamientos de 0.3 y 0.45 kg/cm² se presenta una rotura de partículas mayor que durante la compactación, mientras que en las dos primeras pruebas saturadas la rotura de partículas es un poco inferior a la que se presenta en la compactación, y en las dos últimas es superior a ésta.

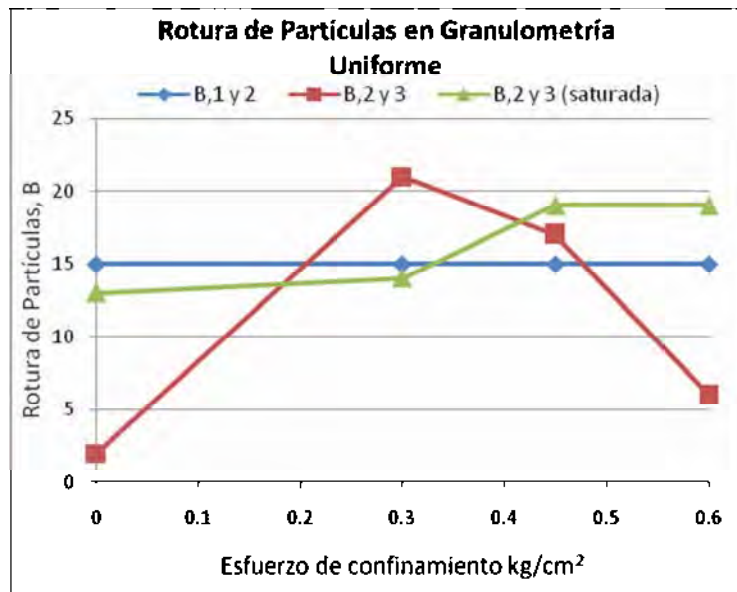


Figura IV.III.I 2.-Rotura de partículas

IV.III.II Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría bien graduada

En la Figura IV.III.II. 1 se muestran las curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial, en ellas se observa que al incrementarse el esfuerzo de confinamiento aumenta el esfuerzo desviador, siendo en las pruebas con bajo contenido de humedad donde se obtienen esfuerzos de confinamiento mayores que en las pruebas saturadas. Conforme aumenta el esfuerzo de confinamiento, disminuye la dilatancia del material y ésta es mayor en las pruebas saturadas que en aquellas con bajo contenido de humedad. La prueba de compresión simple con bajo contenido de humedad es la que presenta mayor dilatancia.

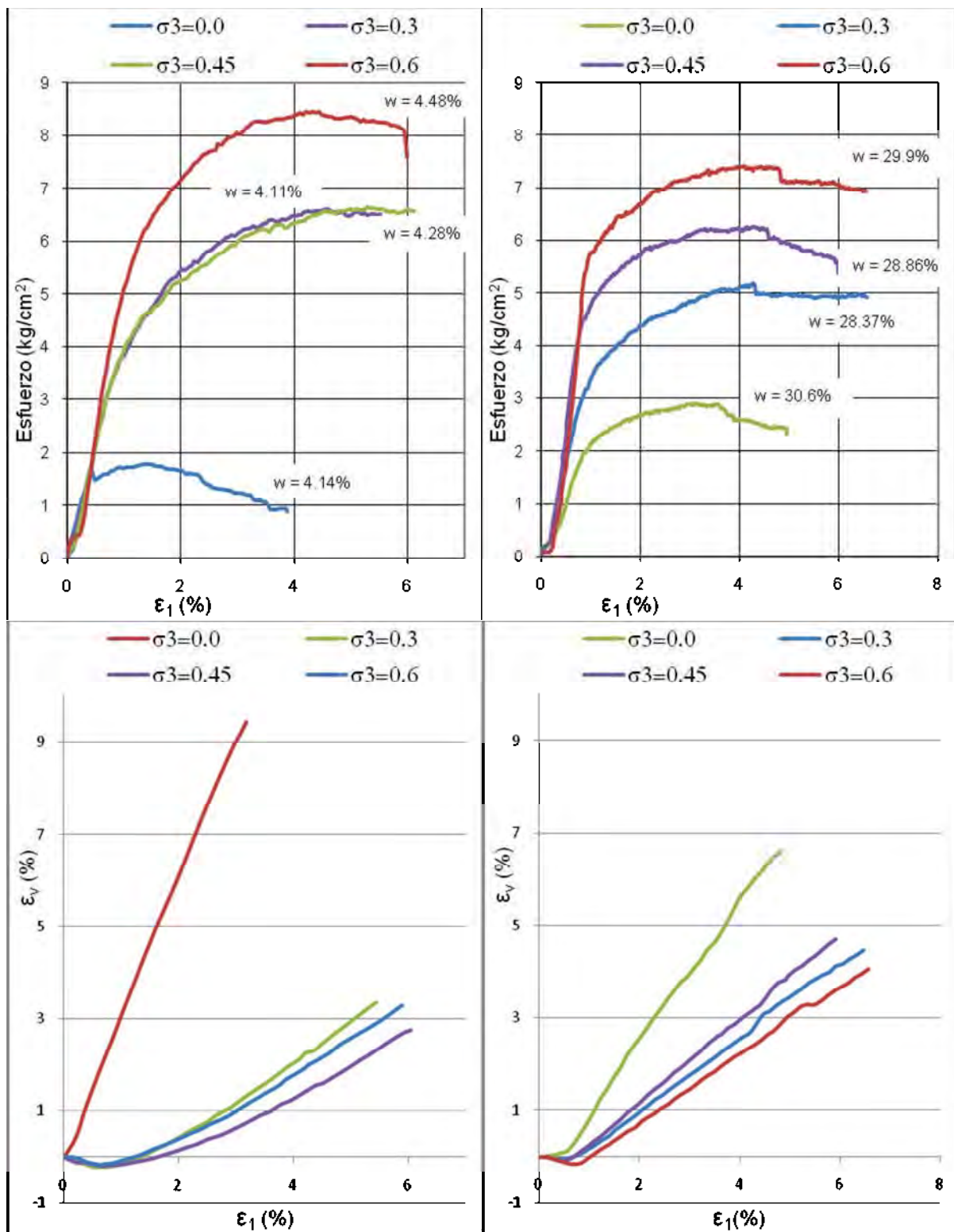


Figura IV.III.II. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial

Las granulometrías del material, con granulometría inicial bien graduada se muestran en el anexo VI.VII, en ellas se observa que durante la compactación se presentan mayores cambios granulométricos y durante la prueba es muy poco.

En la Figura IV.III.II. 2 se observa que durante la compactación se presenta la mayor rotura de partículas del material; en las pruebas saturadas existe mayor rotura de partículas que en las que tienen bajo contenido de humedad y en ambas al aumentar el esfuerzo de confinamiento disminuye la rotura de partículas.

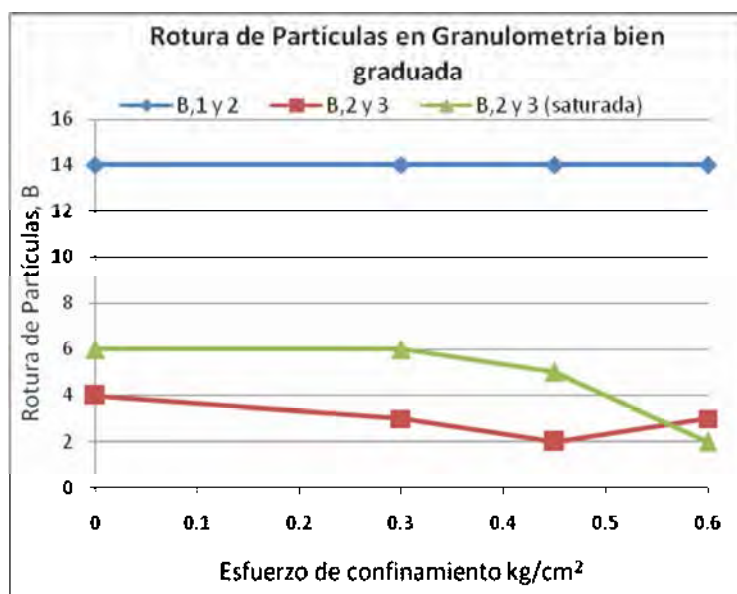


Figura IV.III.II. 2.-Rotura de partículas

IV.IV. Pruebas del Material 4

El Material 4 es un material producto de trituración de roca (ver Figura IV.IV. 1).



Figura IV.IV. 1 Material producto de trituración de roca

Se determinaron los minerales presentes en el Material 4, de los cuales el aluminio y el silicio se tomaron como referencias para realizar comparaciones con los demás materiales. En la Figura VI.I.3 se presentan en forma gráfica los minerales. Este material tiene menor cantidad de silicio (ver Tabla VI.I.1), sin embargo tiene mayor resistencia que lo materiales anteriores. En la microestructura del material (ver Figura VI.I.5) se observa que al romperse, resultan partículas de una gran cantidad de tamaños y se genera polvo, contrario a lo que resulta de compactar el material, donde prácticamente no hay rotura de partículas.

En la Tabla IV.IV. 1 se muestran los resultados de las pruebas índice realizadas al material.

Tabla IV.IV. 1.-Características físicas y mecánicas de las partículas

Material	4
Densidad relativa aparente gr/cm³	2.68
Absorción %	2.17
Densidad relativa de sólidos S_s	2.659
Peso específico de las partículas gr/cm³	2.771

Porosidad %	0.0
Índice de resistencia de carga puntual kg/cm²	105.8

Es un material muy denso, con poca absorción y alta resistencia.

En la Tabla IV.IV. 2 se muestran los datos para realizar las probetas para las pruebas.

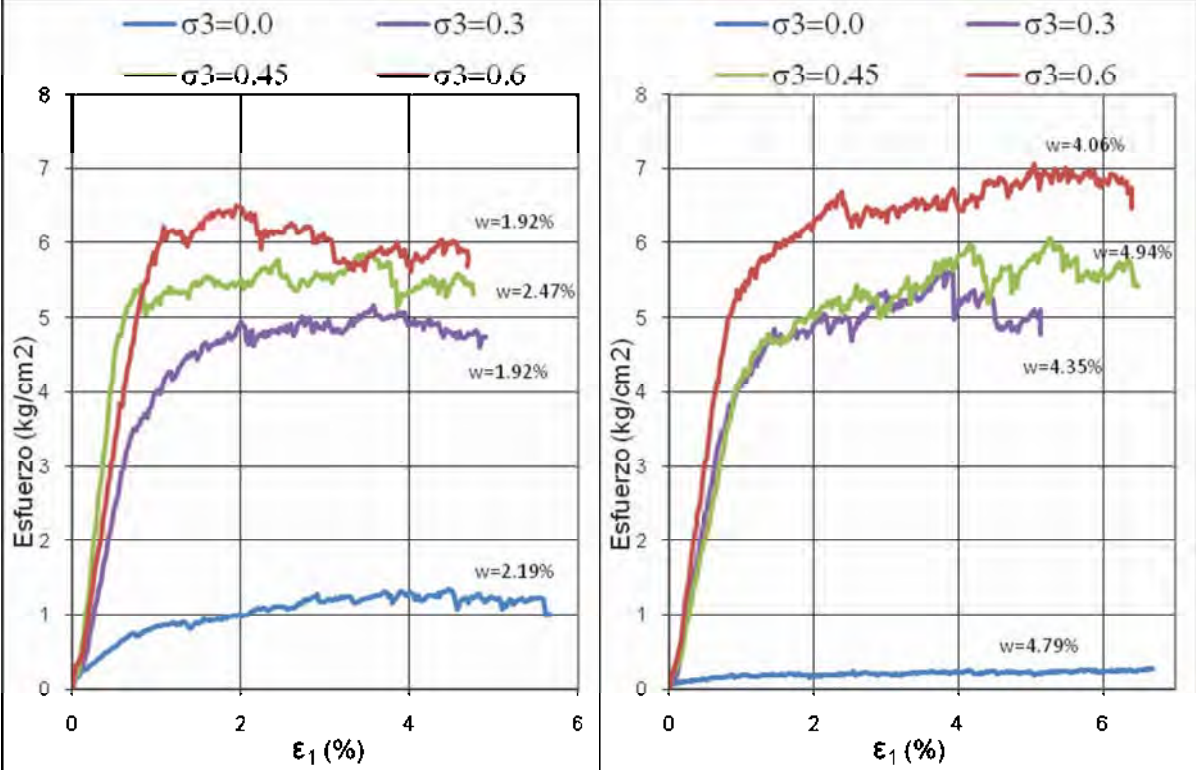
Tabla IV.IV. 2.-Datos para formar las probetas (M-4)

Granulometría uniforme	
Peso específico de la probeta γ_m , ton/m ³	1.579
Peso de partícula W_p , gr	1091.45
Volumen de partícula V_p , cm ³	436.58
Granulometría bien graduada	
Peso específico de la probeta γ_m , ton/m ³	1.961
Peso de partícula W_p , gr	1355.7
Volumen de partícula V_p , cm ³	542.28

IV.IV.I Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría uniforme

En la Figura IV.IV.I. 1 se muestran las curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial, en las que se observa que al incrementarse el esfuerzo de confinamiento aumenta el esfuerzo desviador, mientras que en las pruebas saturadas se obtienen esfuerzos desviadores más altos que en las pruebas con bajo contenido de humedad, únicamente en la prueba de compresión simple realizada con bajo contenido de humedad se obtiene un esfuerzo desviador mayor al obtenido en la prueba saturada. Además al incrementarse el esfuerzo de confinamiento disminuye la

dilatancia, con excepción de la prueba saturada de compresión simple, donde se presenta muy poca dilatancia.



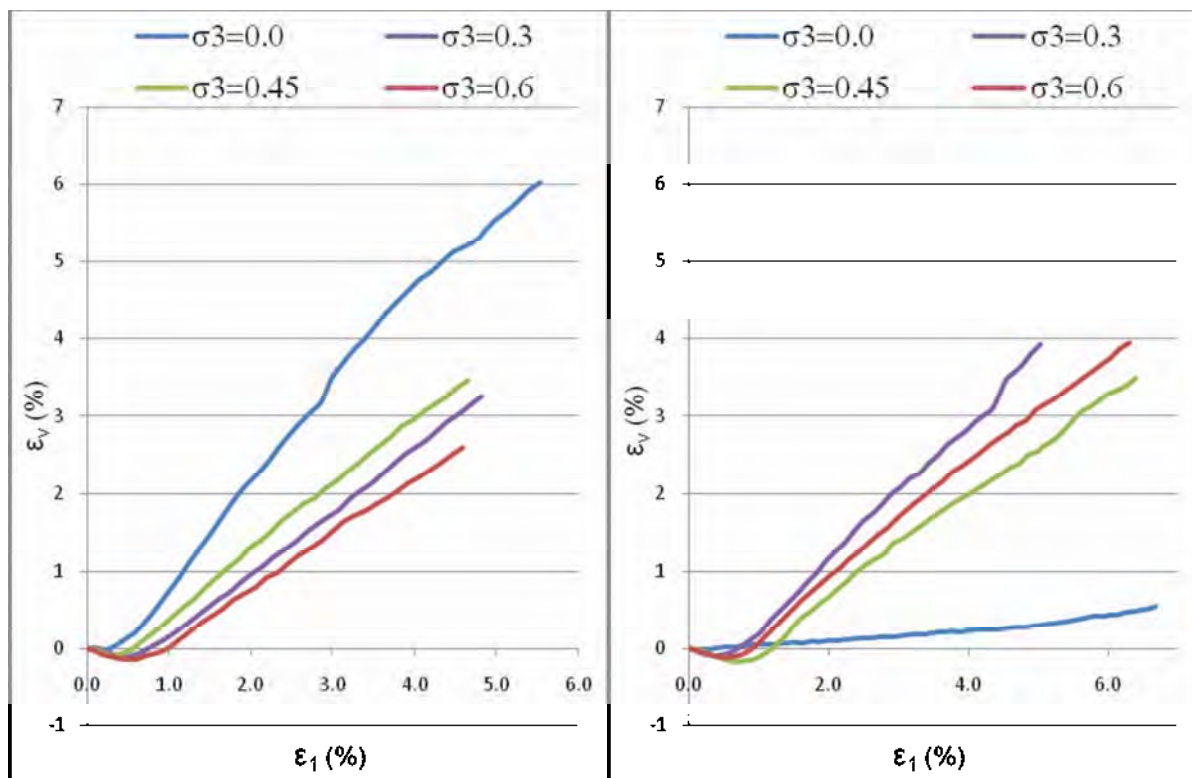


Figura IV.IV.I. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial

Las granulometrías del material, con granulometría inicial uniforme se muestran en el anexo VI.VIII, en las cuales no se observan cambios granulométricos considerables durante la compactación ni durante la prueba.

En la Figura IV.IV.I. 2 se observa que durante la compactación se presenta poca rotura de partículas, mientras que en las pruebas realizadas con bajo contenido de humedad se presenta la mayor rotura de partículas y en las pruebas saturadas es donde hay menos rotura de partículas.

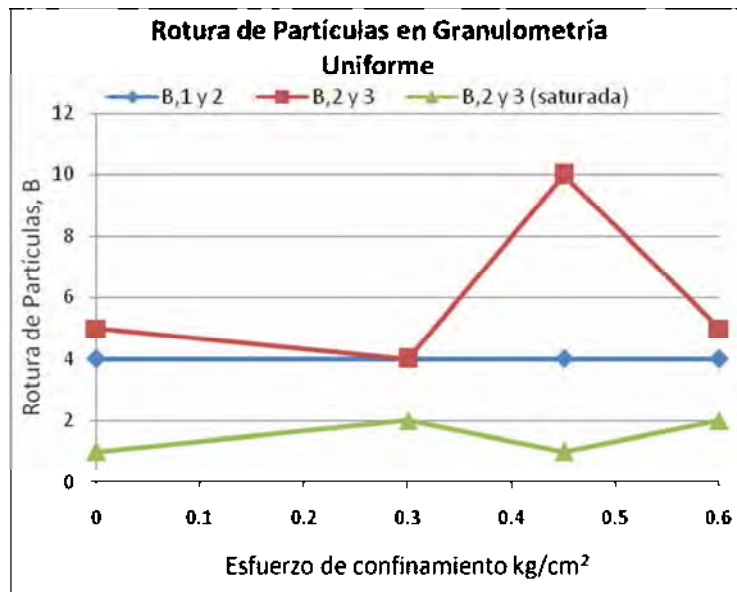


Figura IV.IV.I. 2.-Rotura de partículas

IV.IV.II Pruebas de compresión simple y triaxiales con granulometría bien graduada

En la Figura IV.IV.II. 1 se muestran las curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial, en las cuales se observa que al incrementarse el esfuerzo de confinamiento, aumenta el esfuerzo desviador. En las pruebas realizadas con bajo contenido de humedad se obtienen esfuerzos desviadores mayores que en las pruebas saturadas. Las pruebas, bajo las dos condiciones de humedad, no presentan mucha compresión ni dilatación.

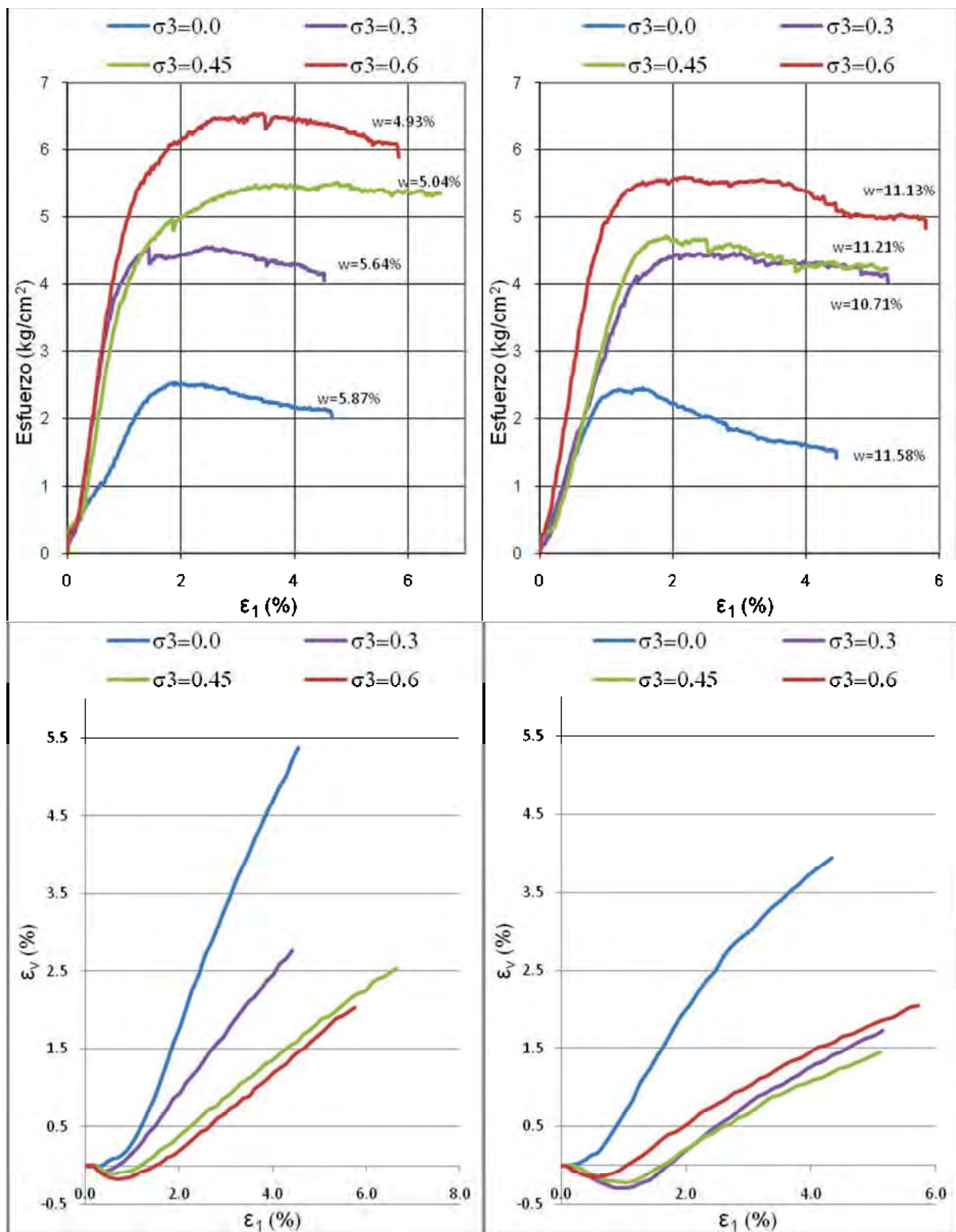


Figura IV.IV.II. 1.-Curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial

Las curvas granulométricas, con granulometría inicial bien graduada se muestran en el anexo VI.IX, en las cuales no se observan cambios considerables en las granulometrías del material.

En la Figura IV.IV.II. 2 se observa que durante la compactación es donde se presenta la menor rotura de partículas, mientras que en las pruebas de compresión simple se presenta la mayor rotura de partículas. Además al incrementarse el esfuerzo de confinamiento, aumenta la rotura de partículas.

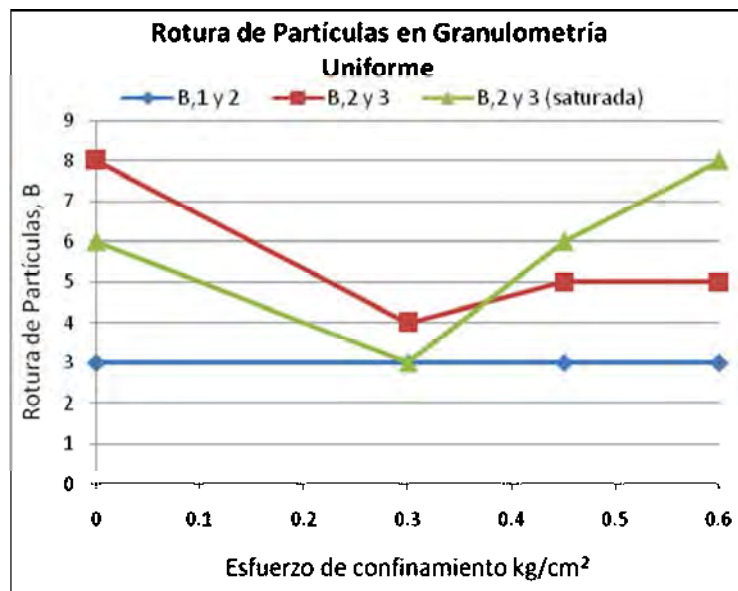


Figura IV.IV.II. 2.-Rotura de partículas

V. CONCLUSIONES

Los pavimentos en México presentan muchos problemas, como baches, agrietamientos y deformaciones. Una de las causas de estos problemas es la falta de conocimiento de los materiales.

El tezontle es un material muy abundante en la región de Morelia, debido a lo cual, se utiliza con mucha frecuencia en la conformación de las capas de la estructura del pavimento.

Debido a lo anterior y para poder mejorar la construcción de pavimentos, es necesario realizar estudios para conocer con más certidumbre el comportamiento del tezontle. Ya que no podemos quedarnos en decir que un material es bueno o mal, sino que hay que sustentarlo con pruebas.

Es importante mencionar que no se encuentra bibliografía referente a estudios del comportamiento físico y mecánico del tezontle, y éste es el primer trabajo donde se abordan estos estudios.

Además es la primera vez en que se utiliza una prensa Humboldt, con adquisición de datos en una computadora, para realizar pruebas triaxiales en tezontle. Aunado a lo anterior, por primera vez se realizaron mediciones de cambios de volumen, utilizando una bureta y panel de control desarrollado en el laboratorio de Mecánica de Suelos de esta Facultad de Ingeniería Civil. También se implementó la prueba de índice de carga puntual.

De los resultados obtenidos se tiene que el M-1 presentó menos porosidad que el M-2, el M-3 es el de mayor porosidad, mientras que el M-4 no presenta porosidad. Las partículas del M-4 son las que tienen mayor resistencia, seguidas del M-1, mientras que el M-3 es el de menor resistencia. Algo interesante que sucedió en la prueba de índice de carga puntual, es la forma en que fallaron las partículas del M-2 y M-3, donde hubo penetración de las puntas cónicas antes de llegar a la falla.

De los materiales de tezontle, el M-1 tiene un mayor peso específico y densidad de sólidos, mientras que el M-3 presenta el menor valor.

De lo anterior se observa que al incrementarse la densidad de sólidos y peso específico, también aumenta la resistencia. Así también, cuando el material tiene poca absorción, igualmente presenta poca porosidad y mayor peso específico.

En la etapa de compactación es donde se presenta mayor rotura de partículas, mientras que durante la prueba triaxial es muy poca ésta rotura. Además se presenta mayor rotura de partículas cuando se utiliza una granulometría uniforme.

El M-4 presenta muy poca rotura de partículas, siendo menor que en los otros materiales. En el M-1 también es muy poca la rotura de partículas, pero mayor que en el M-4. El M-2 presenta mucha rotura de partículas, mucho mayor que en los otros materiales. El M-3 a pesar de ser el que tiene mayor porosidad y menor resistencia de las partículas, no presenta tanta rotura de partículas, incluso es menor que en el M-1 en granulometría uniforme.

En general en las pruebas triaxiales el comportamiento fue el mismo. Al incrementarse la presión de confinamiento aumenta el esfuerzo desviador y disminuye la dilatación del material.

Las pruebas realizadas con granulometría bien graduada presentan un mejor comportamiento, resultando esfuerzos desviadores mayores que las realizadas con granulometría uniforme.

Respecto a las condiciones de humedad, se tiene que la resistencia en las pruebas realizadas con bajo contenido de humedad es mayor que en las pruebas donde se satura la muestra. Sin embargo resulta interesante que tanto en el M-3 como en el M-4, utilizando una granulometría uniforme, sucede lo contrario, ya que al saturar las muestras éstas presentan mayor resistencia que cuando tienen un bajo contenido de humedad.

En pruebas triaxiales resulta que la resistencia de los materiales decrece conforme aumenta su número, de tal forma se tiene que el M-1 es el de mayor resistencia, mientras que el M-4, que es el material triturado, presenta la menor resistencia.

En la prueba de compresión simple el M-2 es el que tiene mayor resistencia, tanto con granulometría uniforme como bien graduada, esto debido a la trabazón que existe entre las partículas. El M-3 también presenta mayor resistencia con granulometría uniforme que el M-1 y M-4, además que en prueba saturada tiene mayor resistencia que los otros materiales.

El M-4 no presentó mejor comportamiento que los materiales de tezontle, en las pruebas mecánicas de la masa granular.

Los cuatro materiales presentan varios minerales en porcentajes muy parecidos. El M-1 tiene un porcentaje mayor de silicio, lo que hace

que tenga mayor resistencia que el M-2 y M-3, y un porcentaje de aluminio muy parecido al contenido en los otros materiales.

La microestructura de los materiales muestra que al romperse, el M-2 presenta partículas de aproximadamente el mismo tamaño, mientras que en los otros materiales resultan partículas de gran variedad de tamaños.

Se deben realizar más estudios a los materiales utilizados en la construcción de pavimentos, y es evidente que este es solamente el comienzo.

Aún queda mucho trabajo por realizar, como es el conocer más acerca del tezontle. Queda el saber porque el M-3 y M-4 resiste más en prueba saturada con granulometría uniforme.

Otras líneas de investigación son el realizar pruebas de módulo resiliente, así como las mezclas asfálticas con tezontle.

BIBLIOGRAFÍA

Alarcó I. J., Apuntes del curso de Diseño de Pavimentos de la Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, 2007, Facultad de Ingeniería Civil UMSNH, Morelia Mich.

ASTM International D4767 – 04, "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils".

ASTM International D5731 – 05, "Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock".

Biblioteca Encarta 2005, elemento "Carretera".

Brown, S.F., (1994), "Behavior of Layered Systems Under Repetitive Loading", XIII ICSMFE, 1994, New Delhi, India.

Brown, S.F., (1996), "Soil mechanics in pavement engineering", Géotechnique 46, No. 3, 383 – 426

Bustamante O. F., 1996, "Estructuración de Vías Terrestres", Ed. CECSA, Segunda edición México.

Chávez C. (1996), "Rotura de partículas en materiales granulares", Tesis de Maestría UACH. México.

CFE, 1980, "Contribuciones a la Mecánica de Medios Granulares", Selección de trabajos de Raúl J. Marsal.

Garnica A.P., Gómez L.J.A., 2001, "Deformaciones permanentes en materiales granulares para la sección estructural de carreteras". Publicación Técnica No. 176 IMT, Sanfandila.

Grupo Apasco, Enero del 2000, "DE TRAZOS E INGENIO", INTRODUCCIÓN, ISBN, México, pag. 14.

Huang Yang H. (1993), "Pavement Analysis and Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Norma SCT, N-CMT-4-02-002-04, "Materiales para bases hidráulicas".

Norma SCT, M-MMP-1-01-03, "Muestreo de materiales para terracerías".

Norma SCT, M-MMP-1-04-03, "Contenido de agua".

Norma SCT, M-MMP-1-05-03, "Densidades relativas y absorción".

Norma SCT, M-MMP-1-06-03, "Granulometría de materiales compactables para terracerías".

Norma SCT, M-MMP-1-08-03, "Masas volumétricas y coeficientes de variación volumétrica".

Rico R. A., Téllez G. R., Garnica A. P., 1998, "Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias", Publicación Técnica No. 104 IMT, Sanfandila, Oro.

Tamari S., Samaniego D., et. al., (2005), "Particle Density of Volcanic Scoria Determined by Water Pycnometry", Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 4, pp. 1-7.

VI. ANEXOS

VI.I Mineralogía de los Materiales

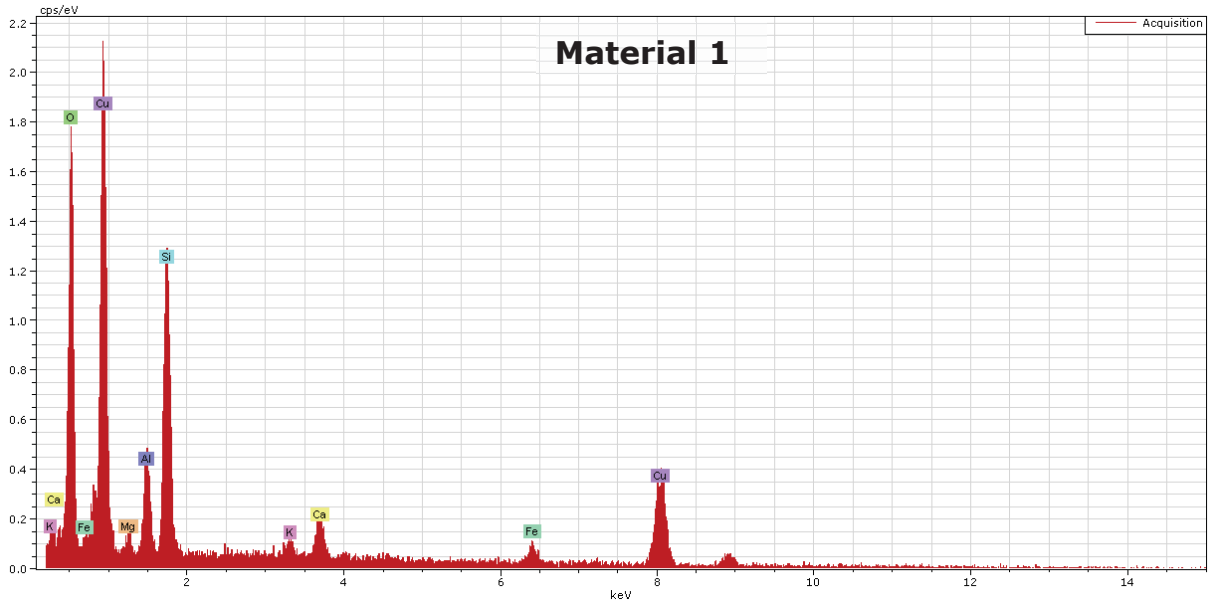


Figura VI.I. 1 Minerales presentes en el Material 1

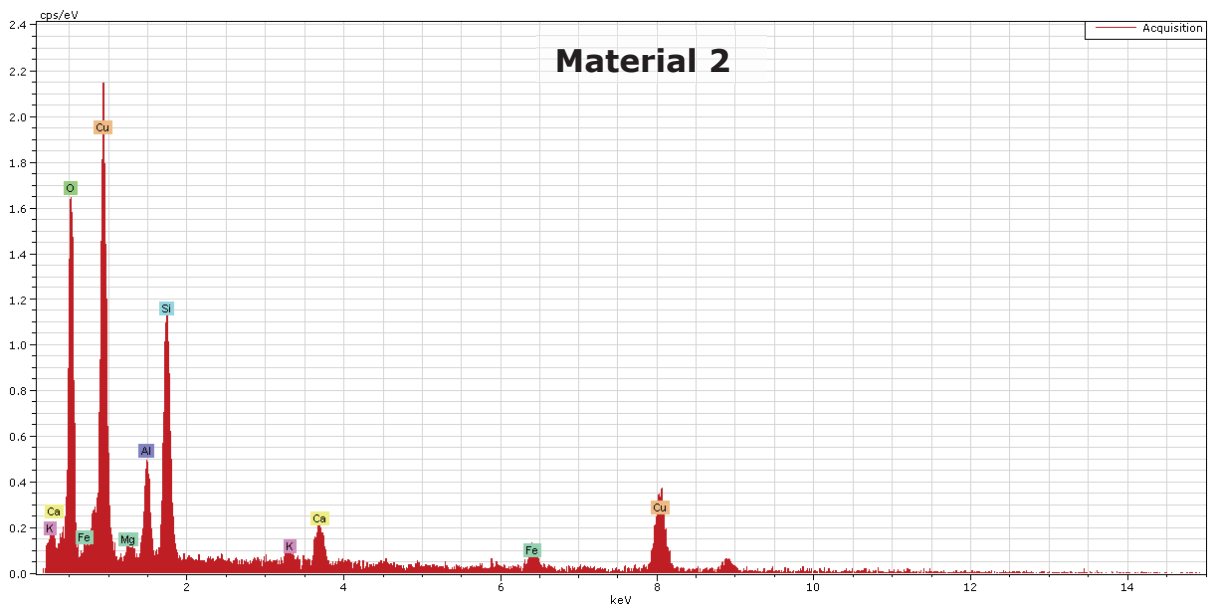


Figura VI.I. 2 Minerales presentes en el Material 2

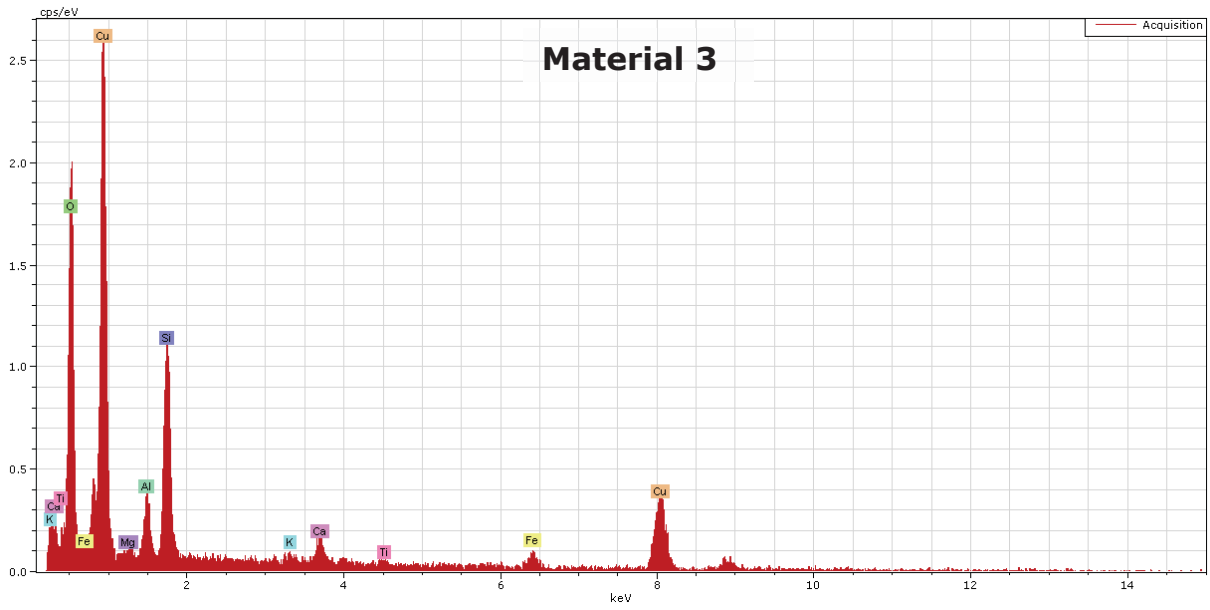


Figura VI.I. 3 Minerales presentes en el Material 3

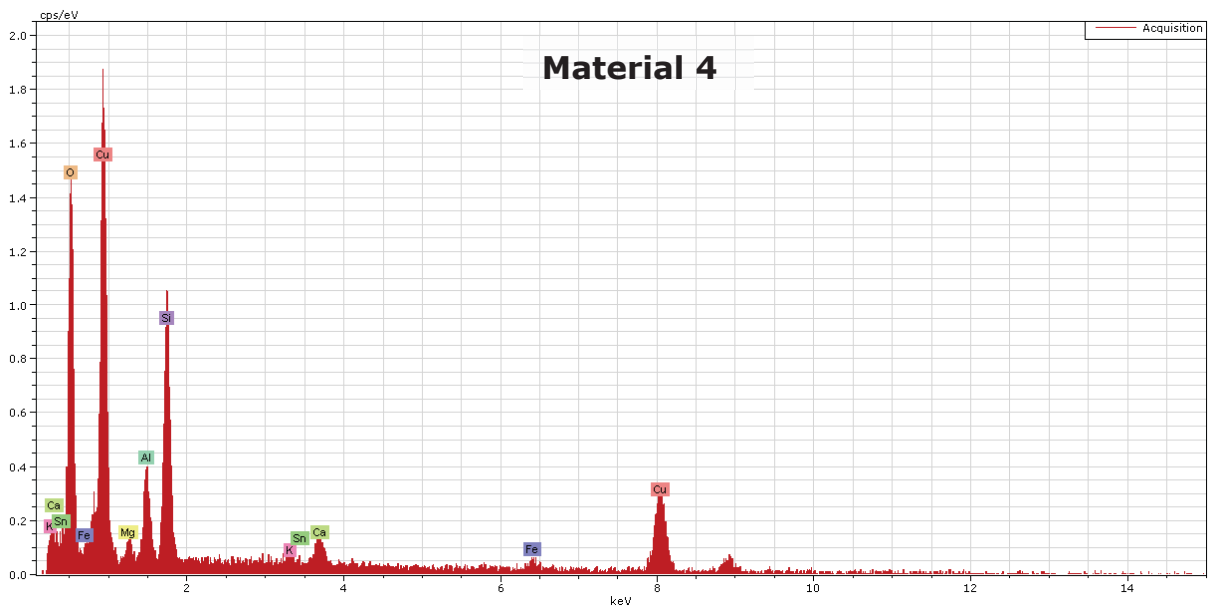


Figura VI.I. 4 Minerales presentes en el Material 4

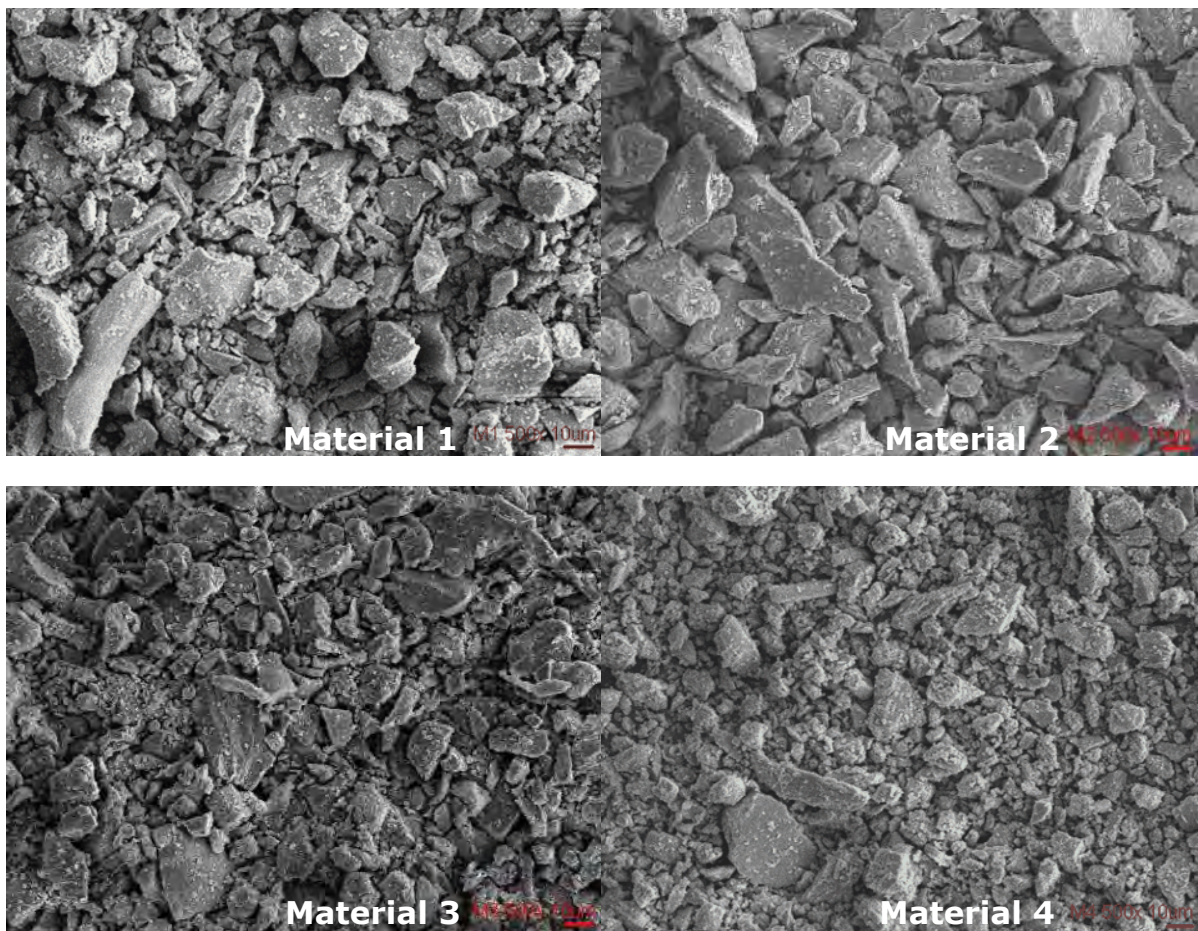


Figura VI.I. 5 Vista de la estructura de los materiales, en el microscopio electrónico de barrido

Tabla VI.I. 1 Porcentajes de los elementos que contienen los materiales

Elementos que contienen los materiales y su porcentaje				
Elemento	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
	C. norm. (wt %)			
Oxígeno	87.38	86.96	88.86	88.22
Aluminio	1.46	1.60	1.02	1.53
Silicio	5.07	5.01	4.65	4.83
Potasio	0.45	0.44	0.26	0.34
Calcio	1.61	1.88	1.24	1.11
Magnesio	0.11	0.14	0.10	0.20
Iron	3.91	3.97	3.23	3.07
Titanio	-----	-----	0.62	-----
Tin	-----	-----	-----	0.69
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

VI.II Granulometrías del Material 1, con granulometría inicial uniforme

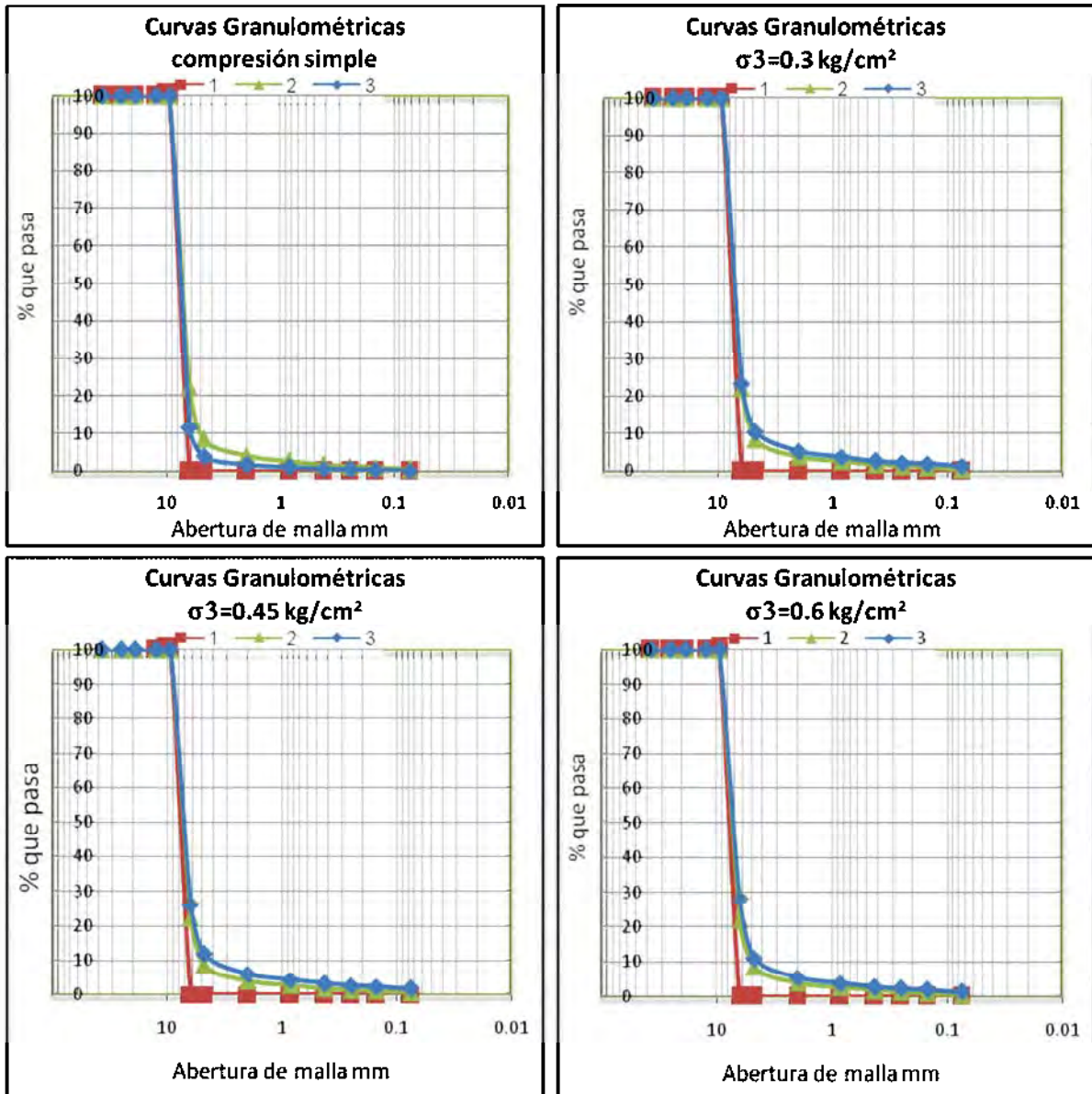


Figura VI.II. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra

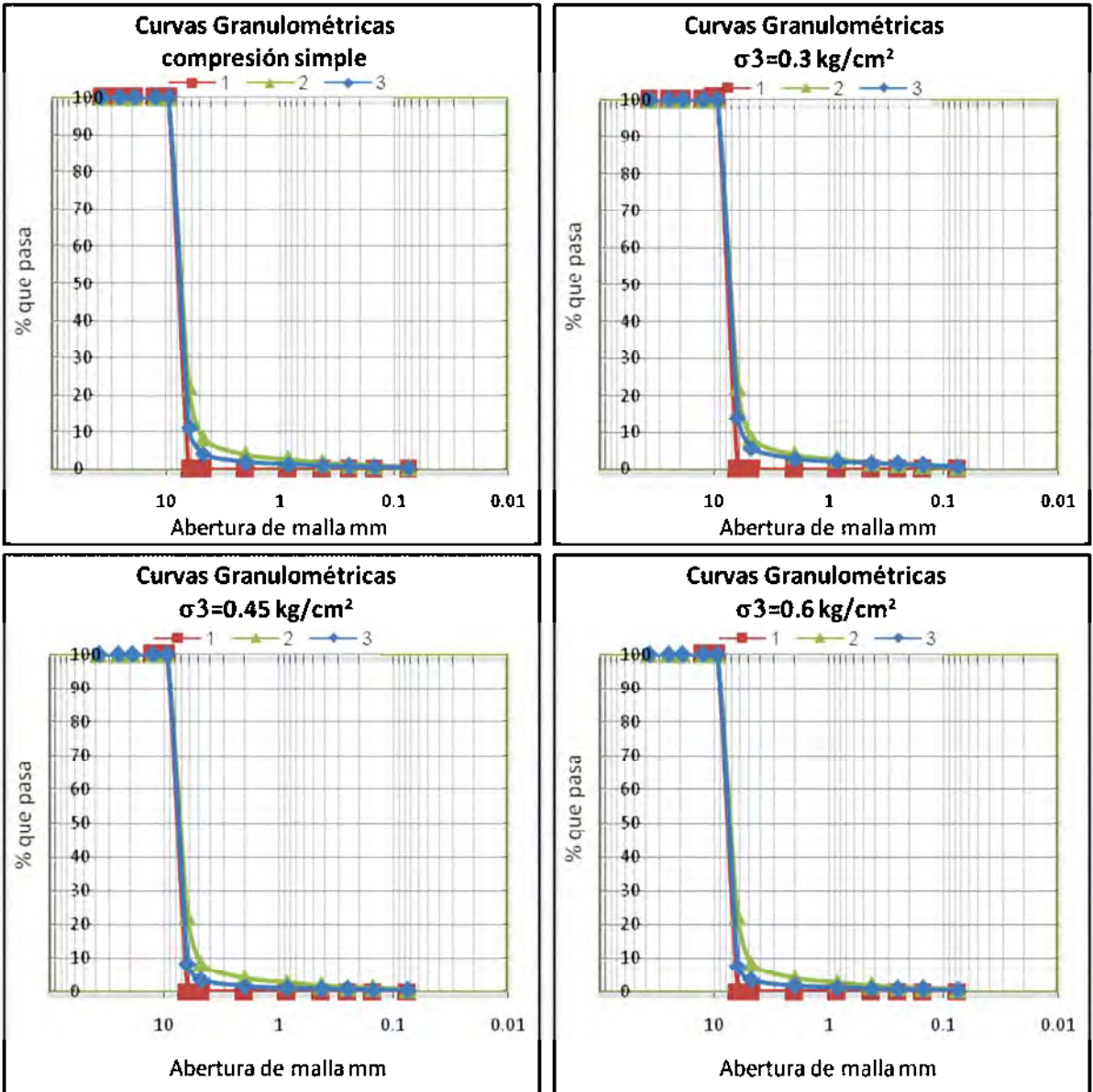


Figura VI.II. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra

VI.III Granulometrías del Material 1, con granulometría inicial bien graduada

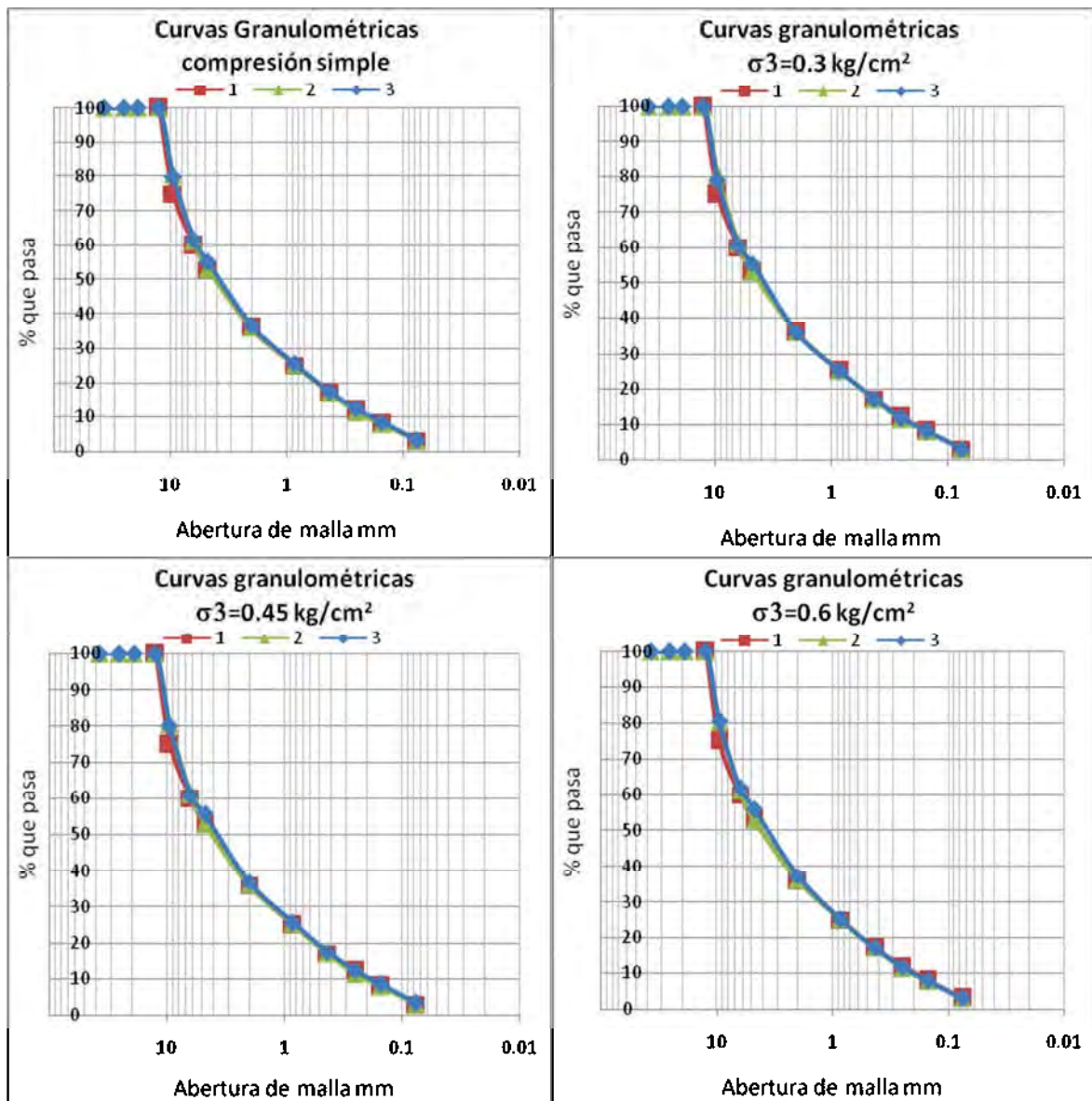


Figura VI.III. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra

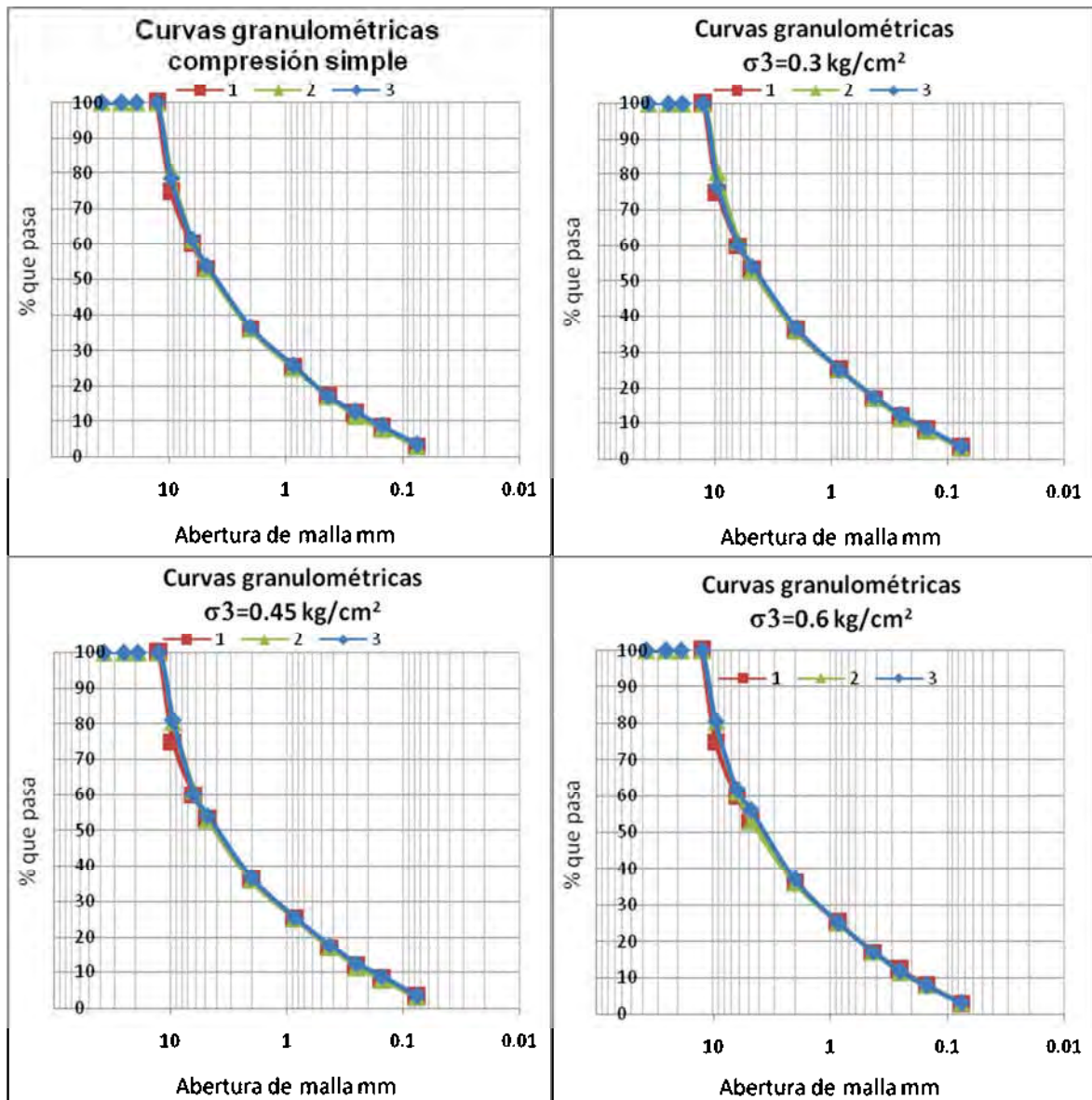


Figura VI.III. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra

VI.IV Granulometrías del Material 2, con granulometría inicial uniforme

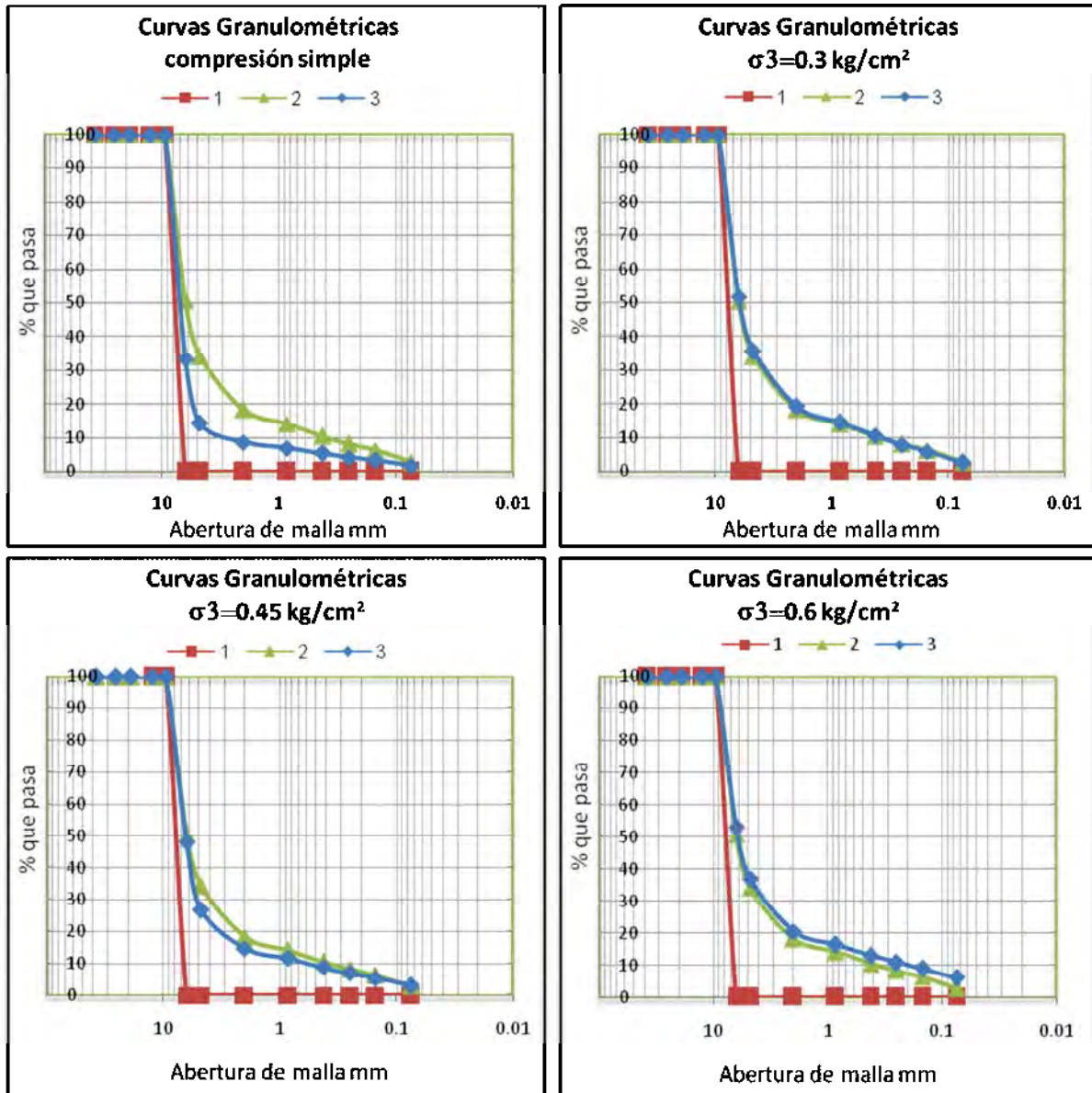


Figura VI.IV. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra

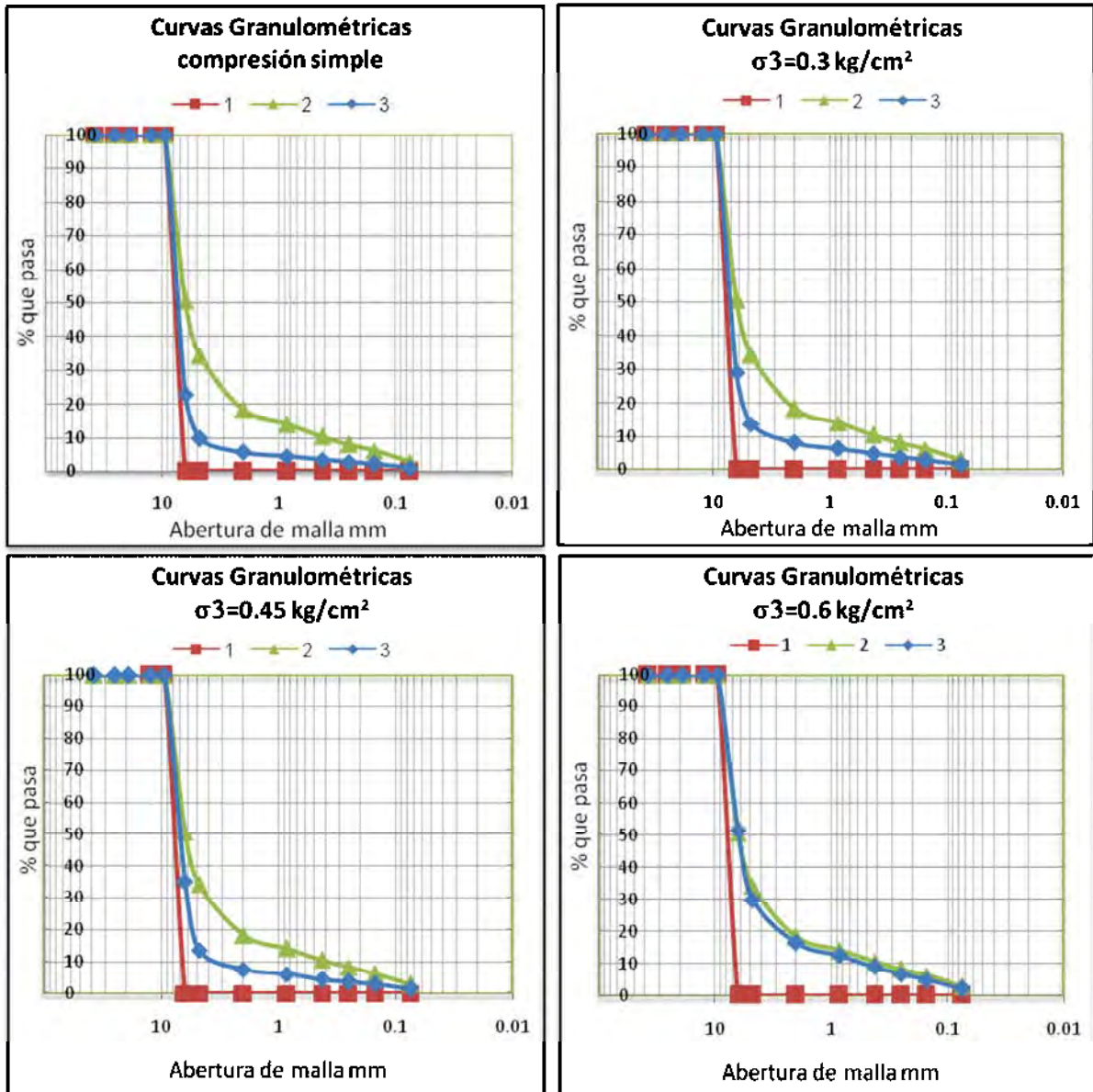


Figura VI.IV. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra

VI.V Granulometrías del Material 2, con granulometría inicial bien graduada

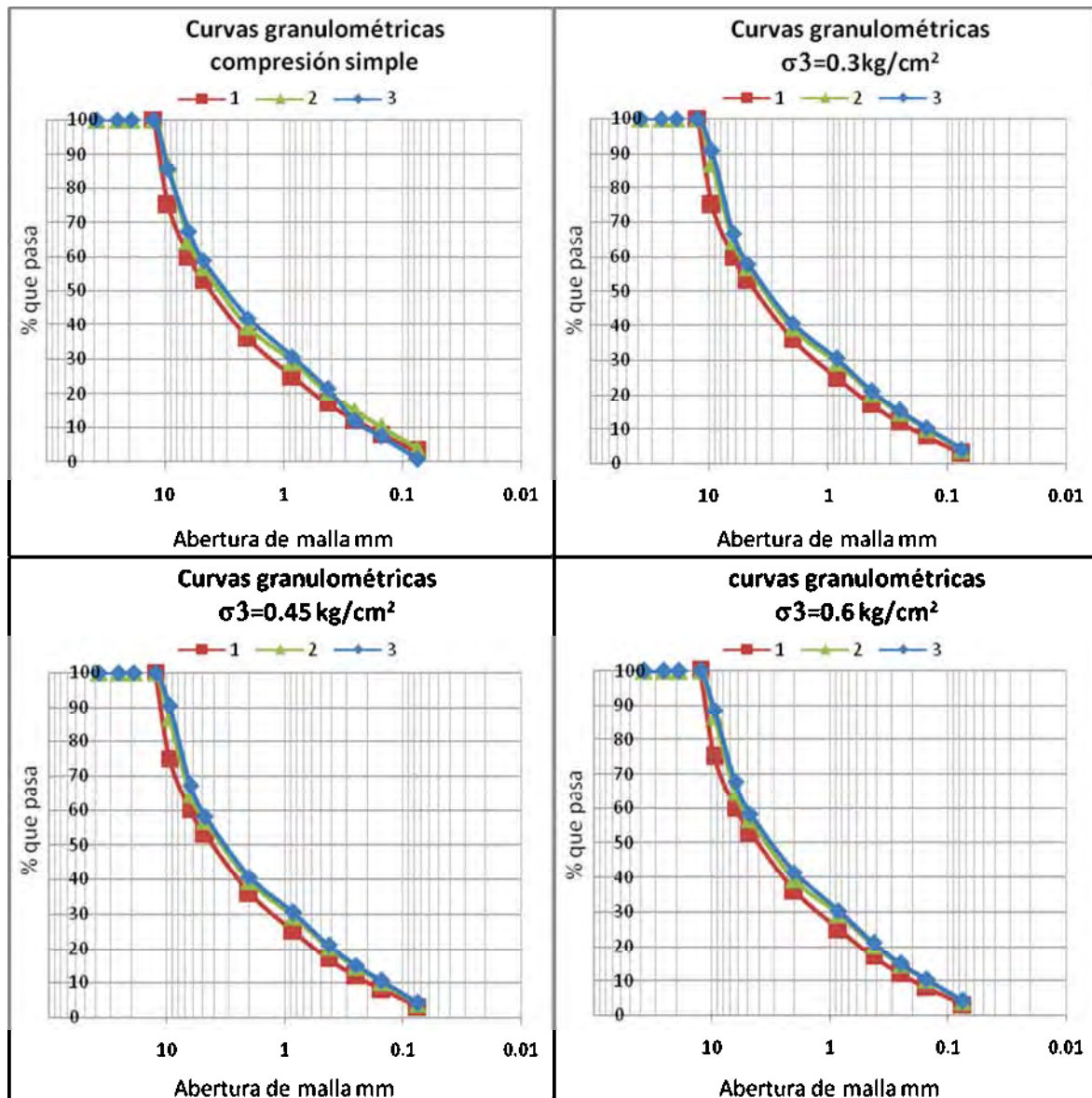


Figura VI.V. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra

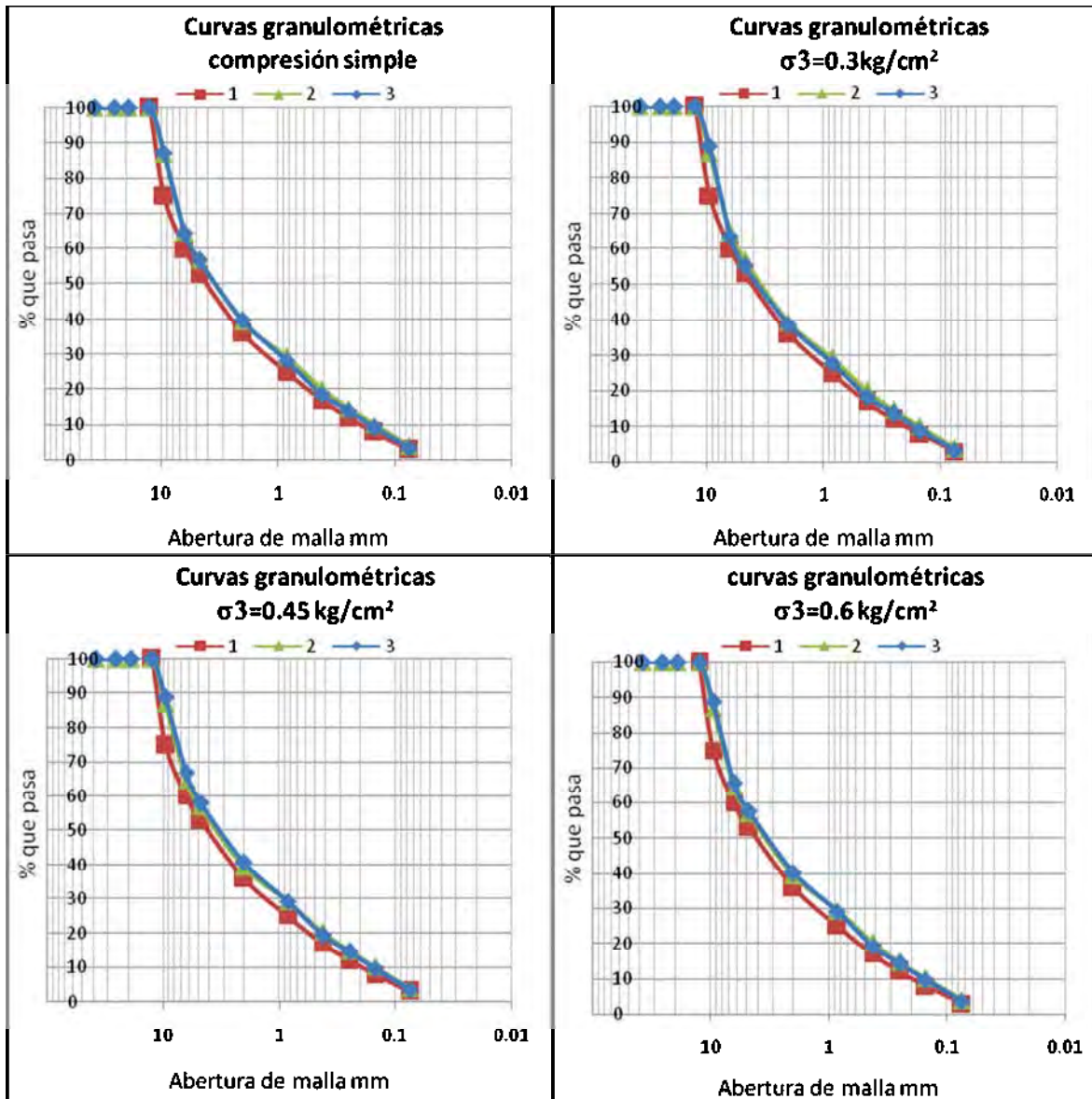


Figura VI.V. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra

VI.VI Granulometrías del Material 3, con granulometría inicial uniforme

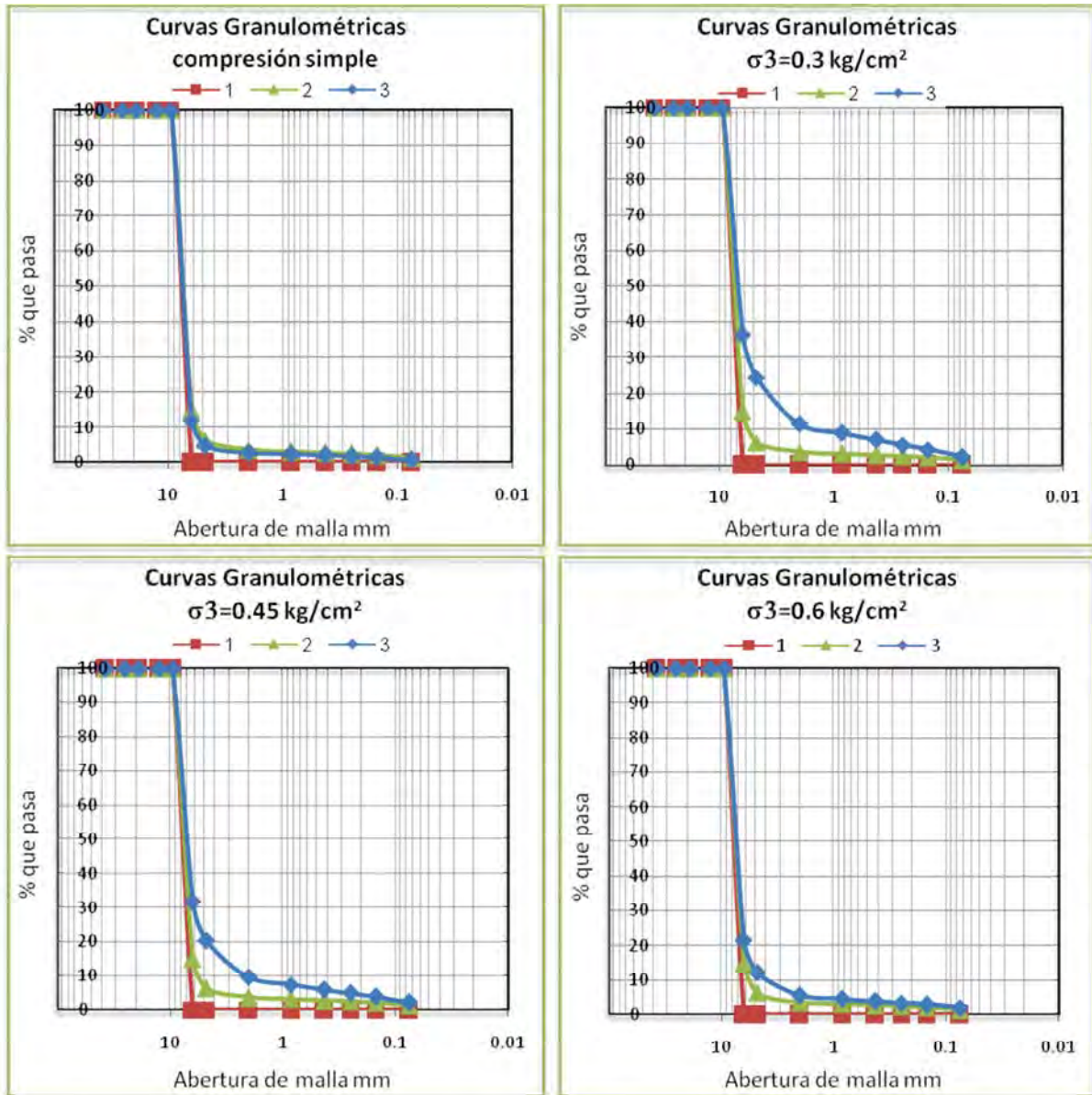


Figura VI.VI. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra

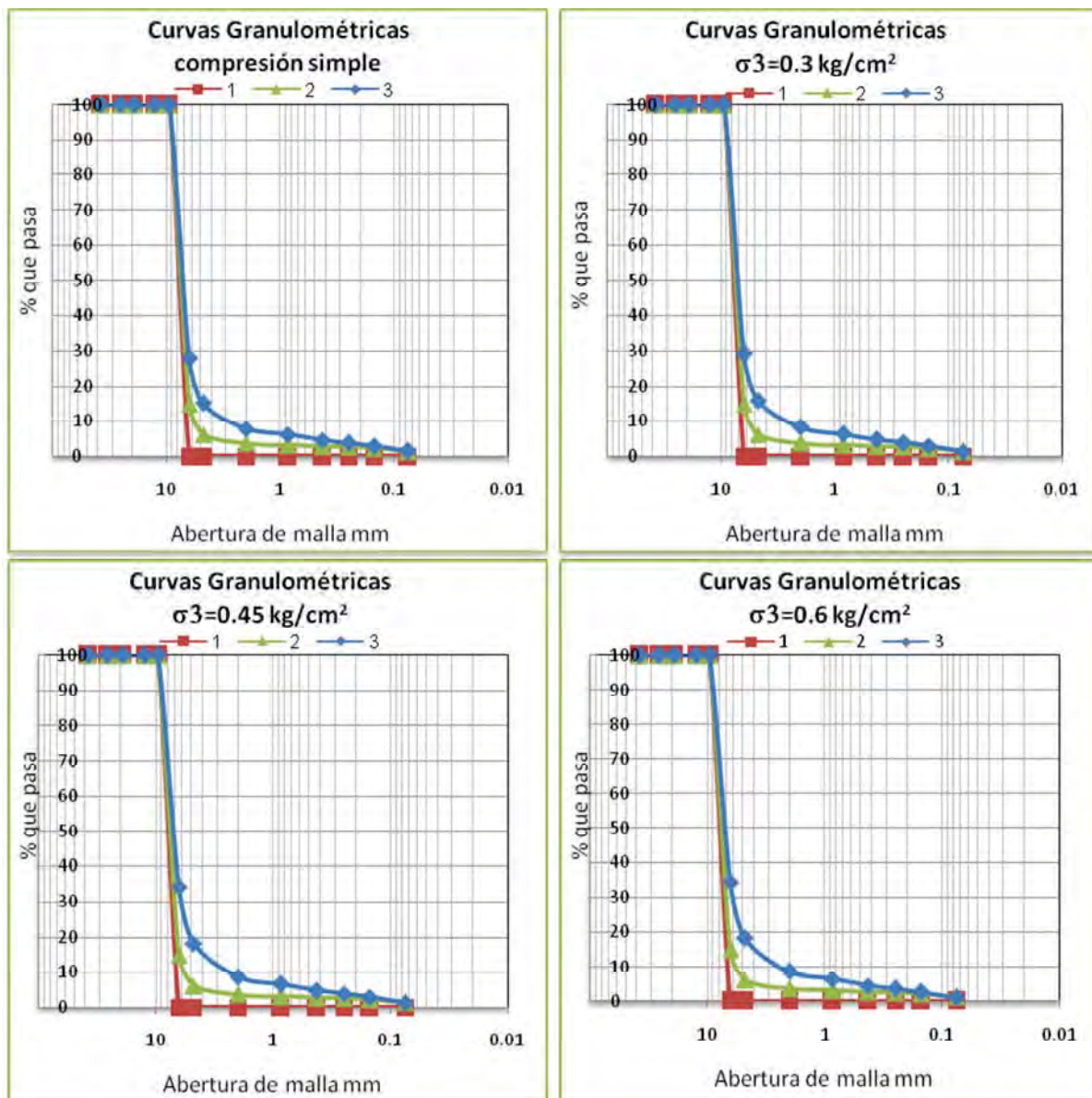


Figura VI.VI. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra

VI.VII Granulometrías del Material 3, con granulometría inicial bien graduada

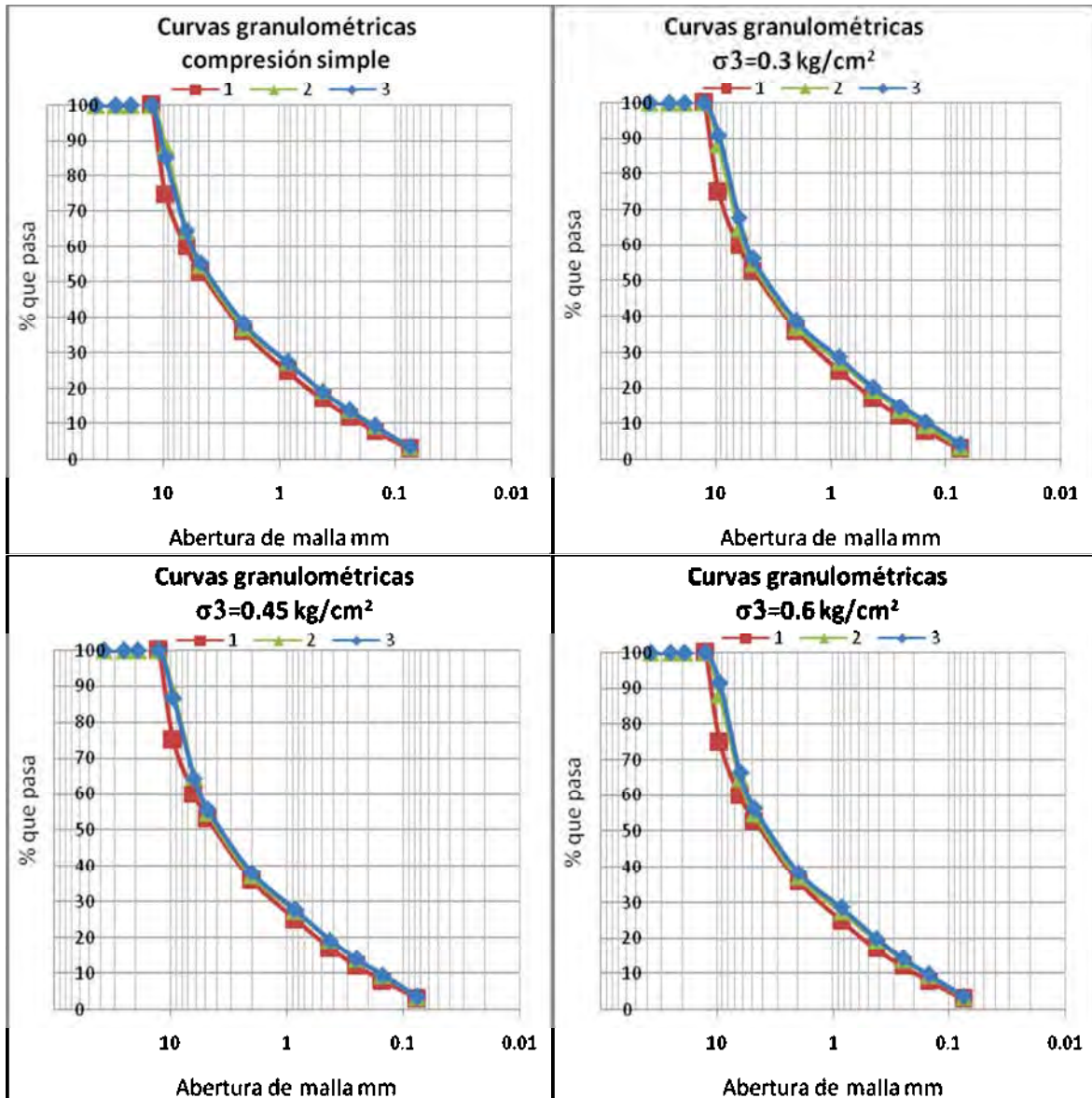


Figura VI.VII. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra

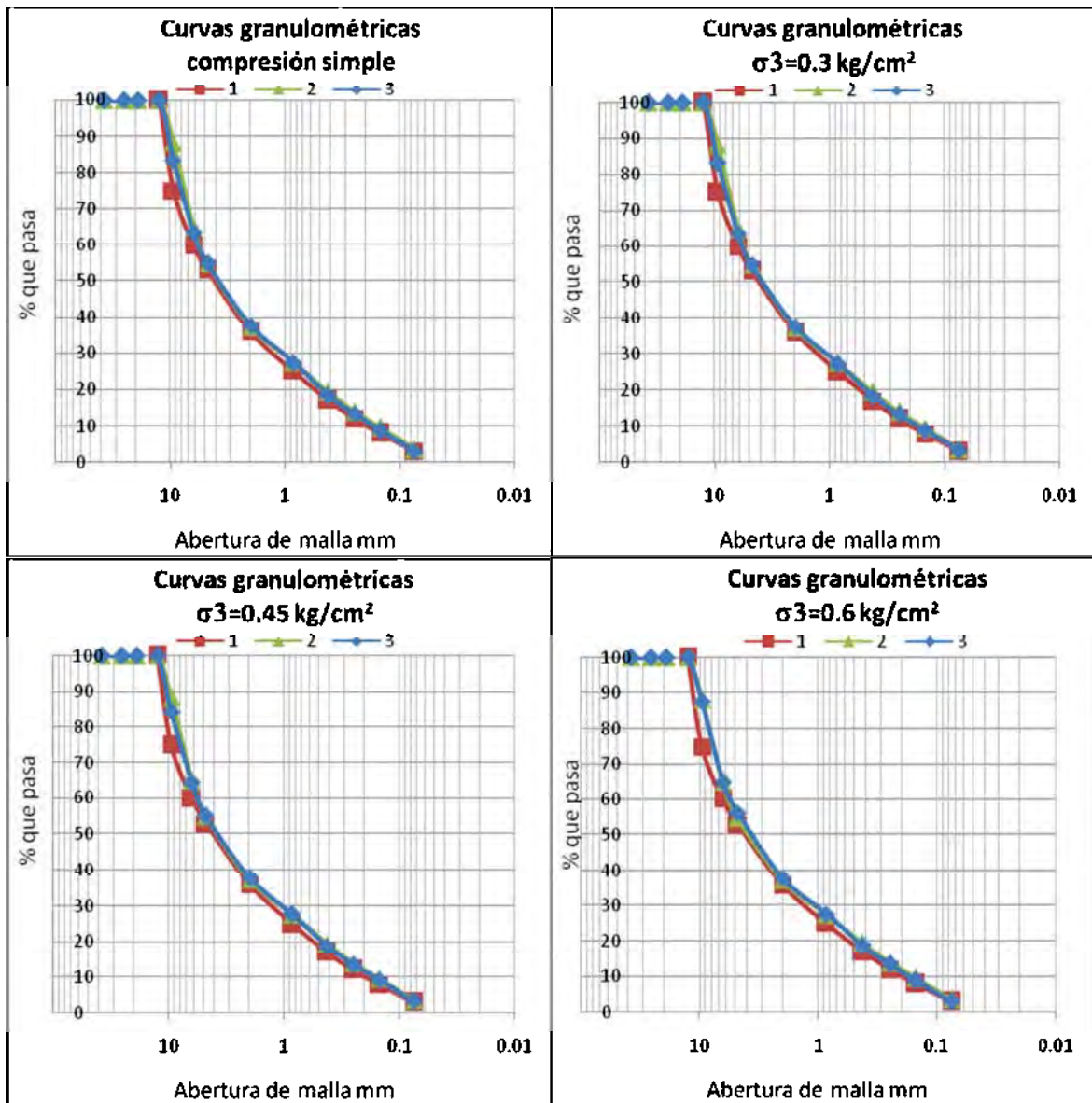


Figura VI.VII. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra

VI.VIII Granulometrías del Material 4, con granulometría inicial uniforme

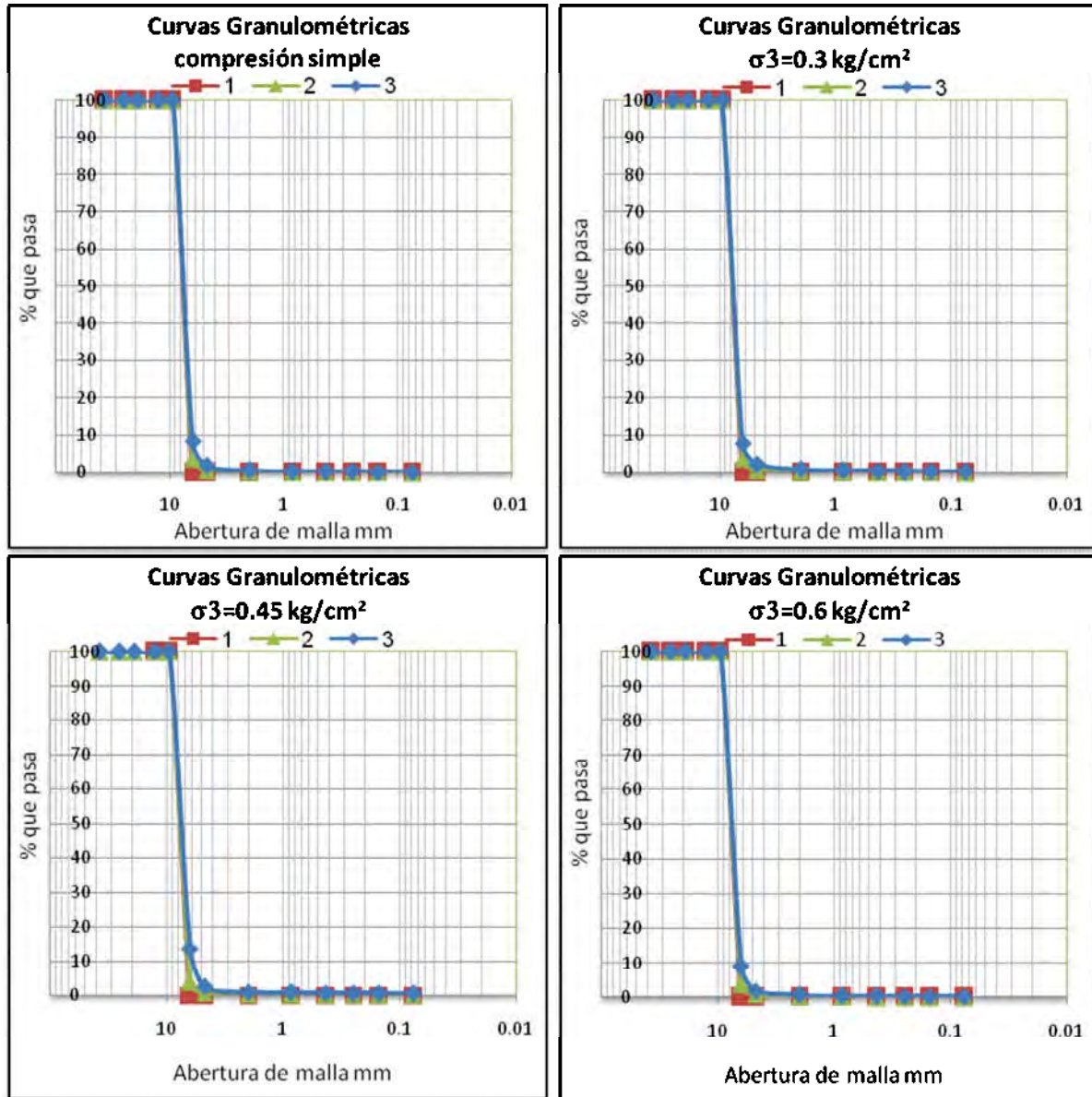


Figura VI.VIII. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra

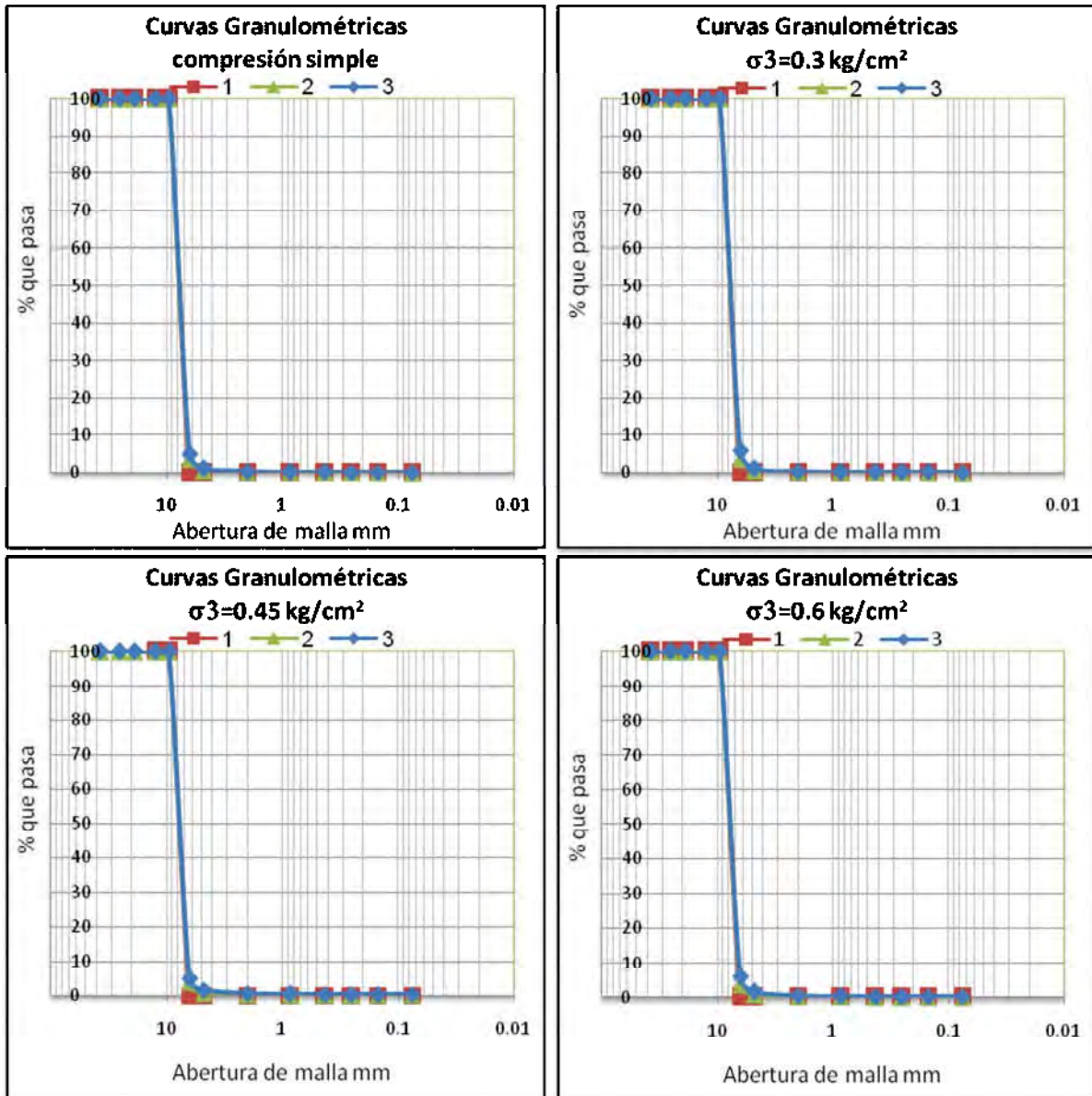


Figura VI.VIII. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra

VI.IX Granulometrías del Material 4, con granulometría inicial bien graduada

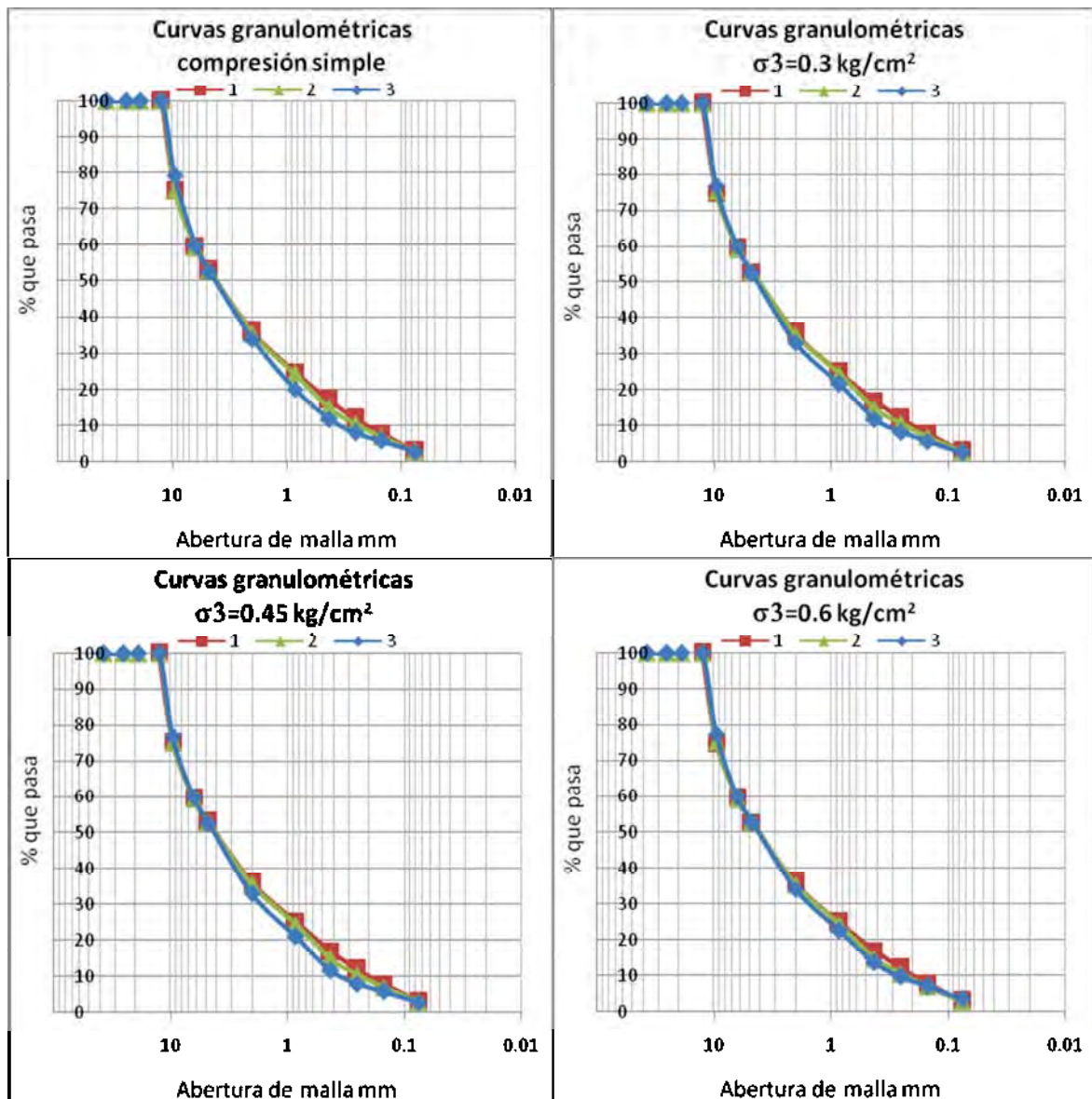


Figura VI.IX. 1.-Curvas granulométricas, sin saturar la muestra

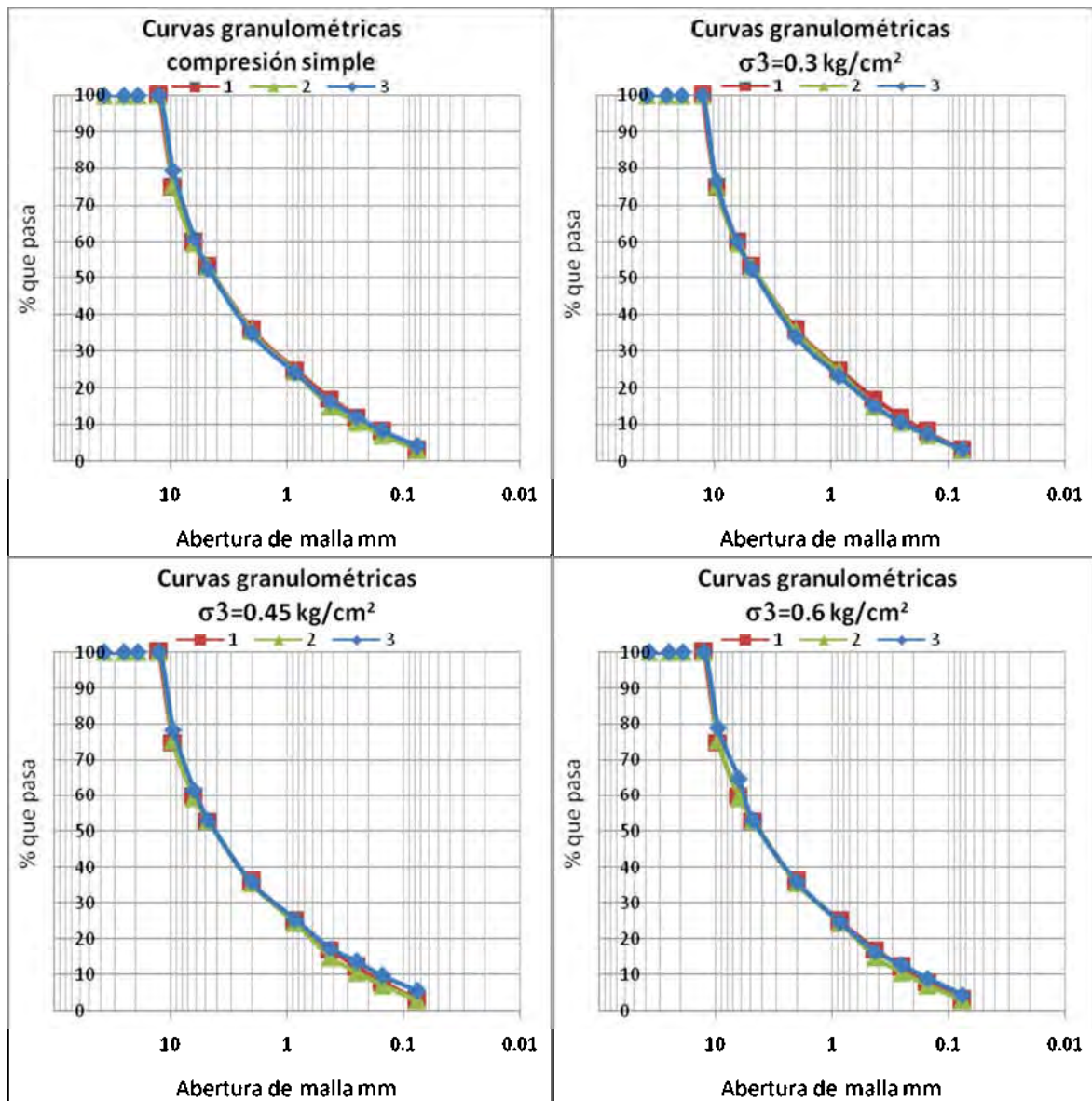


Figura VI.IX. 2.-Curvas granulométricas, saturando la muestra

VI.X Círculos de Mohr del Material 1

Tabla VI.X. 1 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-1, G-bGrad

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 1					
Granulometría bien graduada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	2.0329	1.766	4.0	$\phi = 61^\circ$ $C = 0.26 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	6.8510	1.767	4.02	
3	0.45	8.4731	1.769	4.11	
4	0.6	9.8041	1.767	4.04	

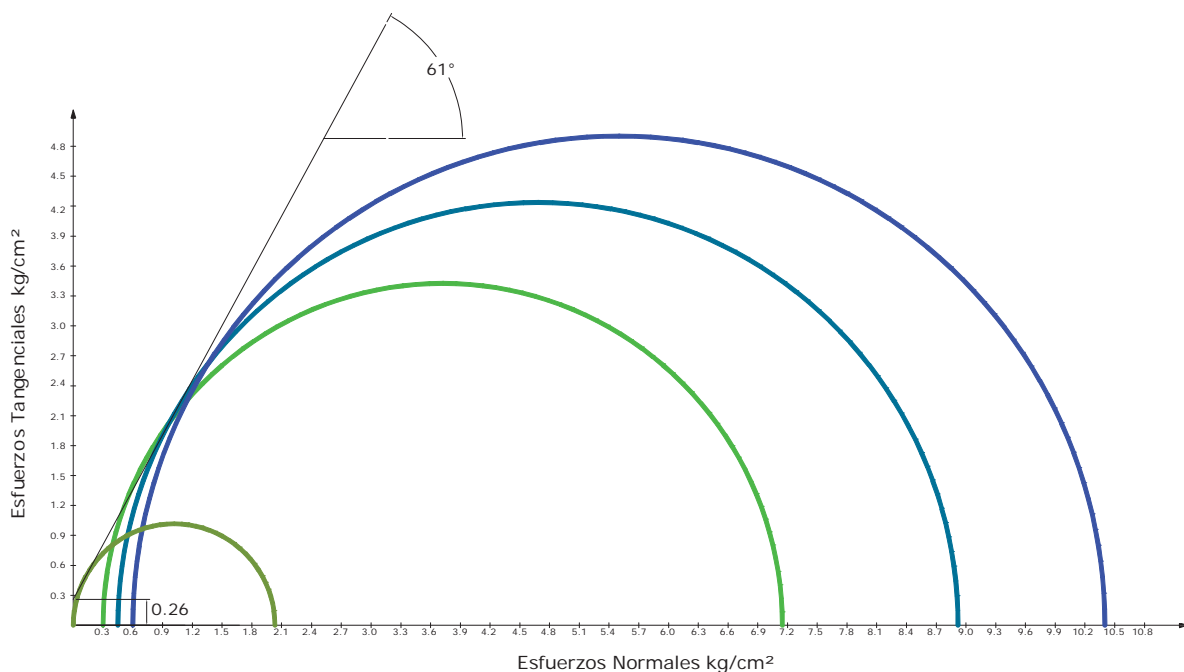


Figura VI.X. 1 Círculos de Mohr, M-1, G-bGrad

Tabla VI.X. 2 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-1, G-bGrad-Sat

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 1					
Granulometría bien graduada, saturada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	0.4737	1.959	15.56	$\phi = 62^\circ$ $C = 0.06 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	5.1594	1.941	14.3	
3	0.45	7.4405	1.928	13.47	
4	0.6	9.0126	1.920	12.95	

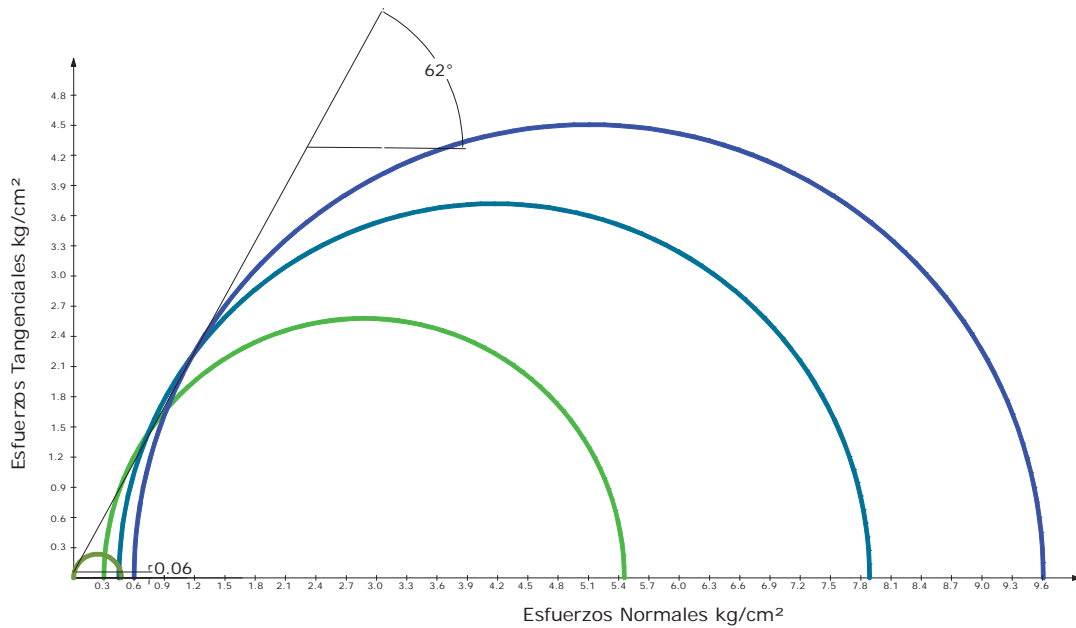


Figura VI.X. 2 Círculos de Mohr, M-1, G-bGrad-Sat

Tabla VI.X. 3 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-1, G-Unif

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 1					
Granulometría uniforme					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	0.7693	1.425	3.68	$\phi = 60^\circ$ $C = 0.10 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	5.5274	1.418	3.57	
3	0.45	8.6809	1.421	3.65	
4	0.6	8.6136	1.452	5.84	

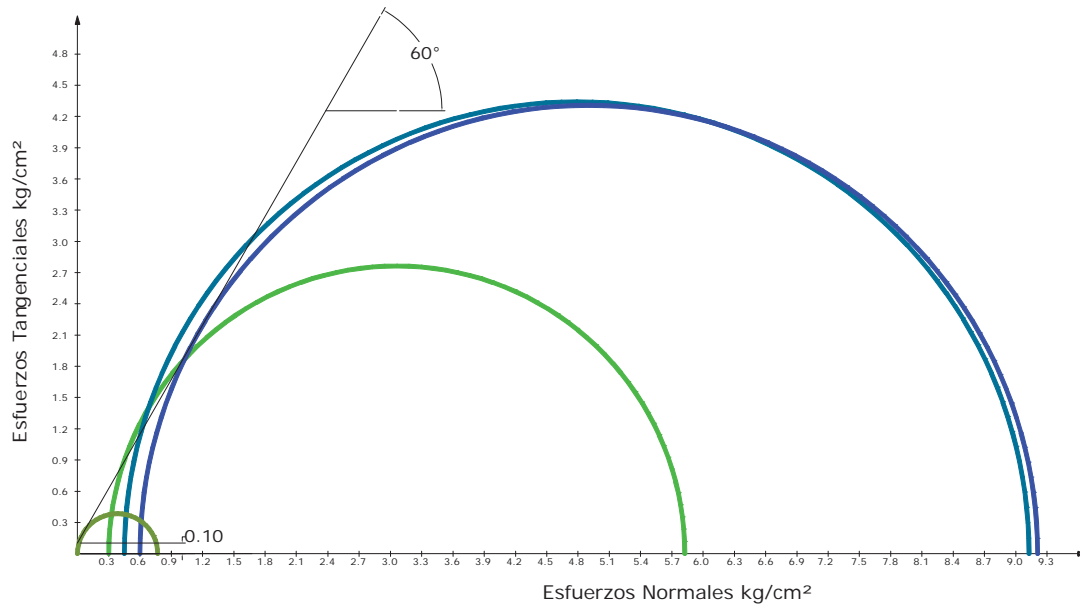


Figura VI.X. 3 Círculos de Mohr, M-1, G-Unif

Tabla VI.X. 4 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-1, G-Unif-Sat

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 1					
Granulometría uniforme, saturada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	0.2102	1.453	5.94	$\phi = 59^\circ$ $C = 0.03 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	4.6751	1.470	7.37	
3	0.45	6.5457	1.496	9.23	
4	0.6	7.4575	1.471	7.49	

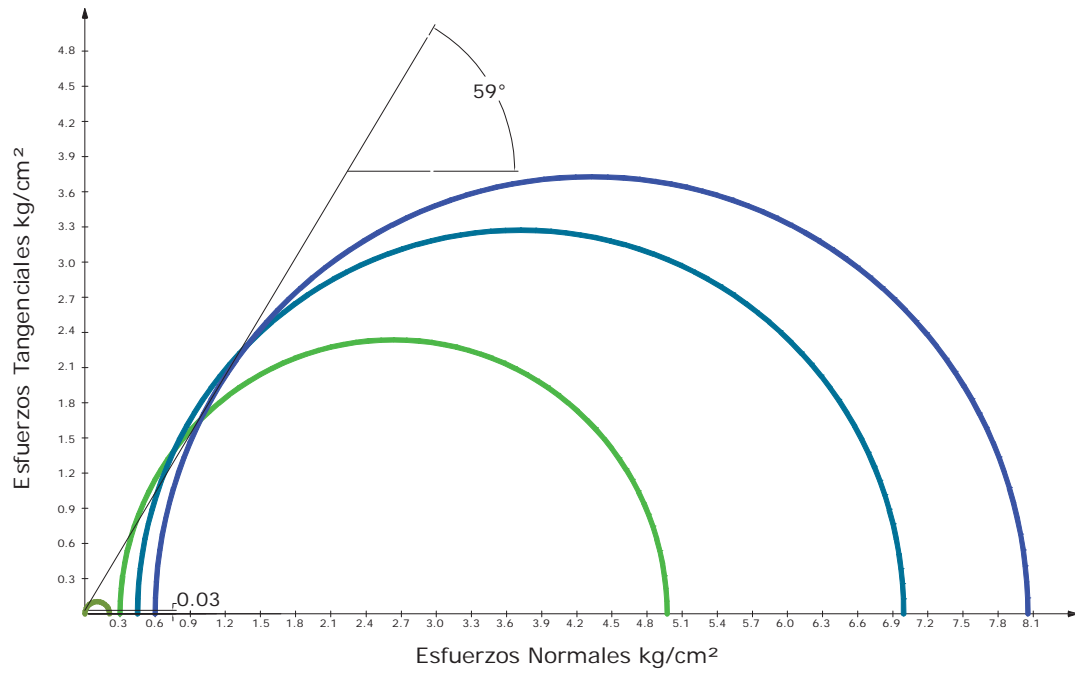


Figura VI.X. 4 Círculos de Mohr, M-1, G-Unif-Sat

VI.XI Círculos de Mohr del Material 2

Tabla VI.XI. 1 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-2, G-bGrad

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 2					
Granulometría bien graduada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	3.5577	1.233	3.89	$\phi = 55^\circ$ $C = 0.57 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	7.3749	1.231	3.90	
3	0.45	7.9455	1.233	4.10	
4	0.6	8.9016	1.234	4.08	

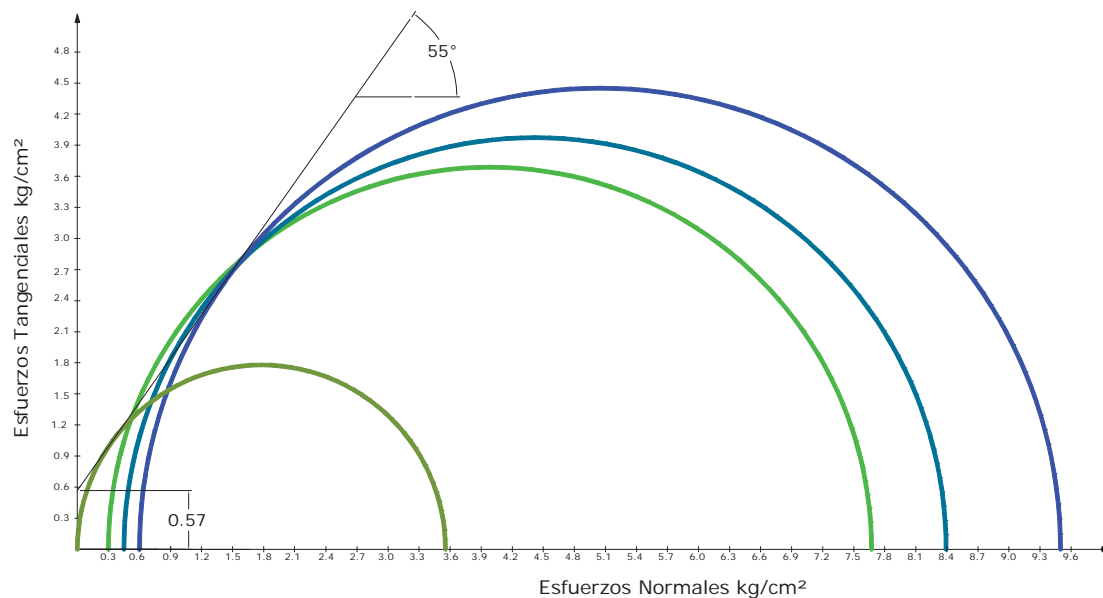


Figura VI.XI. 1 Círculos de Mohr, M-2, G-bGrad

Tabla VI.XI. 2 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-2, G-bGrad-Sat

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 2					
Granulometría bien graduada, saturada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	3.1598	1.540	29.12	$\phi = 52^\circ$ $C = 0.54 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	6.6192	1.558	26.91	
3	0.45	7.4632	1.533	28.67	
4	0.6	7.6757	1.544	29.66	

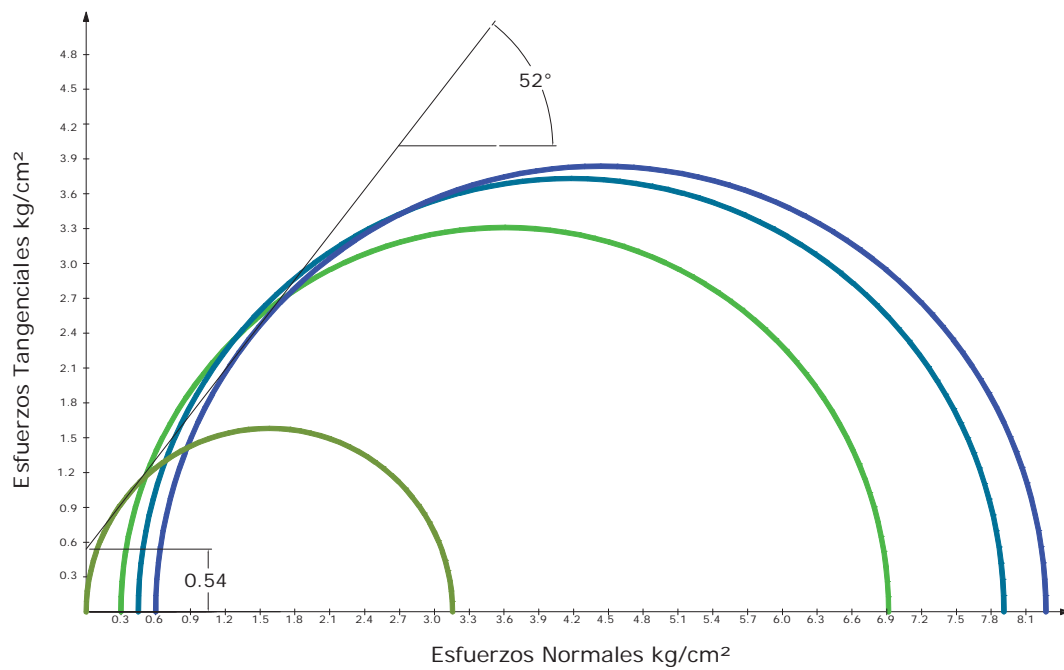


Figura VI.XI. 2 Círculos de Mohr, M-2, G-bGrad-Sat

Tabla VI.XI. 3 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-2, G-Unif

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 2					
Granulometría uniforme					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	2.4113	0.996	4.06	$\phi = 47^\circ$ $C = 0.47 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	5.4834	0.991	4.58	
3	0.45	5.5121	1.042	4.55	
4	0.6	5.7090	1.005	4.51	

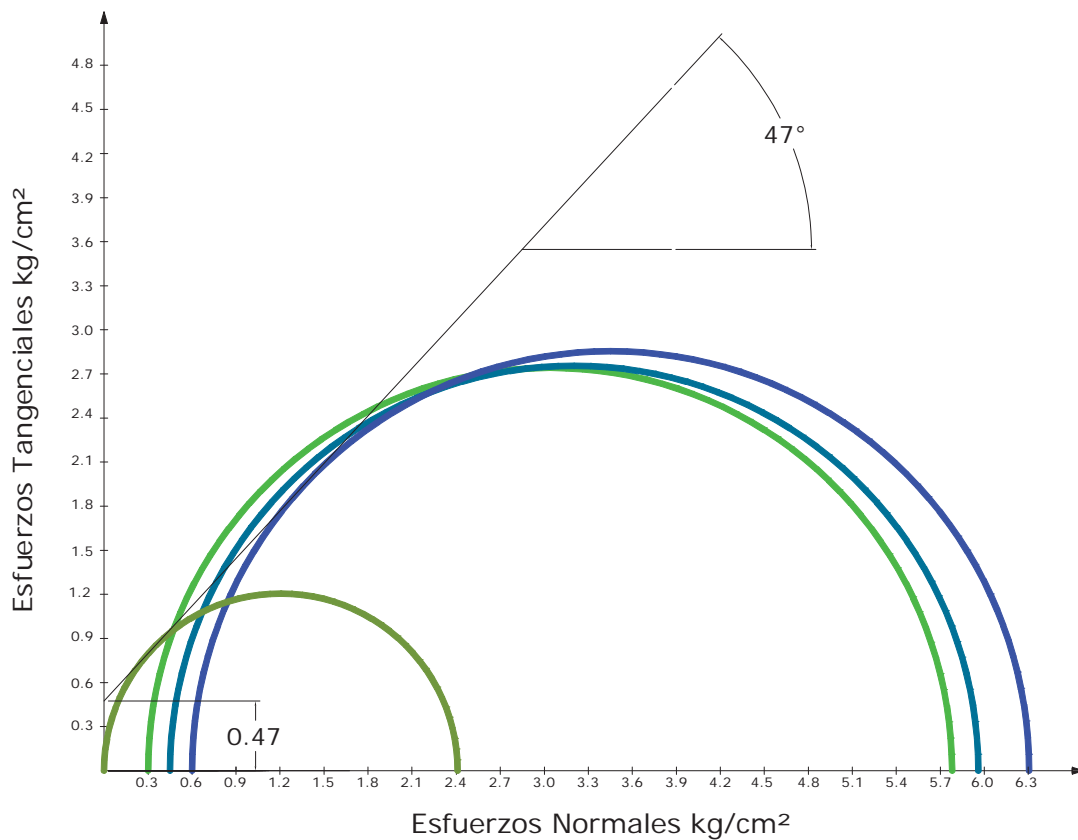


Figura VI.XI. 3 Círculos de Mohr, M-2, G-Unif

Tabla VI.XI. 4 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-2, G-Unif-Sat

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 2					
Granulometría uniforme, saturada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	1.7793	1.138	19.17	$\phi = 54^\circ$ $C = 0.29 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	4.8755	1.162	21.78	
3	0.45	5.3372	1.167	22.37	
4	0.6	6.7255	1.260	32.51	

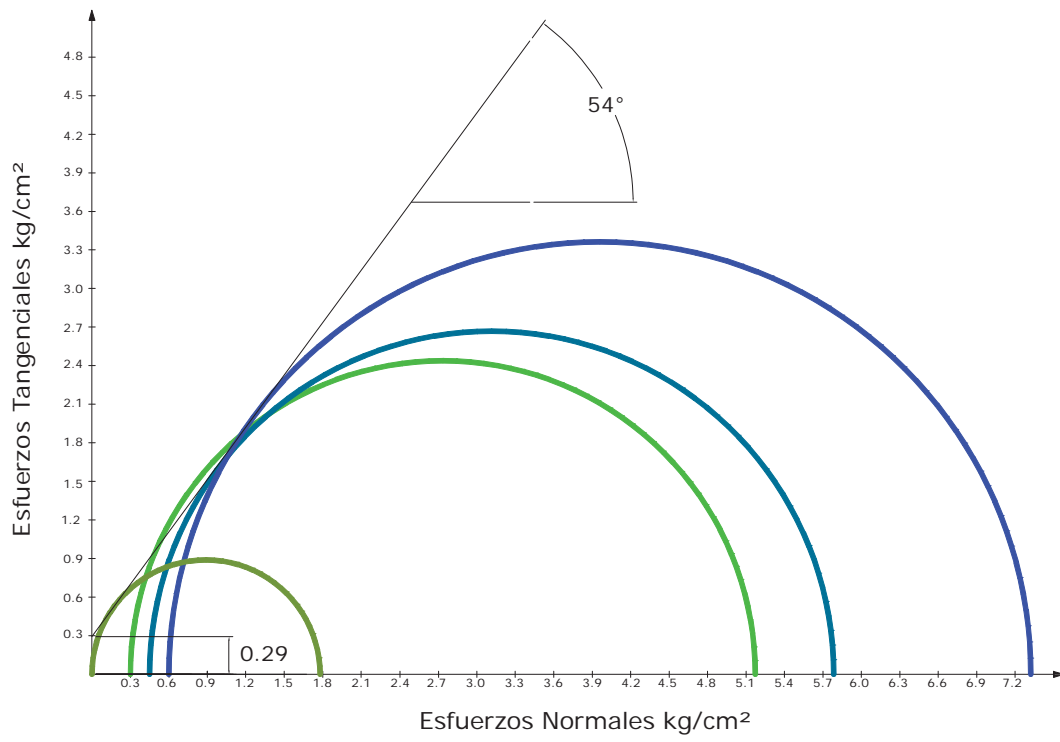


Figura VI.XI. 4 Círculos de Mohr, M-2, G-Unif-Sat

VI.XII Círculos de Mohr del Material 3

Tabla VI.XII. 1 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-3, G-bGrad

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 3					
Granulometría bien graduada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	1.7795	1.216	4.14	$\phi = 58^\circ$ $C = 0.26 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	6.6053	1.213	4.11	
3	0.45	6.6351	1.217	4.28	
4	0.6	8.4475	1.217	4.48	

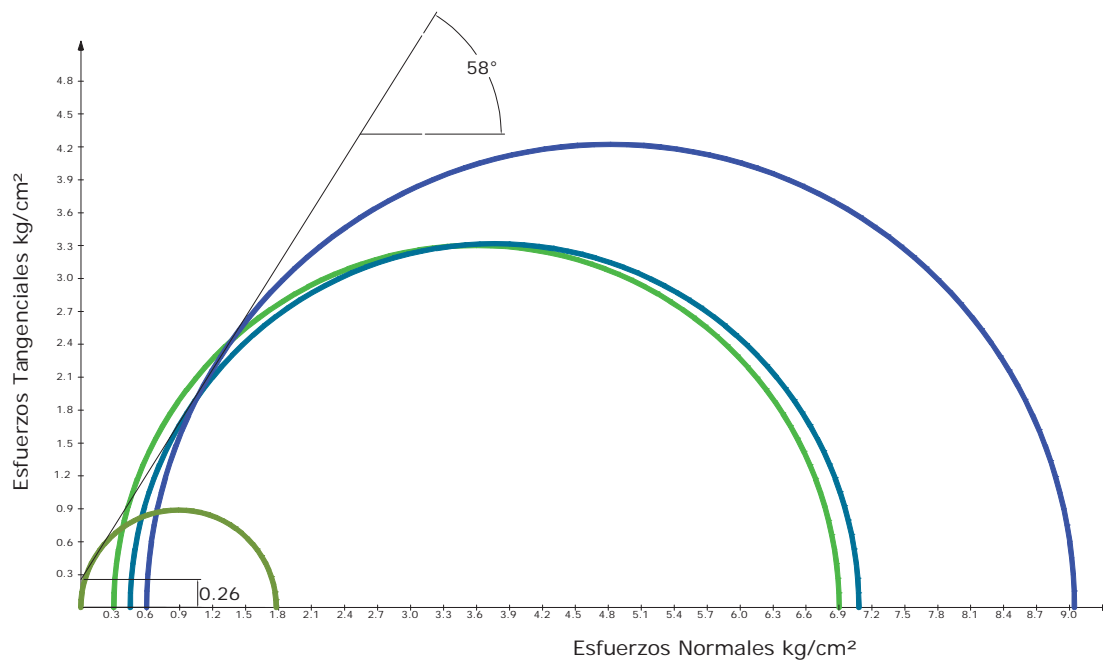


Figura VI.XII. 1 Círculos de Mohr, M-3, G-bGrad

Tabla VI.XII. 2 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-3, G-bGrad-Sat

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 3					
Granulometría bien graduada, saturada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	2.8935	1.536	30.60	$\phi = 52^\circ$ $C = 0.49 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	5.1774	1.519	28.37	
3	0.45	6.2568	1.522	28.86	
4	0.6	7.4218	1.530	29.89	

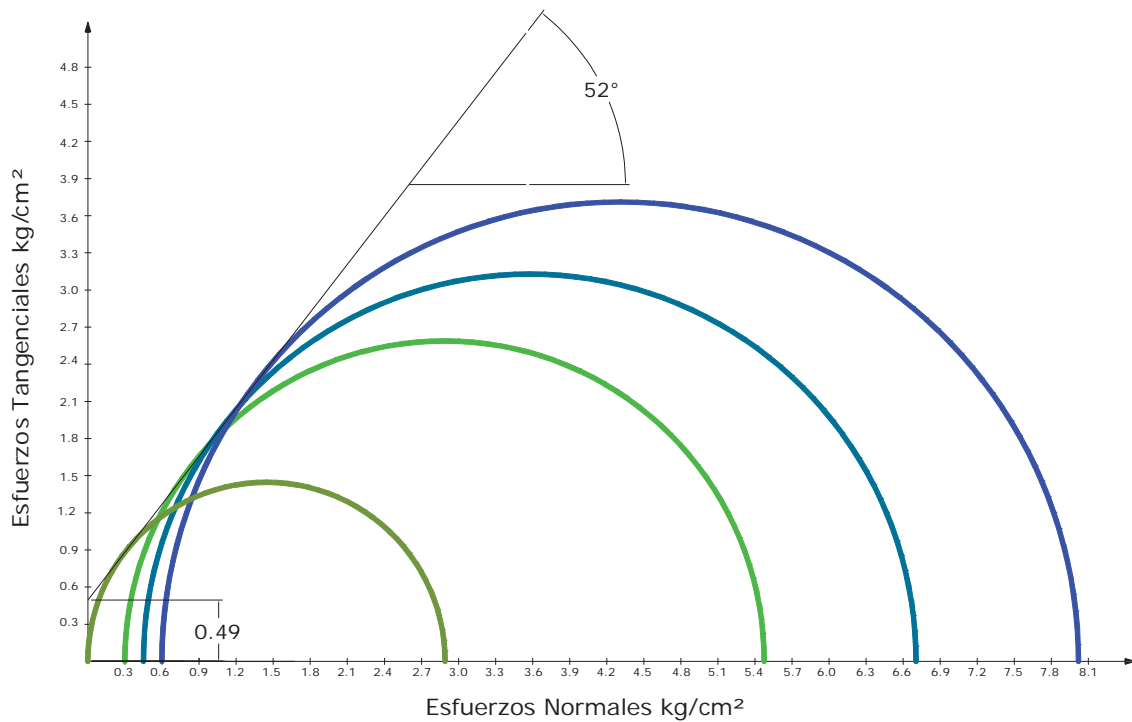


Figura VI.XII. 2 Círculos de Mohr, M-3, G-bGrad-Sat

Tabla VI.XII. 3 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-3, G-Unif

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 3					
Granulometría uniforme					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	1.5280	0.985	4.35	$\phi = 50^\circ$ $C = 0.28 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	4.8775	0.990	4.86	
3	0.45	5.3119	0.985	4.64	
4	0.6	5.4360	0.987	5.02	

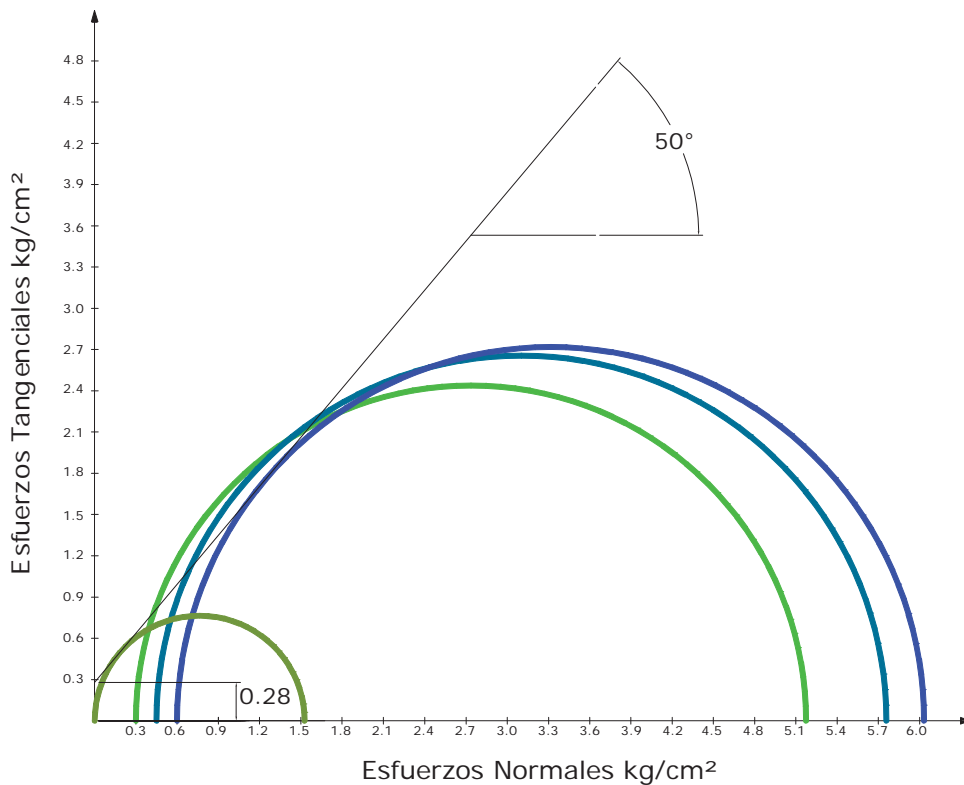


Figura VI.XII. 3 Círculos de Mohr, M-3, G-Unif

Tabla VI.XII. 4 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-3, G-Unif-Sat

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 3					
Granulometría uniforme, saturada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	3.0583	1.094	16.38	$\phi = 49^\circ$ $C = 0.57 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	6.1343	1.167	24.43	
3	0.45	6.3772	1.177	26.16	
4	0.6	6.7295	1.175	25.79	

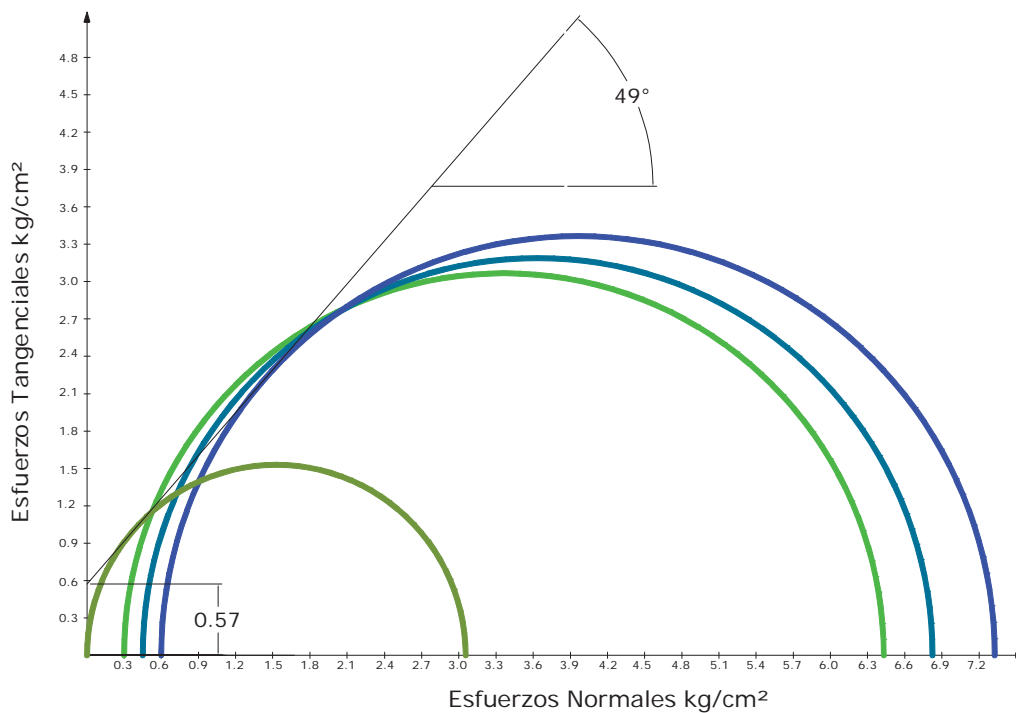


Figura VI.XII. 4 Círculos de Mohr, M-3, G-Unif-Sat

VI.XIII Círculos de Mohr del Material 4

Tabla VI.XIII. 1 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-4, G-bGrad

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 4					
Granulometría bien graduada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	2.5195	2.037	5.87	$\phi = 50^\circ$ $C = 0.45 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	4.5478	2.035	5.64	
3	0.45	5.5112	2.032	5.04	
4	0.6	6.5413	2.036	4.93	

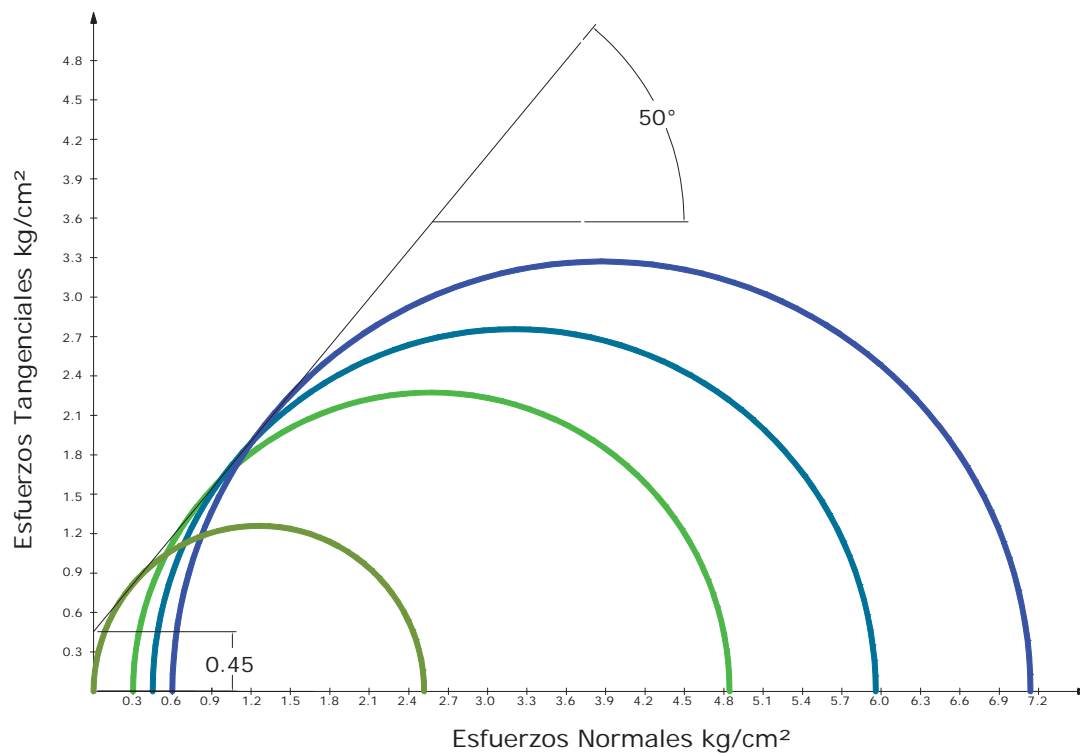


Figura VI.XIII. 1 Círculos de Mohr, M-4, G-bGrad

Tabla VI.XIII. 2 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-4, G-bGrad-Sat

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 4					
Granulometría bien graduada, saturada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	2.440	2.142	11.58	$\phi = 46^\circ$ $C = 0.49 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	4.4592	2.125	10.71	
3	0.45	4.7085	2.173	11.21	
4	0.6	5.5955	2.132	11.13	

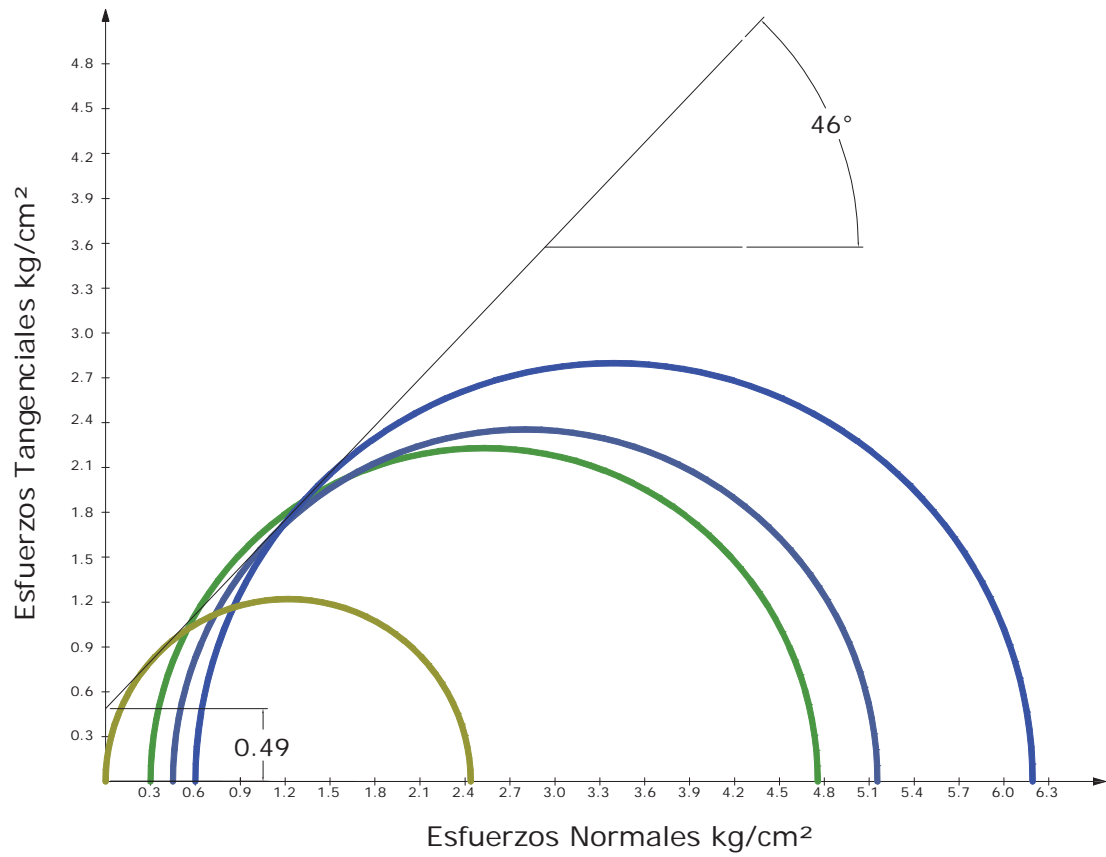


Figura VI.XIII. 2 Círculos de Mohr, M-4, G-bGrad-Sat

Tabla VI.XIII. 3 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-4, G-Unif

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 4					
Granulometría uniforme					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	1.3445	1.600	2.19	$\phi = 54^\circ$ $C = 0.22 \text{ kg/cm}^2$
2	0.3	5.1592	1.598	1.92	
3	0.45	5.8679	1.605	2.47	
4	0.6	6.4963	1.594	1.92	

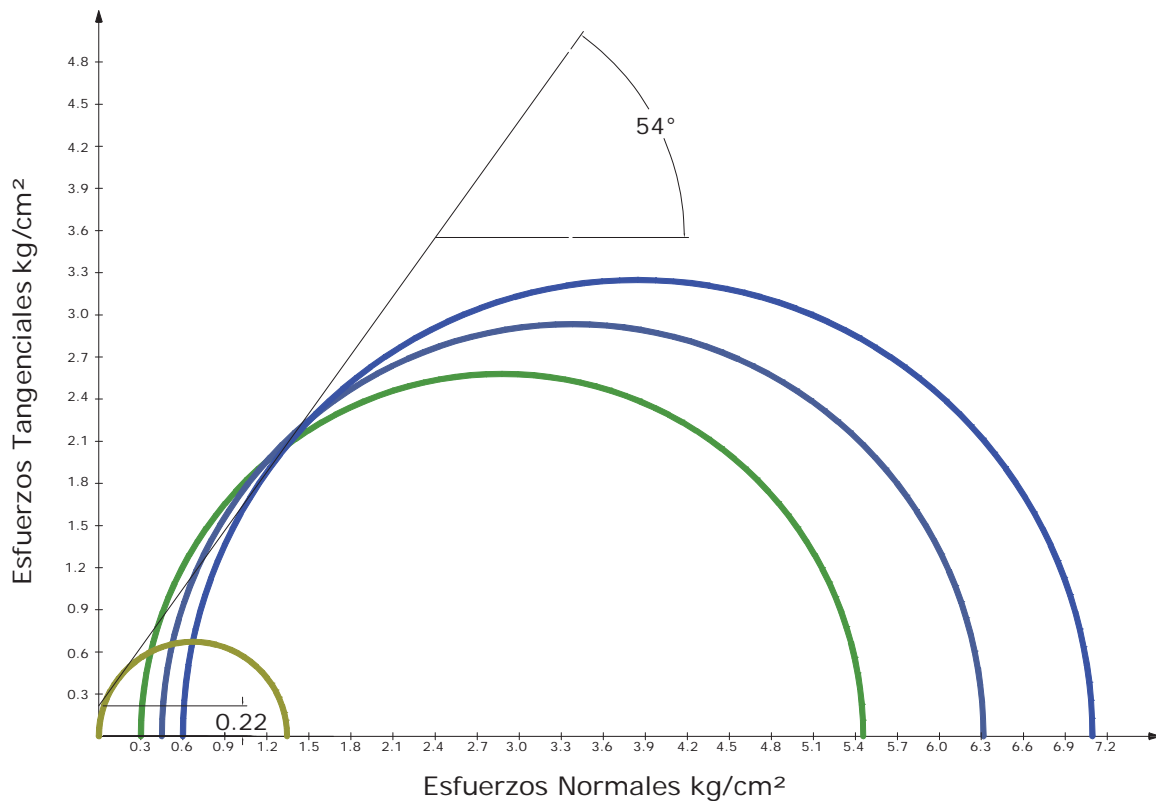


Figura VI.XIII. 3 Círculos de Mohr, M-4, G-Unif

Tabla VI.XIII. 4 Resultados de compresión simple y triaxiales, M-4, G-Unif-Sat

Resultados de pruebas de compresión simple y compresión triaxial					
Material 4					
Granulometría uniforme, saturada					
Prueba No.	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Peso específico húmedo ton/m ³	Contenido de humedad %	Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante
1	0.0	0.2767	1.638	4.79	$\phi = 58^\circ$ $C = 0.04$ kg/cm ²
2	0.3	5.6141	1.632	4.35	
3	0.45	6.0593	1.639	4.94	
4	0.6	7.0572	1.628	4.06	

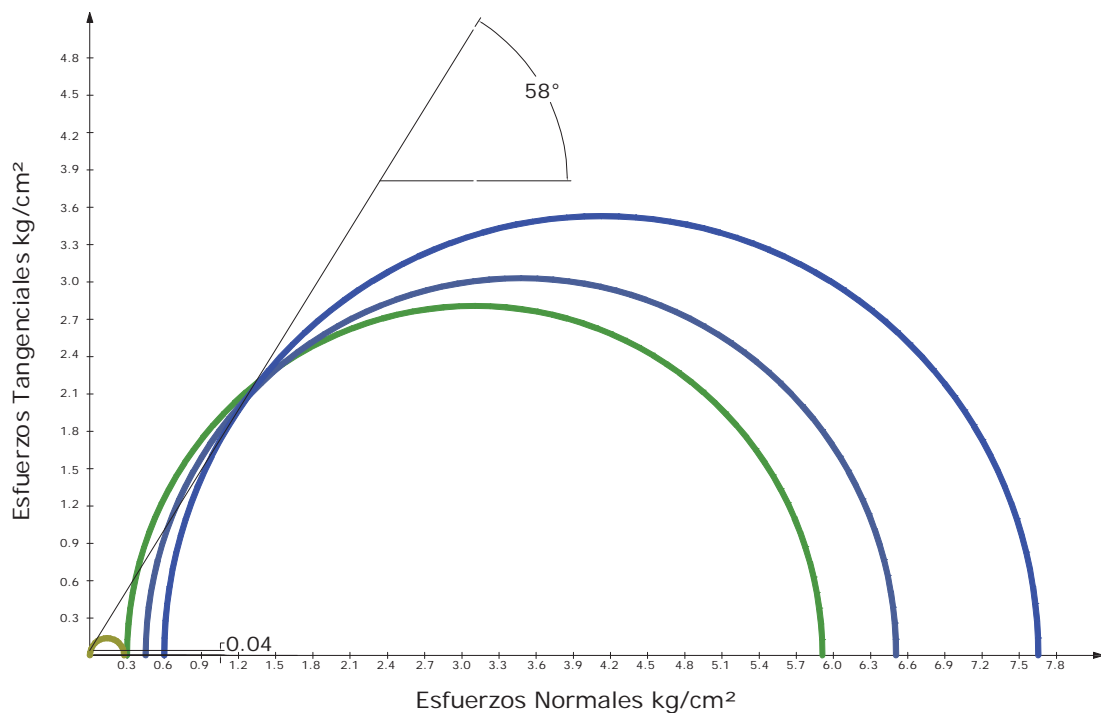


Figura VI.XIII. 4 Círculos de Mohr, M-4, G-Unif-Sat