



**UNIVERSIDAD
MICHOCANA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“INFLUENCIA DE LA HUMEDAD RELATIVA EN
MÓDULOS RESILIENTES Y DEFORMACIÓN
PERMANENTE EN TEZONTLE”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA EN INFRAESTRUCTURA
DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS
TERRESTRES**

PRESENTA:

TARSICIO AUDIFRED HURTADO SOLÓRZANO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS CHÁVEZ NEGRETE

MORELIA. MICHOACÁN. FEBRERO DE 2010



Agradecimientos:

A Dios:

Por haberme permitido vivir llegar a la culminación de mi posgrado, que era uno de mis sueños que por fin se ve cristalizado.

A mis Padres:

Por el apoyo que siempre me han brindado siempre, por creer siempre mí de lo que soy capaz de realizar y alentarme a ser mejor ser humano. Por los consejos que siempre me han brindado y simplemente por estar cuando los he necesitado, los quiero mucho.

Tarsicio Hurtado Chávez y Cirenía Solórzano Pérez Negrón

A mi Hermano:

Por hacerme la vida más fácil ya que siempre has sido aparte de mi hermano mi mejor amigo, por forzarme a ser un buen ejemplo para ti. Que ese apoyo que siempre he recibido de ti nunca cambie y que tus sueños se realicen.

A mis Abuelos:

Por haber formado sus familias que han sido ejemplo para mí, y por el cariño y apoyo incondicional que he recibido siempre.

José Rosario Hurtado Huerta † y Esperanza Chávez Chávez †
Benito Solórzano Pérez Negrón y Ma. Catalina Pérez Negrón Gaona

A mis familiares:

Por ser siempre un apoyo fuera de mí casa, por los consejos recibidos y por alentarme a terminar mi maestría.

A mis Padrinos:

Por ser un ejemplo de vida, su humildad, vocación de servicio y sobre todo su integridad moral han marcado mi vida para bien.

Pbro. Rafael Hurtado Chávez † y Monseñor Severo Hurtado Chávez

A mis Asesor: Dr. Carlos Chávez Negrete

Por haberme tenido paciencia y comprensión durante el proceso del trabajo, así como el apoyo que siempre me brindó dentro del salón de clases y en el laboratorio.

A mis Compañeros de la Maestría:

Por ser un apoyo importante durante mis estudios de maestría ya que sin ellos este sueño no se hubiera podido concluir, simplemente gracias ingenieros Heriberto E. Cira, Noé Hernández, Antonio Hurtado, José Adolfo R. Posadas y Alejandro Montaña.

A mis Compañeros del Laboratorio:

Gracias a Jaime G. Chora y Ing. Erick O. Cervantes por su apoyo durante las pruebas de mi tesis, así como al M en I. Tarsicio Domínguez, ya que sin su apoyo en la configuración de los equipos no se hubiera podido trabajar. Simplemente gracias por su amistad a los tres.

A mis Profesores:

Por haberme transmitido sus experiencias y conocimientos, para poder aplicarlos al servicio de mi entorno, en especial gracias al Dr. Jorge Alarcón, Dr. Eleazar Arreygue Dr. Jaime Saavedra y al M. en I. Felipe de Jesús Jerónimo, por que aparte de ser mis profesores, me brindaron su amistad y apoyo durante mi paso por la maestría.

ÍNDICE

CAPITULO 1.....	2
1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS DE LA TESIS	2
1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos de la tesis.	5
CAPITULO 2.....	8
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1. ANTECEDENTES	8
2.1.a) PRUEBAS RUTINARIAS	9
2.1.b) PRUEBA A BASE DEL MÓDULO DE RESILIENCIA.....	15
2.1.c) PRUEBA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE.	41
2.2. CONCLUSIONES	57
CAPITULO 3.....	60
3. DESCRIPCION DE PRUEBAS Y EQUIPO	60
3.1. PRUEBAS Y SU EQUIPO.....	60
3.1. a) PRUEBA PROCTOR	60
3.1. b) MÓDULO DE RESILIENCIA.....	67
3.1. c) PRUEBA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE	88

3.2. EQUIPO AUXILIAR DE PRUEBA DESARROLLADO EN EL LABORATORIO	95
3.2. a) TORNILLOS SUJETADORES.....	95
3.2. b) PLACA DE DISTRIBUCIÓN	99
3.2. c) CONTROL DE VELOCIDAD DE LA BOMBA	100
 CAPITULO 4.....	 102
 4. RESULTADOS	 102
4.1. GRANULOMETRIA.....	102
4.1.1. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA	102
4.1.2. GRANULOMETRIA UNIFORME.....	104
4.2. PRUEBA PROCTOR ESTANDAR D-698.....	105
4.2.1. PRUEBA PROCTOR GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA	106
4.2.1. PRUEBA PROCTOR GRANULOMETRIA UNIFORME	106
4.3. MODULOS DE RESILIENCIA.....	107
4.3.1. MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 100% DE HUMEDAD RELATIVA	107
4.3.2. MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA.....	110
4.3.3. MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA UNIFORME AL 100% DE HUMEDAD RELATIVA.....	112
4.3.4. MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA UNIFORME 50% DE HUMEDAD RELATIVA	115
4.3.5 RESUMEN DE RESULTADOS	117
4.4. DEFORMACION PERMANENTE	120

4.4.1. HUMEDAD RELATIVA AL 100%	120
4.4.2. HUMEDAD RELATIVA AL 50%	122
4.5. CONCLUSIONES	127
 CAPITULO 5.....	 130
 5. CONCLUSIONES	 130
 BIBLIOGRAFIA	 134
 ANEXO A.....	 ii
 A.1. TABLAS DE GRANULOMETRIA.....	 ii
A.1.1. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 100% DE HUMEDAD RELATIVA DESPUES DE LA PRUEBA.....	ii
A.1.2. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA DESPUES DE LA PRUEBA.....	ii
A.1.3. GRANULOMETRIA UNIFORME 100% DE HUMEDAD RELATIVA DESPUES DE LA PRUEBA.....	iii
A.1.4. GRANULOMETRIA UNIFORME 50% DE HUMEDAD RELATIVA DESPUES DE LA PRUEBA	iii
A.2. TABLAS DE LA PRUEBA PROCTOR D-698	iv
A.2.1. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA	iv
A.2.2. GRANULOMETRIA UNIFORME.....	iv
A.3. GRAFICOS DE CARGA	v

A.3.1. GRAFICOS DE CARGA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 100% DE HUMEDAD RELATIVA	v
A.3.2. GRAFICOS DE CARGA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA	x
A.3.3. GRAFICOS DE CARGA GRANULOMETRIA UNIFORME 100% DE HUMEDAD RELATIVA	xv
A.3.4. GRAFICOS DE CARGA GRANULOMETRIA UNIFORME AL 50% DE HUMEDAD RELATIVA	xix
A.4. GRAFICOS DE MODULO DE RESILIENCIA	xxiv
A.4.1. GRAFICO DE MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA CON 100% DE HUMEDAD RELATIVA	xxiv
A.4.2. GRAFICOS DE MODULO DE RESILIENCIA EN GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA	xxix
A.4.3. GRAFICOS DE MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA UNIFORME 100% DE HUMEDAD RELATIVA	xxxiv
A.4.4. GRAFICOS DE MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA UNIFORME 50% DE HUMEDAD RELATIVA.....	xxxix
A.5. DEFORMACION PERMANENTE	xliv
A.5.1. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA AL 100% DE HUMEDAD RELATIVA	xliv

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 2

<i>Figura 2. 1 Criterio para obtener el módulo de deformación en la prueba de Kansas (Rico y del Castillo 1996)</i>	9
<i>Figura 2. 2 Estabilómetro de Hveem (Rico y del Castillo 1996)</i>	11
<i>Figura 2. 3 Expansiómetro de Hveem (Rico y del Castillo 1996)</i>	13
<i>Figura 2. 4 Cohesiómetro de F. Hveem (Rico y del Castillo 1996)</i>	14
<i>Figura 2. 5 Estado de esfuerzos en la subrasante. (Garnica et al, 2000)</i>	15
<i>Figura 2. 6 Estado de esfuerzos en una prueba cíclica (Garnica 2000)</i>	17
<i>Figura 2. 7 Variación típica de la deformación vertical resiliente en un pavimento con carpeta asfáltica (Brown et al., 1996)</i>	19
<i>Figura 2. 8 Esfuerzos verticales en subrasante bajo la carpeta de 165 mm (Brown, 1996)</i>	20
<i>Figura 2. 9 Medidas de esfuerzos verticales en subrasantes bajo una capa granular de 350 mm de espesor (Brown, 1996)</i>	20
<i>Figura 2. 10 Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con carga senoidal y triangular (1in = 25.4 mm y 1 mph = 1.6 km/hrs) (Garnica et al 2002)</i>	21
<i>Figura 2. 11 Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con onda tipo cuadrada (Garnica et al 2002)</i>	22
<i>Figura 2. 12 Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador. (Garnica et al 2000)</i>	24
<i>Figura 2. 13 Líneas isocaracterísticas (Garnica et al 2002)</i>	27
<i>Figura 2. 14 Orientación de las partículas (garnica et al 2002)</i>	28
<i>Figura 2. 15 Variación del módulo con el número de ciclos (Garnica et al 2002)</i>	29
<i>Figura 2. 16 Efecto de tixotropía en las características resilientes de un suelo (Garnica et al 2002)</i>	30
<i>Figura 2. 17 Efecto de la intensidad del esfuerzo en las características de resiliencia (Garnica et al 2002)</i>	31
<i>Figura 2. 18 Módulo de resiliencia obtenidos en seis materiales (Garnica et al 2002)</i>	33
<i>Figura 2. 19 Granulometría del tipo I y II (Garnica et al 2002)</i>	34
<i>Figura 2. 20 Granulometría del tipo III (Garnica et al 2002)</i>	34
<i>Figura 2. 21 Efecto de la compactación y granulometría en el modulo de resiliencia para especímenes de diferente tamaño (Garnica et al 2002)</i>	35
<i>Figura 2. 22 Evolución del módulo de resiliencia con el nivel de esfuerzo aplicado (Garnica et al 2002)</i>	36
<i>Figura 2. 23 Valores medios de módulos de resiliencia obtenidos para diferentes contenidos de agua (Garnica et al 2002)</i>	37
<i>Figura 2. 24 Resultados para una arcilla (Li y Qubain 2003)</i>	39

<i>Figura 2. 25 Resultados para una arena arcillosa (Li y Qubain 2003)</i>	40
<i>Figura 2. 26 Resultados para una grava arcillosa (Li y Qubain 2003)</i>	40
<i>Figura 2. 27 Gráfico de deformación permanente en una arcilla (Garnica 2002)</i>	43
<i>Figura 2. 28 Deformación permanente y contenido de agua (Garnica 2002)</i>	44
<i>Figura 2. 29 Ubicación de los materiales y su deformación permanente (Khogali y Mohamed 2004)</i>	49
<i>Figura 2. 30 Variación en la respuesta del módulo resiliente y la deformación permanente en roca triturada (Khogali y Mohamed 2004)</i>	50
<i>Figura 2. 31 Variación en la respuesta del módulo resiliente y la deformación permanente en una arena (Khogali y Mohamed 2004)</i>	51
<i>Figura 2. 32 Variación en la respuesta del módulo resiliente y la deformación permanente en una arcilla (Khogali y Mohamed 2004)</i>	52
<i>Figura 2. 33 Efecto del contenido de finos en la deformación permanente en un material granular típico de Ottawa (Khogali y Mohamed 2004)</i>	53
<i>Figura 2. 34 Efectos del contenido de agua y finos en la deformación permanente (Khogali y Mohamed 2004)</i>	54
<i>Figura 2. 35 Deformación permanente en el material original (Zeghal 2009)</i>	54
<i>Figura 2. 36 Deformación permanente en el material triturado (Zeghal 2009)</i>	55
<i>Figura 2. 37 Comparación de la deformación permanente entre los materiales originales y triturados compactados al 95% y un esfuerzo desviador aplicado de 80 kPa (Zeghal 2009)</i>	56
<i>Figura 2. 38 Comparación de la deformación permanente entre los materiales originales y triturados compactados al 90% y un esfuerzo desviador aplicado de 50 kPa (Zeghal 2009)</i>	56
<i>Figura 2. 39 Comparación de la deformación permanente entre los materiales originales y triturados compactados al 95% y un esfuerzo desviador aplicado de 50 kPa (Zeghal 2009)</i>	57
CAPITULO 3	
<i>Figura 3. 1 Molde cilíndrico de 4" (ASTM Internacional)</i>	62
<i>Figura 3. 2 Molde cilíndrico de 6" (ASTM Internacional)</i>	62
<i>Figura 3. 3 Martillo manual y molde de prueba</i>	63
<i>Figura 3. 4 Curva de Peso específico – Contenido de agua</i>	66
<i>Figura 3. 5 Cámara triaxial</i>	68
<i>Figura 3. 6 Dispositivo de carga o celda de carga.</i>	69
<i>Figura 3. 7 Forma de la curva senoidal (AASHTO)</i>	69
<i>Figura 3. 8 LVDT's</i>	70
<i>Figura 3. 9 Marco de carga</i>	71
<i>Figura 3. 10 Panel de control</i>	73
<i>Figura 3. 11 Unidad de conversión de señal parte exterior e interior.</i>	73
<i>Figura 3. 12 Unidad de procesamiento</i>	74

Figura 3. 13 Pantalla del programa LABview	74
Figura 3. 14 Membrana de látex y molde	75
Figura 3. 15 Base de la cámara triaxial, conformación de los tres elementos.	75
Figura 3. 16 Martillo neumático y pistón de compactación	76
Figura 3. 17 Espécimen preparado.	77
Figura 3. 18 Circuito de transferencia de humedad	78
Figura 3. 19 Bomba de aire	78
Figura 3. 20 Control de velocidad	79
Figura 3. 21 Deposito de sustancia secante o hidratante	80
Figura 3. 22 Conformación del circuito dentro de la cámara triaxial	80
Figura 3. 23 Contenedor del higrómetro	81
Figura 3. 24 Higrómetro	81
Figura 3. 25 Cámara montada en el marco de prueba	82
Figura 3. 26 Pantalla del programa LABview	83
Figura 3. 27 Información de LABview	85
Figura 3. 28 Grafico de módulo de resiliencia	86
Figura 3. 29 Grafico de regresión de un suelo granular.	87
Figura 3. 30 LVDT o medidor de deformación	89
Figura 3. 31 Pantalla del programa de deformación permanente en LABview	90
Figura 3. 32 Pantalla principal del programa KENLAYER	92
Figura 3. 33 Pantalla del botón LAYERINP	92
Figura 3. 34 Información procesada en LABview	94
Figura 3. 35 Grafico típico de deformación permanente.	95
Figura 3. 36 Esquema del tornillo sujetador de LVDT.	96
Figura 3. 37 Esquema del tornillo sujetador de LVDT.	97
Figura 3. 38 Esquema del tornillo sujetador de LVDT.	98
Figura 3. 39 Placa de distribución	99
Figura 3. 40 Diagrama del circuito	100

CAPITULO 4

Figura 4. 1 Distribución de la Granulometría Bien Graduada propuesta con el límite superior A ($\Sigma L \leq 106$) y el límite superior B ($\Sigma L > 106$)	103
Figura 4. 2 Granulometría Bien Graduada	103
Figura 4. 3 Granulometría Uniforme	104
Figura 4. 4 Distribución de la Granulometría Uniforme	105
Figura 4. 5 Molde y un punto de la prueba	105
Figura 4. 6 Curva de contenido óptimo de agua	106

Figura 4. 7 Curva de contenido óptimo de agua	107
Figura 4. 8 Espécimen al inicio de la prueba y durante la prueba.	108
Figura 4. 9 Gráfico de granulometría bien graduada después de la prueba al 100% de humedad relativa	108
Figura 4. 10 Gráfico de regresión para Granulometría Bien Graduada 100% de humedad relativa	109
Figura 4. 11 Espécimen antes de la prueba y durante la prueba	110
Figura 4. 12 Gráfico de granulometría bien graduada después de la prueba al 50% de humedad relativa	111
Figura 4. 13 Gráfico de regresión para Granulometría Bien Graduada 50% de humedad relativa	111
Figura 4. 14 Espécimen durante la prueba	113
Figura 4. 15 Gráfico de granulometría Uniforme después de la prueba al 100% de humedad relativa	113
Figura 4. 16 Gráfico de regresión para Granulometría Uniforme 100% de humedad relativa	114
Figura 4. 17 Espécimen durante la prueba	115
Figura 4. 18 Gráfico de granulometría Uniforme después de la prueba al 50% de humedad relativa	116
Figura 4. 19 Gráfico de regresión para Granulometría Uniforme 50% de humedad relativa	117
Figura 4. 20 Granulometría del material bien graduado	117
Figura 4. 21 Granulometría del material Uniforme	118
Figura 4. 22 Gráfico de regresión del material de Granulometría Bien Graduada	118
Figura 4. 23 Gráfico de regresión del material de Granulometría Uniforme	119
Figura 4. 24 Gráfico de regresión de los materiales Uniforme y Bien Graduado	119
Figura 4. 25 Estructura de un pavimento tipo en México	120
Figura 4. 26 Gráfico de deformación permanente durante 3000 ciclos para una humedad relativa de 100%	121
Figura 4. 27 Deformación permanente después de la prueba al 100% de humedad relativa	121
Figura 4. 28 Granulometría después de la prueba de deformación permanente al 100% de húmeda relativa	122
Figura 4. 29 Gráfico de Deformación permanente y proceso de saturación y secado para 50% humedad relativa	123
Figura 4. 30 Gráfico con los 2 ciclos de carga sin el proceso de saturación para 50% de humedad relativa	123
Figura 4. 31 Deformación permanente en los primeros 3000 ciclos para 50% de humedad relativa	124
Figura 4. 32 Gráfico de saturación	124
Figura 4. 33 deformación permanente del ciclo 3001 al 6000	125
Figura 4. 34 Gráfico de saturación	125
Figura 4. 35 Granulometría después de 2 ciclos de carga (6000 ciclos)	126
Figura 4. 36 Gráfico de granulometrías de la prueba de deformación permanente	126
Figura 4. 37 Proceso de saturación	127

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO 2

<i>Tabla 2. 1 Características de los especímenes (Garnica et al 2002)</i>	34
<i>Tabla 2. 2 Resumen de resultados del proyecto del área de Filadelfia (Li y Qubain 2003)</i>	38
<i>Tabla 2. 3 Resumen de resultados del área de Somerset (Li y Qubain 2003)</i>	39
<i>Tabla 2. 4 Características del material ensayado (Garnica 2002)</i>	43

CAPITULO 3

<i>Tabla 3. 1 Equivalencia de unidades (ASTM Internacional)</i>	63
<i>Tabla 3. 2 Periodo de carga y reposo de la celda de carga</i>	69
<i>Tabla 3. 3 Secuencia de pruebas</i>	84

CAPITULO 4

<i>Tabla 4. 1 Granulometría Bien Graduada de trabajo</i>	104
<i>Tabla 4. 2 Esfuerzo Invariante para la Granulometría bien Graduada al 100% de humedad relativa</i>	109
<i>Tabla 4. 3 Esfuerzo Invariante para la Granulometría bien Graduada al 50% de humedad</i>	112
<i>Tabla 4. 4 Esfuerzo Invariante para la Granulometría Uniforme al 100% de humedad</i>	114
<i>Tabla 4. 5 Esfuerzo Invariante para la Granulometría Uniforme al 50% de humedad relativa</i>	116



CAPITULO 1

INTRODUCCION Y OBJETIVOS DE LA TESIS

CAPITULO 1

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS DE LA TESIS

1.1. Introducción

Los caminos se inician prácticamente con nuestra civilización. Cuando se construyeron la Vías Romanas, se comienza la utilización de caminos pavimentados, se emplearon bloques de piedra trabajados especialmente para obtener una superficie lisa. Esto como solución a los problemas que se presentaban, debido a que eran solo senderos de tierra, por lo que en tiempo de lluvias eran intransitables debido a la naturaleza propia del suelo. La duración de estas vías, es el mejor testimonio de la calidad de ejecución de dichos trabajos y de la factibilidad del sistema constructivo de pavimentos segmentados.

Posteriormente aparecieron las superficies para el rodamiento de vehículos constituidas por adoquines de granito; ejecutadas durante muchos años en diversos países de Europa y luego en América, incluyendo México.

Con la decadencia del Imperio Romano, se tiene un gran retroceso, debido a que los adelantos en esta área se pierden. Debido a que la construcción de los caminos es mínima, la construcción de los pavimentos comienza a recobrar importancia durante la segunda mitad del siglo XVIII.

A principios del siglo XIX se comienzan a pavimentar calles utilizando alquitrán en riego. La primera Dirección de Vialidad importante, se crea durante el Imperio de Napoleón (1804 - 1814) donde ve la utilidad del alquitrán, ya que este da una vía limpia, durable y fácil de transitar. Las primeras mezclas con alquitrán *in situ*, comienza construyendo caminos con lentitud pues se realizaban en forma manual. Consecutivamente esto se extiende a Inglaterra, España, y el resto de Europa. Posteriormente, en Estados Unidos se emplearon mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales.

Con la aparición de las primeras trituradoras de rocas (1858) y el rodillo a vapor (1859), aumenta la velocidad de construcción, ya que la trituración de bloques de rocas y la conformación al dejar de ser manualmente, reduciendo considerablemente los tiempos de construcción.

El gran auge de los ferrocarriles frena nuevamente el desarrollo caminero, pero con la invención de automóvil en 1904, se inicia un gran desarrollo en la utilización de los pavimentos.

Al final de la II Guerra Mundial alrededor de los años 1930 y 1940 se comienza un desarrollo importante en la utilización de los pavimentos. Esto debido al desarrollo militar que se tuvo durante la guerra, debido a la necesidad principalmente de pistas de aterrizaje, que fueran resistentes y fáciles de construir.

Estos avances sientan las bases para el desarrollo de los pavimento que actualmente conocemos, que son una estructura de materiales granulares y material asfáltico o concreto hidráulico

La estructura de los pavimentos implica que en su construcción se utilice suelo y a su vez estar apoyada sobre suelo, por lo cual es importante conocer cómo se comporta el suelo bajo diferentes aspectos climatológicos, y que como sabemos, la estructura de un pavimento está compuesta generalmente por 5 capas de materiales que son suelo de cimentación, cuerpo de terraplén, sub-rasante, sub-base y base, además de una superficie de rodamiento, las cuales tienen diferentes tamaños y composición, lo cual da una serie de comportamientos diferentes debido a la carga y contenido de agua en estos, por lo cual un adecuado estudio y diseño de cada una de estas capas le dará una mayor vida útil a la carretera.

El principal parámetro de diseño utilizado mundialmente hasta hace algunos años ha sido el VRS (Valor Relativo de Soporte) que es una comparación de un material estándar a la

resistencia a ser penetrado, debido a su simplicidad y obtención rápida, pero, el cual ya empieza a ser desplazado, en algunos métodos de diseño a nivel mundial, por el Módulo de Resiliencia (M_r), sin embargo este último en México es utilizado muy poco o casi nada para el diseño de pavimentos.

Una de las problemáticas de la estructura de un pavimento, es que al estar a la intemperie están expuestas a cambio de temperatura y procesos de humedecimiento y secado debido a las temporadas de lluvias y estiaje, lo cual provoca un debilitamiento en la estructura y los efectos de deformación en los suelos.

El colapso en un suelo es provocado por el agua, lo cual directamente afecta el Módulo de resiliencia provocando una reducción del mismo. El colapso, a su vez, provoca deformaciones del tipo plásticas en las estructuras que son permanentes.

Las deformaciones plásticas son el resultado de la aplicación de una carga en forma senoidal durante un determinado número de ciclos o repeticiones, los cuales provocan una fatiga en el espécimen, que a su vez se presenta como una disminución en el tamaño del espécimen.

En el presente trabajo se pretende realizar ensayos de módulo de resiliencia, con el equipo Triaxial Cíclico con que cuenta el Laboratorio de Materiales de la FIC de la UMSNH. Estos se realizarán, tomando en cuenta variaciones en el contenido de humedad, para lo cual se pretende implementar un control de la humedad del suelo, mediante la técnica de transferencia de vapor de agua.

El material a estudiar será Tezontle de la región, se seleccionó este tipo de material ya que la transferencia de vapor es el más adecuado para los dos tipos de granulometría; por otro lado, el controlar la humedad en suelos arcillosos es más tardado debido a su composición macroscópica aunada a la baja permeabilidad que presenta.

Estas pruebas nos permitirán ver la variación del módulo de resiliencia con respecto a la succión total aplicada en el suelo, además de conocer la deformación permanente que se presentara en el material en un estado controlado de humedecimiento y secado.

1.2. Objetivos de la tesis.

En el presente trabajo se pretende realizar ensayos de módulo de resiliencia, con el equipo Triaxial Cíclico con que cuenta el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

Los Módulos de Resiliencia, serán en un suelo del tipo granular, por lo cual el material seleccionado será tezontle de la región, el cual deberá de cumplir con ser un 1/6 del diámetro de la probeta o espécimen, el cual es de 7.68 cm, por lo cual el tamaño máximo del material será todo aquel que pasa por la malla de 1/2”.

Para la formación de los especímenes se tomaran dos tipos de granulometría, la primera granulometría será bien graduada, la segunda granulometría será uniforme del tamaño de 1/4”; para tener un control de las pruebas la granulometría bien graduada será la misma, esto se obtendrá mediante el control del peso de cada tamaño del material que conformara el espécimen, lo cual nos permitirá tener las mismas condiciones en el material.

Se tomara en cuenta la variación en el contenido de humedad en el espécimen, por medio de la técnica de transferencia de vapor de agua, se seleccionó esta técnica debido a que es el más adecuado para este tipo de material, ya que el controlar la humedad en suelos arcillosos es mas tardado, debido a la baja permeabilidad que presentan estos.

En el control del contenido de humedad se pretende utilizar la técnica de transferencia de vapor, utilizando un higrómetro para la medición de la humedad relativa del suelo, el control será mediante soluciones salinas saturadas que imponen una humedad relativa conocida. El proceso de transferencia de vapor será acelerado por un sistema de circulación forzada de vapor de aire dentro de la muestra. Aunado a esto se instalará un

sistema de aire acondicionado en el área de trabajo con el objetivo de que la temperatura no afecte el control de la humedad relativa; Con ello se producirán trayectorias de estado seco a húmedo y viceversa.

Los Ensayos de Módulos de Resiliencia con los valores de la humedad relativa contemplados para el presente trabajo son: 50% y 100% de humedad relativa.

Estas trayectorias nos permitirán ver los efectos producidos en los módulos de resiliencia, debido a la succión total que es aplicada al suelo.

En lo que concierne a la deformación permanente que se presenta debido a los esfuerzos cíclicos se tiene contemplado hacer una trayectoria con contenidos de humedad donde se observara los efectos de esta en las muestras, partiendo de un 50% de humedad a un 100% de humedad y regresando a 50%.

Esta trayectoria permitirá comenzar a entender algunos factores que se presentan en los suelos debido a las cargas cíclicas a que están sometidos los especímenes, y nos permitirá entender mejor los procesos de humedecimiento y secado de los elementos que componen la estructura de una carretera en la práctica.



CAPITULO 2

ESTADO DEL ARTE

CAPITULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ANTECEDENTES

Muchos ensayos se han diseñado para medir las características de los materiales de los pavimentos. Frecuentemente los resultados que se obtienen tienen poca repetitividad, por lo que las comparaciones y correlaciones entre ellos son muy malas. Para disminuir esto, se han tenido que realizar una estandarización en los procedimientos de ensaye.

En general se presenta a continuación una categorización de los diferentes tipos de ensayos comunes (Garnica et al 2004):

a) Pruebas rutinarias

Pruebas triaxiales

Prueba de Valor Relativo de Soporte de California (CBR)

Prueba de presión de expansión

Prueba del cohesiómetro

b) Pruebas con parámetros de diseño con las capas

Prueba a base del módulo de resiliencia

c) Otras

Prueba de la deformación permanente

Todas las pruebas mencionadas anteriormente fueron y son parámetros de diseño para pavimentos flexibles, además de de que son pruebas que sirven como base para los ensayos que se utilizan en la actualidad. De ahí es que es de importancia saber en qué consisten para poder ir adentrándonos en nuestro estudio.

2.1.a) PRUEBAS RUTINARIAS

2.1.a) 1. Pruebas triaxiales

Este tipo de pruebas se aplican para conocer las propiedades de las subrasantes y de las capas del pavimento propiamente dicho, en general, se asemejan a una prueba Rápida en suelos para conocer la relación esfuerzo – deformación. Debido a esto se desarrollaron estas pruebas del tipo triaxial.

- **Prueba triaxial de Kansas.** Esta prueba se desarrolló en el estado de Kansas E.U.A., esta prueba consiste en la medición del módulo de deformación en los suelos, que es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación. Las condiciones de humedad más desfavorables para la vida útil de un pavimento son las que se reproducen saturando el espécimen. A esta se debe de considerar un factor de corrección n , que está en función de la precipitación pluvial de la zona.

El módulo de corrección se obtiene de una gráfica “esfuerzo desviador-deformación”, y señalando en ésta el esfuerzo desviador que se supone actuará en el pavimento real; por tanto el módulo de deformación será la secante correspondiente a ese punto lo cual podemos ver figura 2. 1.(Rico y del Castillo 1996)

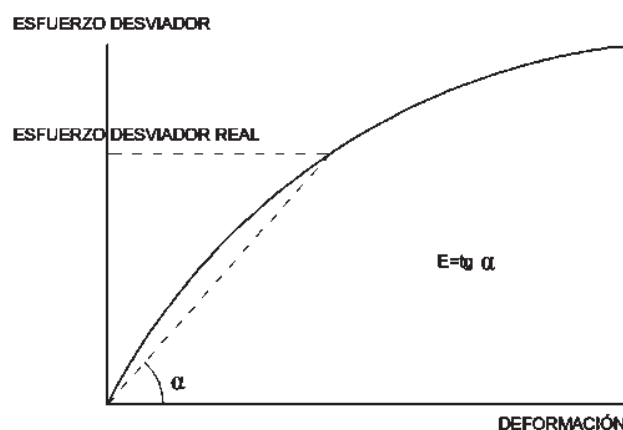


Figura 2. 1 Criterio para obtener el módulo de deformación en la prueba de Kansas (Rico y del Castillo 1996)

- **Prueba triaxial de Texas.** Para este caso las autoridades responsables de la construcción de carreteras de Texas han desarrollado un método triaxial cuyo fin es obtener las envolventes de resistencia de los suelos, donde el método de diseño de pavimentos que también se desarrolló en Texas utiliza estos valores. La cámara triaxial es un tubo de acero inoxidable con una membrana interior de hule en la que se introduce aire a presión para comunicar al espécimen un esfuerzo de confinamiento. Las dimensiones de la cámara son 17.20 cm de diámetro interior, por 30.50 cm de altura.

El material se compacta en cuatro capas por impactos utilizando para ello el compactador automático mecánico, el espécimen se seca al horno a 60° C durante ocho horas, dejándose en contacto con una fuente de agua 10 días como mínimo, o durante un tiempo en días numéricamente igual al índice plástico del suelo; en ese período de absorción el suelo se somete a una sobrecarga de 0,07 kg/cm² (11 b/plg²). De esta forma se supone reproducir las condiciones más desfavorables de la vida del pavimento. (Rico y del Castillo 1996)

- **Prueba del estabilómetro de Hveem.** Este dispositivo triaxial sirve de fundamento a un método específico de diseño de pavimentos flexibles; con él se realiza una prueba que mide el comportamiento mecánico de los materiales bajo combinaciones de esfuerzos en niveles inferiores a los de la falla; para la preparación y compactación de los especímenes, Hveem preparó un compactador mecánico por amasado. El estabilómetro es una cámara triaxial formada por un cilindro metálico dentro del cual hay una membrana de hule. El espacio anular entre la membrana y el cilindro metálico se llena de aceite, con objeto de transmitir la presión lateral al espécimen. Las cargas verticales, son transmitidas en forma horizontal al aceite, la cual se puede leer en el manómetro.

Los resultados se interpretan a través del valor de “estabilidad”, con la fórmula:

$$R = 100 - \frac{100}{\frac{2.5}{D} \left(\frac{p_v}{p_h} - 1 \right) + 1}$$

Donde:

R = es el número de estabilidad de Hveem

p_v = presión vertical aplicada

p_h = presión horizontal en las paredes del espécimen medidas en el manómetro.

D =desplazamiento horizontal del espécimen, correspondiente a una a una presión horizontal de $7,00 \text{ k/cm}^2$ (100 lb/plg^2).

El desplazamiento se mide por el número de vueltas que registra el indicador de la manivela de la bomba. (Rico y del Castillo 1996)

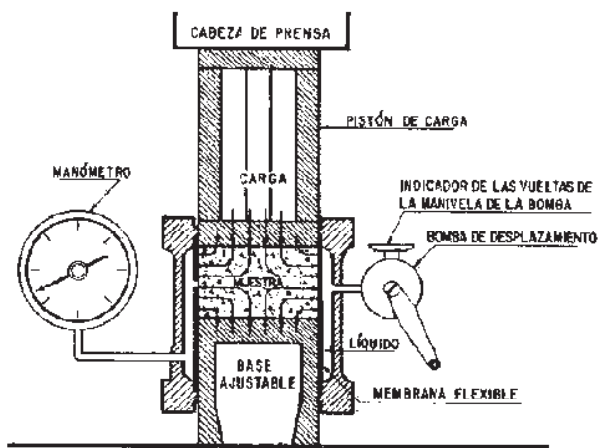


Figura 2. 2 Estabilómetro de Hveem (Rico y del Castillo 1996)

- **Estabilómetro de Hveem, utilizando la presión de exudación.** Prueba desarrollada por el departamento de carreteras de California con objeto de aplicar el método de Hveem. Una vez compactados los especímenes se efectúa la prueba para determinar la presión de exudación, que consiste en medir el esfuerzo de compresión necesario para que el material compactado con una cierta humedad expulse el agua del molde. Utilizándose un dispositivo que consta de una base con siete celdas fotoeléctricas y adaptadas con un registrador, el espécimen dentro del molde se coloca sobre la base y se le aplica una carga incrementada de manera continua, registrándose como presión de exudación la que hace que el agua expulsada cierre el circuito de por lo menos cinco de las celdas perimetrales; la central indica el contacto entre el espécimen y la base del aparato.

El departamento de carreteras de California especifica que el valor de estabilidad obtenido en el estabilómetro de Hveem que se utilice para el cálculo del espesor necesario del pavimento, corresponda a un contenido de agua tal del modelo que dé a éste, una presión de exudación de 21,0 kg/cm² (300 lb/plg²). (Garnica et al, 2004)

2.1.a) 2. Prueba de Valor Relativo de Soporte de California (CBR)

Esta prueba fue desarrollada por el departamento de Carreteras del Estado de California, la cual en la actualidad es una prueba muy utilizada para el diseño de las estructuras de un pavimento.

Este valor se obtiene a partir de la penetración de un vástago de 19.4 cm² (3 plg²) de área, esta se hace penetrar en el suelo a una razón de 0.127 cm/min (0.05 pulg/min); tomando lecturas a razón de 0.25 cm (0.1 pulg.). Por lo cual este valor se define como la relación entre la presión necesaria para penetrar los primeros 0.25 cm (0.1 pulg.) y la presión requerida para obtener la misma penetración en un material llamado patrón, que es una piedra triturada que se tiene ya sus características.

El suelo con el que se hace la prueba está confinado en un molde de 15.2 cm (6 pulg.) de diámetro y 28.3 cm (8 pulg) de altura. El material se coloca en 3 capas varilladas, al cual se le aplica una carga de 140 kg/cm², se sabe que la muestra está con la humedad requerida mediante la observación en la base, esta debe presentar una exudación de agua (una gota de agua). El espécimen se deja en saturación durante 4 días o hasta que ya no exista el fenómeno de expansión del material a estudiar.

Los valores que afectan al CBR son la textura del suelo, contenido de agua y condición de compactación. En los suelos friccionantes, prácticamente no hay expansión en la etapa de saturación, mientras que en la etapa de penetración, debido al confinamiento afecta mucho la resistencia a la sobrecarga. En los suelos arcillosos ocurre lo contrario. (Rico y del Castillo 1996)

2.1.a) 3. Prueba de Hveem, utilizando la variante de la presión de expansión

En esta prueba se mide la presión que desarrolla, bajo ciertas condiciones, un espécimen de suelo al que se permite absorber agua libre; el ensayo se efectúa de tal manera que no se permiten cambios importantes durante el mismo en el peso específico del suelo.

El dispositivo consiste en un puente metálico calibrado de tal manera que es conocida para cada flecha del puente la presión que se ejerce desde la placa circular de 10.10 cm de diámetro; apoyada sobre el espécimen, la presión se trasmite al puente por medio de un vástago.

La presión de expansión se mide saturando al espécimen, tal como se muestra en la figura 2. 3. En el procedimiento de diseño en vigor en California, constituye una condición de diseño que el peso del pavimento ha de ser suficiente para neutralizar la presión de expansión medida. (Garnica et al, 2004)

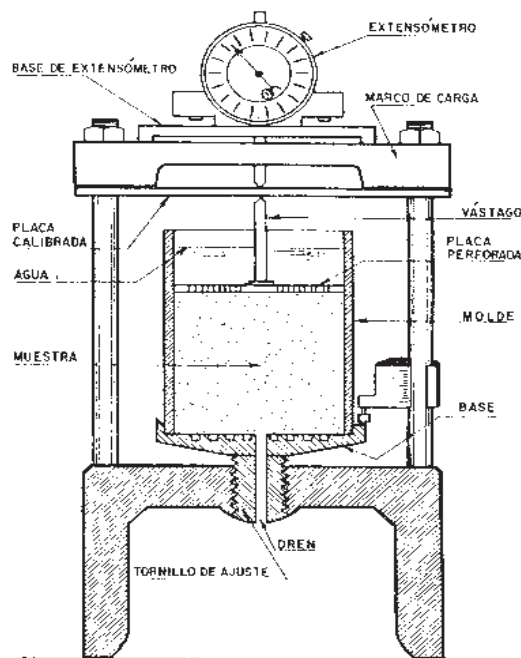


Figura 2. 3 Expansiómetro de Hveem (Rico y del Castillo 1996)

2.1.a) 4. Prueba de Hveem, utilizando la variante del valor del cohesiómetro

El cohesiómetro mide la resistencia a la tensión por flexión de un espécimen de suelo. Se supone que dicho valor se relaciona con la resistencia al esfuerzo cortante que desarrolle la muestra bajo un confinamiento representativo del que tendrá en el pavimento. La prueba se aplica, sobre todo a los materiales que formarán las capas superiores de la estructura.

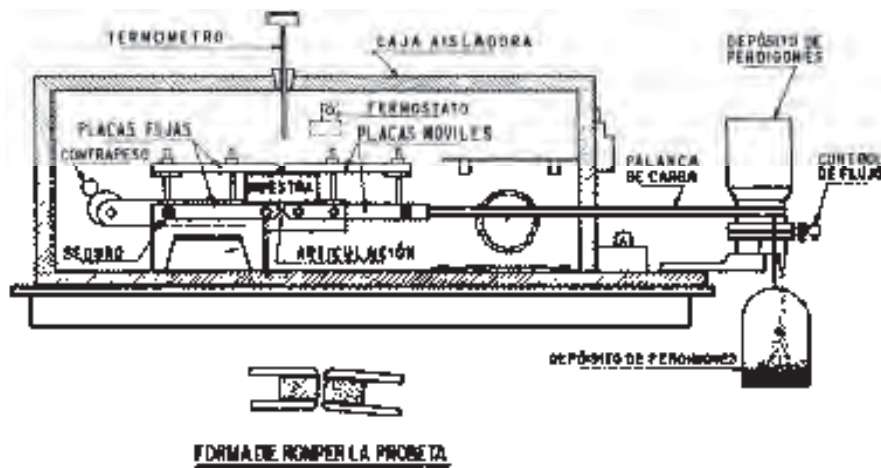


Figura 2. 4 Cohesiómetro de F. Hveem (Rico y del Castillo 1996)

El espécimen se coloca dentro de dos mordazas articuladas, una móvil y otra fija; la primera está ligada a una barra en cuyo extremo se va ejerciendo una fuerza creciente hasta la falla de la muestra (Garnica et al, 2004). El valor del cohesiómetro está dado por la fórmula:

$$C = \frac{W}{D(0.20H + 0.044H^2)}$$

Donde:

C = valor del cohesiómetro, en gr/pulg²

W = peso de los perdigones en el depósito extremo, en gramos

D = diámetro o ancho del espécimen, en pulgadas

H = altura del espécimen, en pulgadas

2.1.b) PRUEBA A BASE DEL MÓDULO DE RESILIENCIA

2.1.b) 1. Cargas cíclicas en un pavimento

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes, las cuales son transmitidas por el tránsito vehicular.

Las deformaciones producidas por el tránsito vehicular son deformaciones resilientes o elásticas las cuales se recuperan cuando se le deja de aplicar las cargas. La recuperación de estas deformaciones es de importancia en las diferentes capas de un pavimento, ya que cada una de ellas actúa esfuerzos de diferentes magnitudes, debido a la estructura inherente de cada capa y su ubicación con respecto a la estructura del pavimento.

Las cargas que son aplicadas al pavimento y sus capas son producto de los vehículos, los cuales al pasar por un determinado punto genera una presión, la cual si se graficaría sería un pulso, la cual está compuesta por esfuerzos normales y cortantes lo cual hace complejo su estudio. La figura 2. 5 muestra el esquema de una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre la cual una carga se mueve a velocidad constante.

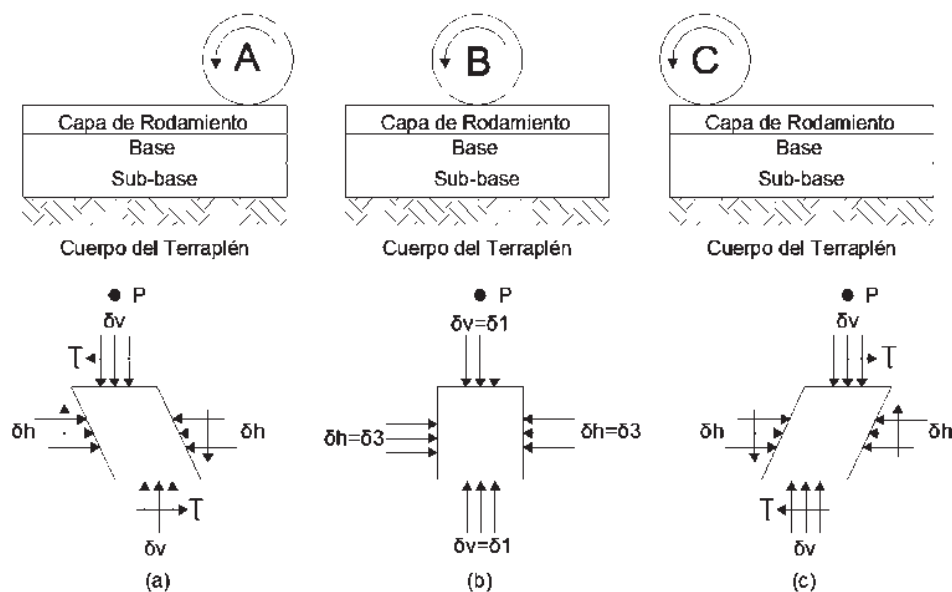


Figura 2. 5 Estado de esfuerzos en la subrasante. (Garnica et al, 2000)

La Figura 2. 5 (a) nos presenta un punto P, que experimenta esfuerzos normales y cortantes debido a la acción de la carga ubicada en el punto A. La Figura 2. 5 (b) nos presenta el punto P, como la carga se encuentra en el punto B se presenta un estado triaxial, debido a que este solo experimenta esfuerzos normales y los cortantes son nulos. La Figura 2. 5 (c) nos presentan la carga en el punto C, donde los esfuerzos cortantes en el punto P están en sentido contrario a los producidos en el punto A.

Como el punto B es el estado más desfavorable debido a que solo actúan los esfuerzos normales, y estos en laboratorio son representados por un esfuerzo de confinamiento, mientras que el paso del vehículo se representa por medio de la aplicación de la carga cíclica.

De acuerdo a las hipótesis anteriores del comportamiento de una estructura de un pavimento, tenemos que agregar que la huella de los neumáticos de un vehículo es diferente de acuerdo con la marca o fabricante, presión de inflado, carga por eje, velocidad de traslado y el estado de la superficie de rodamiento.

Los esfuerzos verticales no son los únicos que se producen en un suelo, existen también los esfuerzos horizontales que se presentan cuando el vehículo está detenido o en movimiento, que aparecen debido al rozamiento provocado por un cambio de dirección, succión de agua y esfuerzos verticales extras debido al impacto, estos debido al movimiento del vehículo y las irregularidades de la carretera.

Al estar un vehículo en movimiento la carga ya no es estático sino dinámico, los cuales debido al movimiento se convierten en movimientos oscilatorios que se transmiten al neumático. Esta carga dinámica de acuerdo a la velocidad y tipo de pavimento tiene una frecuencia, lo cual puede ser valores del orden de un 40% o 50% superiores a los normales con carga estática. Lo cual se ve reflejado en el pavimento como una presión de contacto y/o un aumento en el área o huella de la rodada.

En la Figura 2. 6 se observa una serie de pulsos que son el producto del paso de un vehículo por un punto que muestra como se presentan esfuerzos cortantes y verticales. Los esfuerzos horizontales comienzan casi al mismo tiempo que los esfuerzos cortantes, los esfuerzos cortantes desaparecen cuando los esfuerzos verticales y horizontales se encuentran en su valor máximo, que es producto de que la carga esta directamente por encima del punto. Posteriormente viene un periodo donde los esfuerzos cortantes son de sentido contrario y los esfuerzos verticales y horizontales van disminuyendo hasta ser nulos, de ahí comienza una etapa de reposo para volverse a presentar otro periodo de pulsos.

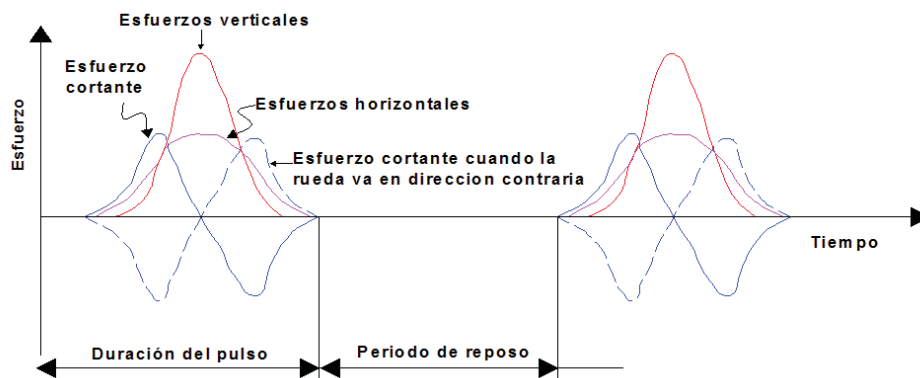


Figura 2. 6 Estado de esfuerzos en una prueba cíclica (Garnica 2000)

2.1.b) 2. Mediciones de esfuerzos y deformaciones en pavimentos

La calidad de los materiales que conforman el pavimento de acuerdo a su estructuración, decrece hacia abajo, por lo cual, el interés es a niveles profundos, ya que las superiores toleran deformaciones aun para altos esfuerzos.

En los pavimentos, las deformaciones que nos interesan desde el punto de vista de deformaciones excesivas. Estas están asociadas a estados de falla, y por otro lado, un pavimento deformado deja de cumplir sus funciones de una manera cómoda para el usuario.

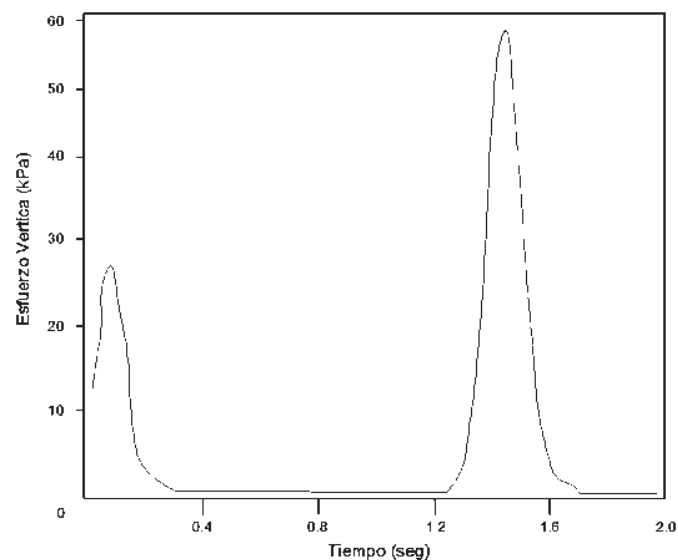
Con el fin de tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios trabajos

experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en el laboratorio. (Garnica et al 2004)

En el año de 1987 la Science and Engineering Research Council propuso una arcilla blanda Bothkennar, cerca del estuario Forth y establecieron en él una investigación geotécnica experimental. Una red de pavimento sin asfaltar fue construida en 1989 incorporándole 16 secciones de pruebas, donde el principal objetivo del estudio fue afirmar el efecto de varios geosintéticos ubicados en la interface entre una capa granular y la arcilla.

Se instalaron 400 instrumentos, cerca de todos los sectores involucrados. La distribución de la instrumentación fue designada para medir efectos específicos relacionados en suposición del método designado. Se obtuvieron al paso de las cargas la acumulación de deformaciones permanentes.

De la información recabada Brown obtiene las gráficas que se observan en la figura 2. 7 (a) y la figura 2. 7 (b) corresponden a las mediciones de esfuerzos y deformación en un punto ubicado a 35 cm de profundidad con respecto a la superficie de rodamiento, en una estructura de un pavimento sujeta al paso de un tracto camión.



(a)

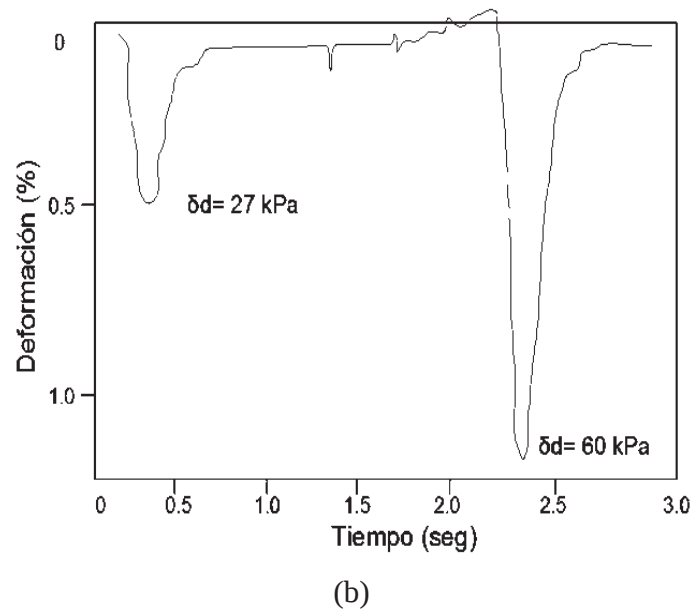


Figura 2. 7 Variación típica de la deformación vertical resiliente en un pavimento con carpeta asfáltica (Brown et al., 1996)

Al observar las gráficas anteriores, a la principal conclusión que se llegó fue que la carga es transmitida al suelo en forma de pulsos la cual depende directamente de la velocidad del vehículo y la carga por eje. En la 2. 7 (a) tenemos el esfuerzo máximo presentado para ese punto, mientras que la 2. 7 (b) observamos la máxima deformación; por lo que la deformación está relacionada directamente con el esfuerzo generado al suelo. (Brown et al., 1996)

También se estudiaron el efecto de una carga en una capa subrasante para un pavimento, en Wakefield ubicada en el condado de West Yorkshire, Inglaterra, con una capa de rodamiento de 165 mm de espesor, donde en la figura 7. 8 se aprecia la variación del esfuerzo vertical.

De esta figura se puede observar que el máximo esfuerzo registrado fue de aproximadamente 16 kPa.

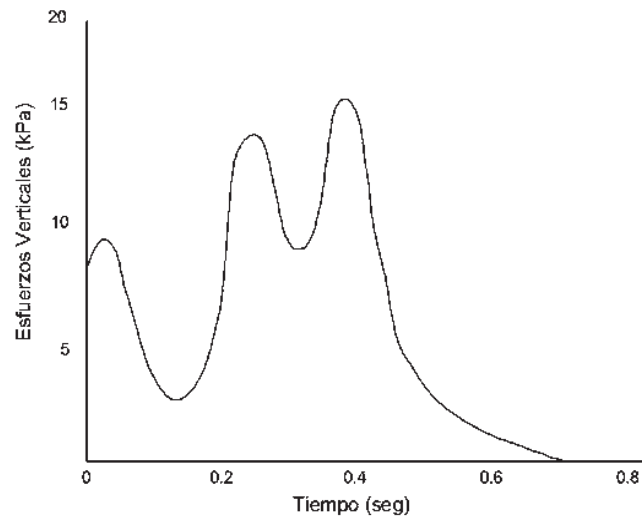


Figura 2. 8 Esfuerzos verticales en subrasante bajo la carpeta de 165 mm (Brown, 1996)

En pavimentos terminados la aplicación directa de cargas de construcción (compactación con rodillos) es menor, se observa que el esfuerzo registrado son muchos mayores que los que se presentarían una vez en uso. Estas pruebas se realizaron en una arcilla blanda en Bothkennar Escocia, y su información la podemos observar en la figura 2. 9.

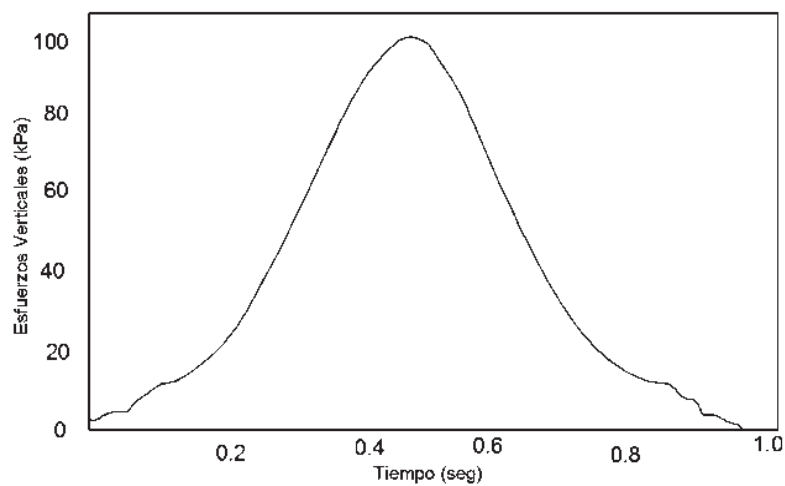


Figura 2. 9 Medidas de esfuerzos verticales en subrasantes bajo una capa granular de 350 mm de espesor (Brown, 1996)

2.1.b) 3. Influencia de la velocidad del vehículo en el tiempo de aplicación de carga

En las siguientes graficas, se observan que los datos obtenidos son el producto del paso de los neumáticos de un vehículo, cuya duración y magnitud del pulso depende de la velocidad de este.

Barksdale en el año de 1971 realizó una serie de experimentos acerca de la respuesta del suelo directamente bajo la superficie de rodamiento de un pavimento, estas respuestas son tiempos de pulsación a diferentes profundidades. Los resultados obtenidos nos dan que cuando un vehículo aumenta su velocidad, su tiempo de aplicación disminuye; también se observa que simulando el esfuerzo vertical con una onda triangular los tiempos de aplicación aumenta. Para los dos tipos de onda se observa que el tiempo de duración de la carga se incrementa conforme se aumenta la profundidad, todo esto se observa en la figura 2. 10.

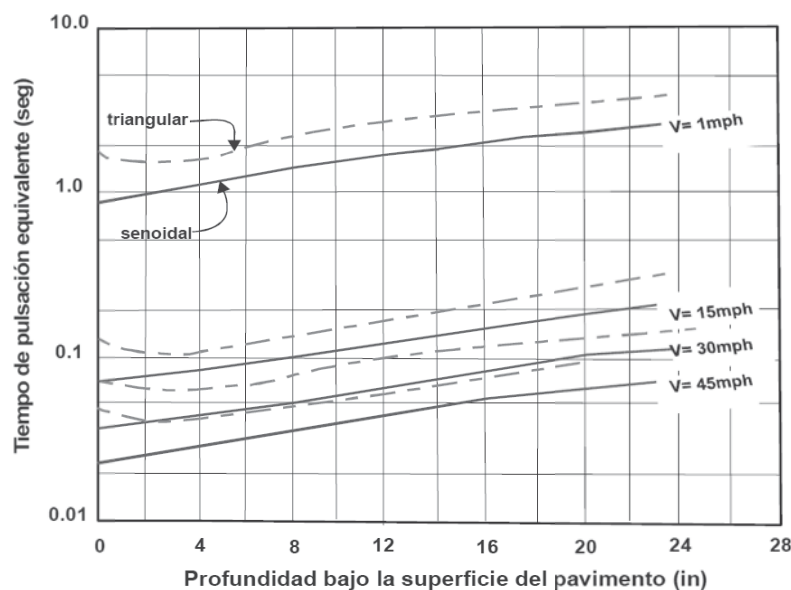


Figura 2. 10 Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con carga senoidal y triangular (1in = 25.4 mm y 1 mph = 1.6 km/hrs) (Garnica et al 2002)

McLean en el año de 1974 con los resultados de la onda triangular de Barksdale y una velocidad de 30 mph, determinó sus propios tiempos de carga simulando una onda

cuadrada; se puede observar que el tiempo de pulsación basado en una onda cuadrada es más pequeña respecto a la onda triangular de Barksdale como se ve en la figura 2. 11.

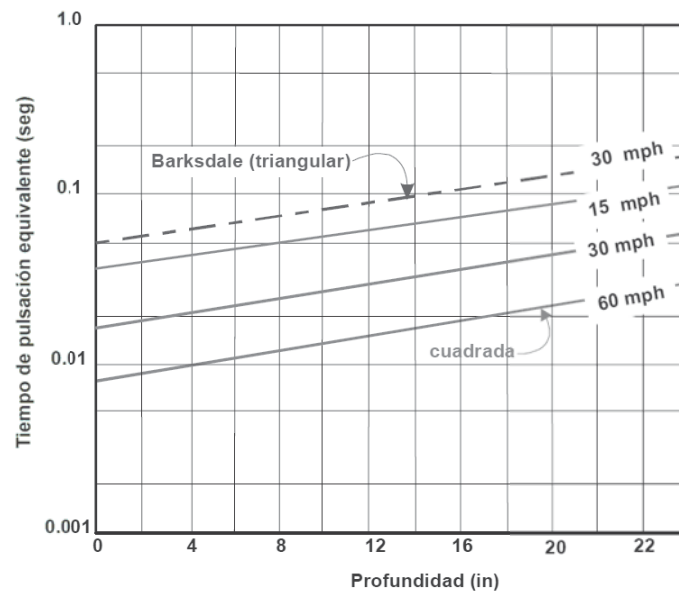


Figura 2. 11 Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con onda tipo cuadrada (Garnica et al 2002)

Como se observa en las dos gráficas anteriores la velocidad del vehículo es una variable en los tiempos de pulsación; por lo cual Huang en 1993 con fines de estandarización para las pruebas cíclicas propone que la onda senoidal tenga una duración de 1 segundo, donde la aplicación de carga es de una duración de 0.1 segundo y para el periodo de reposo de 0.9 segundos.

2.1.b) 4. Concepto de Módulo de Resiliencia

Hveem y Carmany (1948) reconocieron que el módulo dinámico de elasticidad para subrasantes es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento (por fatiga) de las superficies de asfalto y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación. En 1955, Hveem desarrolló el tema “comportamiento resiliente de los pavimentos”. El propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes.

Seed y sus colegas de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo de resiliencia. Este término fue cambiado más tarde por el de módulo resiliente por Seed en 1962, el cual fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se representa como sigue:

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}}$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ε_{axial} = Deformación recuperable

Cuando se llega a un número de ciclo de carga, donde la deformación es aproximadamente constante, la respuesta se puede tomar como elástica. A este estado se le llama módulo de resiliencia, este aplica a suelos finos y materiales granulares.

Así entonces, el concepto de módulo de resiliencia está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida. (Garnica P. et al 2000)

El comportamiento de un suelo debido al tipo y magnitud de cargas, así como las cargas acumuladas y la localización de las diferentes capas de material, nos da un comportamiento de esfuerzo-deformación del tipo resiliente y plástico.

Las deformaciones resilientes o elásticas son aquellas donde la recuperación es instantánea y las plásticas son las que permanecen aun después de que ha cesado la carga. Por lo que la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa, lo cual provoca deformaciones fuera de la admisible y a su vez densificación de los materiales.

La figura 2. 12 (a) nos muestra como la deformación permanente se va acumulando, la primera etapa nos muestra las deformaciones acumuladas son muy amplias. En la etapa media vemos como va cerrando esta deformación. Al final vemos que ya casi ha desaparecido el ciclo de deformación, en esta etapa la deformación tiene un comportamiento resiliente (en donde el módulo secante es igual al módulo de resiliencia).

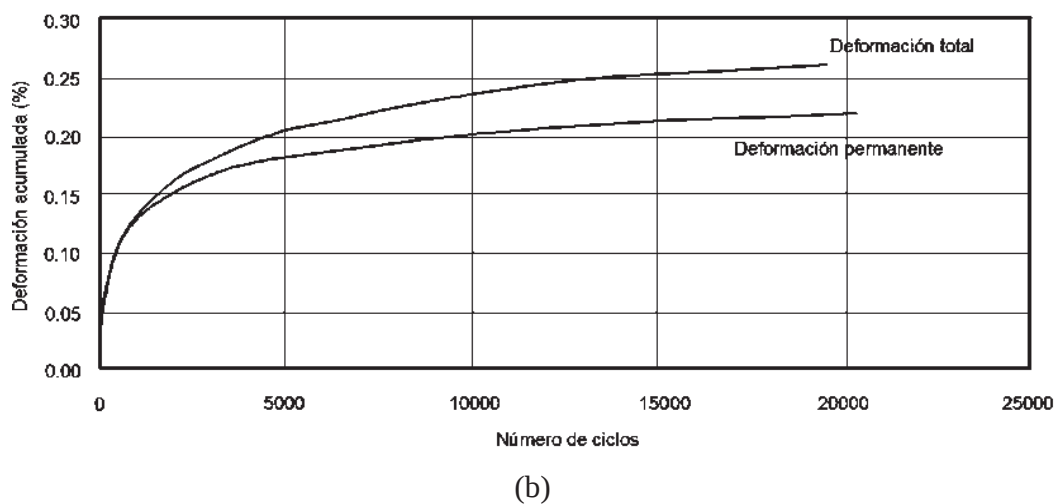
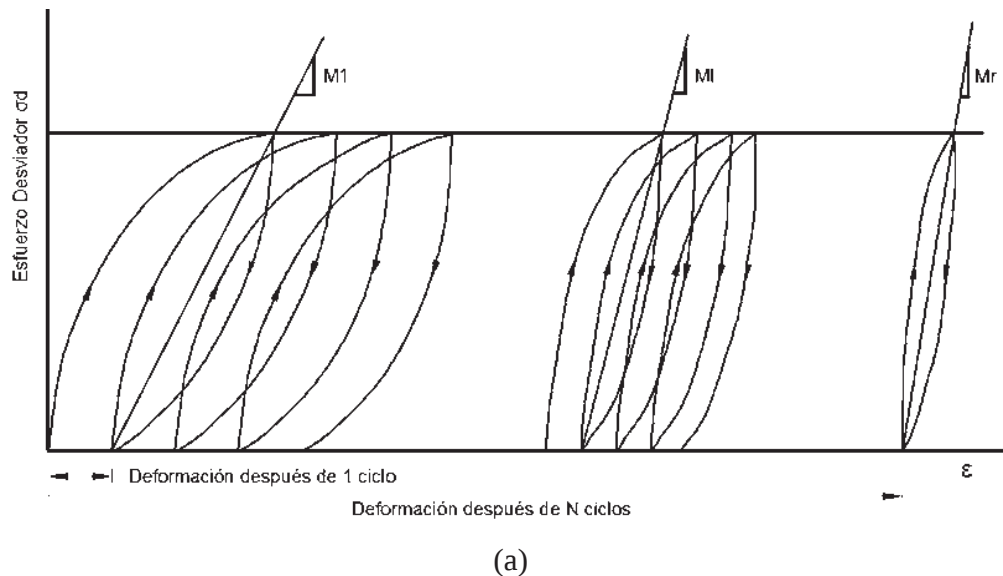


Figura 2. 12 Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador. (Garnica et al 2000)

En la figura 2. 12 (b) se muestra la acumulación de las deformaciones total y plástica durante un cierto número de ciclos.

La importancia que la deformación tiene en los pavimentos es debida a que en los métodos de diseño actuales la deformabilidad es uno de los puntos básicos a considerar y, de hecho, la mayoría de ellos se centran en mantenerla en límites razonables. (Garnica P. et al 2000)

2.1.b) 5. Factores que afectan el módulo de resiliencia en suelos cohesivos

De acuerdo a lo visto a lo largo del tiempo se ha podido observar que en las pruebas de módulo de resiliencia, los resultados obtenidos no son del tipo constante, todo esto debido a una serie de factores externos que intervienen directamente en la prueba. Los principales factores según Garnica et al 2002 que se pueden mencionar son:

- 1) Parámetros de compactación: peso volumétrico seco, contenido de agua y grado de saturación.
- 2) Método de compactación.
- 3) Número de aplicaciones del esfuerzo.
- 4) Tixotropía.
- 5) Magnitud del esfuerzo desviador.
- 6) Succión del suelo.

Parámetros de compactación: Peso volumétrico seco, contenido de agua y grado de saturación. Para comprender esta parte comenzaremos por definir de forma sencilla que son cada uno de estos términos. El peso volumétrico seco (γ_d) es la relación entre el peso de la fase sólida de una muestra y el volumen de la muestra de suelo. Por lo cual este representa un valor particular del peso volumétrico de la masa de suelo (γ_m) para el caso es el de un grado de saturación del suelo es nulo.

El contenido de agua o humedad de un suelo (w) es la relación entre el peso de agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida. Varía teóricamente de 0 a infinito. En la naturaleza la humedad de los suelos varía entre límites muy amplios.

El grado de saturación (G_w) es la relación entre su volumen de agua y el volumen de sus vacíos, y su valor varía de 0% (suelo seco) a 100% (suelo totalmente saturado).

La influencia de estos factores es de particular importancia práctica, ya que con un control apropiado de estos parámetros, un suelo puede ser compactado de manera tal que se puedan minimizar los efectos perjudiciales de las características de alta resiliencia.

Seed et al (1962) y Tanimoto y Nishi (1970) mostraron que las deformaciones resilientes eran relativamente pequeñas para especímenes preparados en el lado seco del óptimo y se incrementaban rápidamente a medida que el contenido de agua excedía el óptimo.

Thompson y Robnett (1979) mostraron que el módulo de resiliencia decrece cuando se incrementa el grado de saturación.

Con el fin de analizar estos parámetros, el IMT (2001) llevó a cabo un estudio, en el cual se probaron 35 muestras de arcilla de alta compresibilidad. Los pesos volumétricos variaron entre 12 y 15 kN/m³ y los contenidos de agua entre 14 y 36%. Las muestras se sometieron a 20000 ciclos con un esfuerzo desviador de 69 kPa y una presión de confinamiento de 13.8 kPa. El rango de variación del parámetro módulo de resiliencia fue de 33800 a 186000 kPa, para los rangos de contenido de agua y peso específico seco utilizados.

Tomando como base los datos de módulo de resiliencia obtenidos, se trazaron líneas isocaracterísticas de igual valor de módulo de resiliencia con el fin de observar su comportamiento en el espacio de compactación. Dicho comportamiento se muestra en la Figura 2.13.

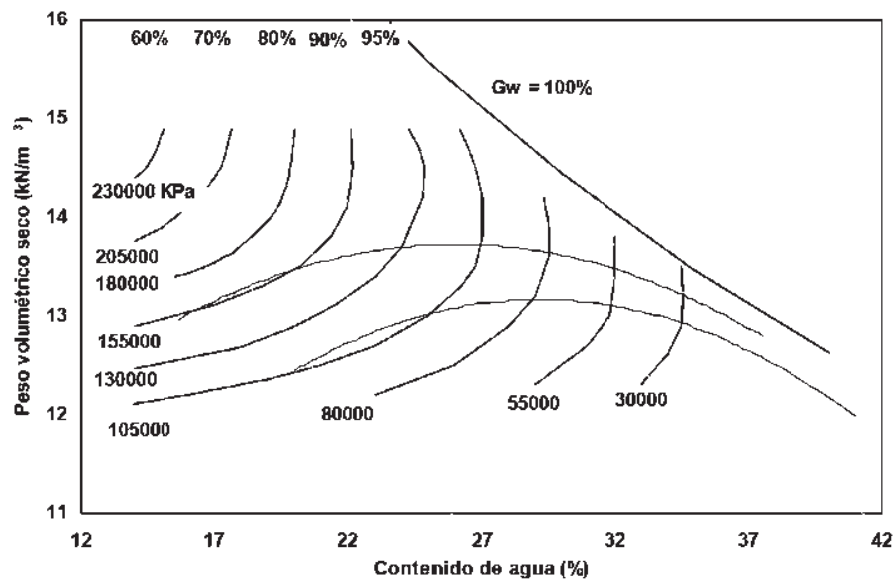


Figura 2. 13 Líneas isocaracterísticas (Garnica et al 2002)

La Figura 2.13 muestra claramente la influencia del contenido de agua y del peso específico seco en la magnitud del módulo de resiliencia (Garnica 2002).

Por lo cual se deberá de tener en cuenta tanto el peso volumétrico así como el contenido de agua ya que son parámetros que inciden en la prueba por lo cual se deberán de controlar estos parámetros.

- **Método de compactación.** Estudios desarrollados por Seed (1967), Elliot y Thornton (1988) sobre las características de la arcilla al momento de ser compactadas demostraron que para muchos suelos, las partículas de la arcilla adoptan un determinado arreglo entre ellas.

Los cambios en el arreglo de las partículas se deben principalmente al esfuerzo cortante, que es inducido al suelo durante el proceso de compactación. Cuando las muestras se compactaron a grados de saturación bajos se pudo observa que en las muestras no hay deformaciones apreciables provocadas por la compactación, debido a esto, las partículas de arcilla asumen un arreglo al azar, dicho arreglo se denomina estructura floclada.

Pero por otro lado cuando las muestras fueron compactadas a altos grados de saturación, arriba de 85%, la resistencia al esfuerzo cortante inducida durante el proceso de compactación varia de forma considerable.

De acuerdo al tipo de compactación en el lado rama húmeda se presentan acomodos diferentes, cuando la compactación es por amasado se presenta un arreglo de las partículas llamado estructura dispersa Figura 2. 14 (a); mientras que por compactación estática para las mismas condiciones, se observa que el arreglo de las partículas es una estructura flocula como las compactadas en un grado de humedad del lado de la rama seca Figura 2. 14 (a).

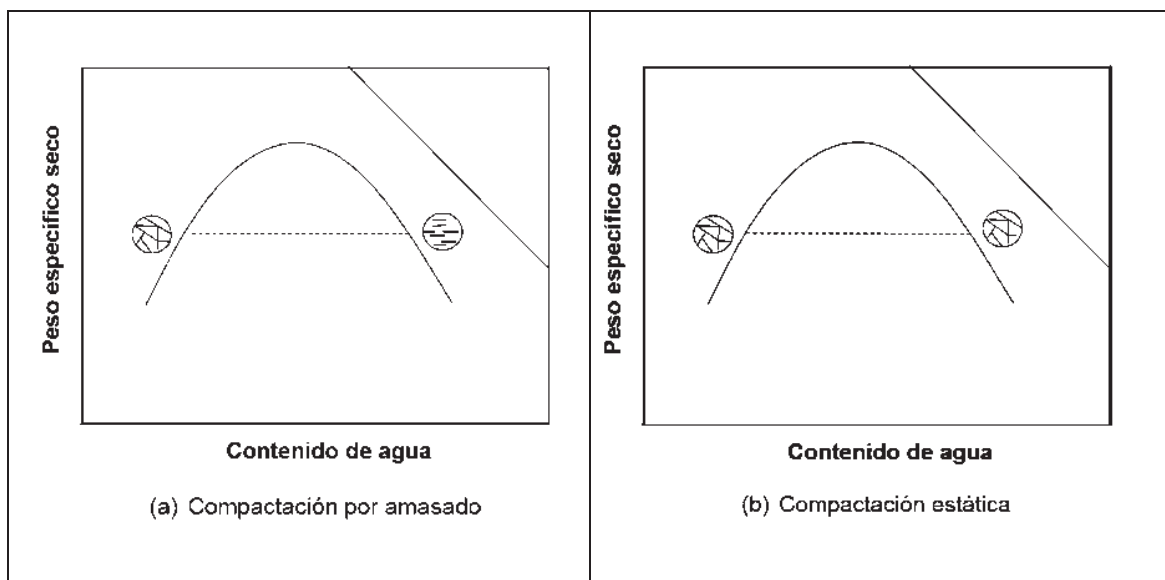


Figura 2. 14 Orientación de las partículas (garnica et al 2002)

- **Número de aplicaciones del esfuerzo.** Para explicar el fenómeno que ocurre debido a las repeticiones de carga, se realizaron varios especímenes de arcilla compactada; dichos especímenes fueron sometidos a la prueba de módulo de resiliencia de acuerdo al método que marca el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP); donde el espécimen se ve sometido a una secuencia de esfuerzos desviadores con diferentes esfuerzos de confinamiento, el equipo cíclico triaxial aplicaba una onda tipo senoidal con tiempo de aplicación de carga de 0.1 s y 0.9 s de periodo de reposo.

La Figura 2.15 muestra un ensaye realizado sobre una muestra de arcilla compactada con un peso volumétrico seco de 12.31 kN/m^3 y contenido de agua de 20.10 %. Se puede notar una variación importante del módulo durante todo el proceso de carga cíclica. Al aumentar el número de ciclos parece tender a un valor constante.

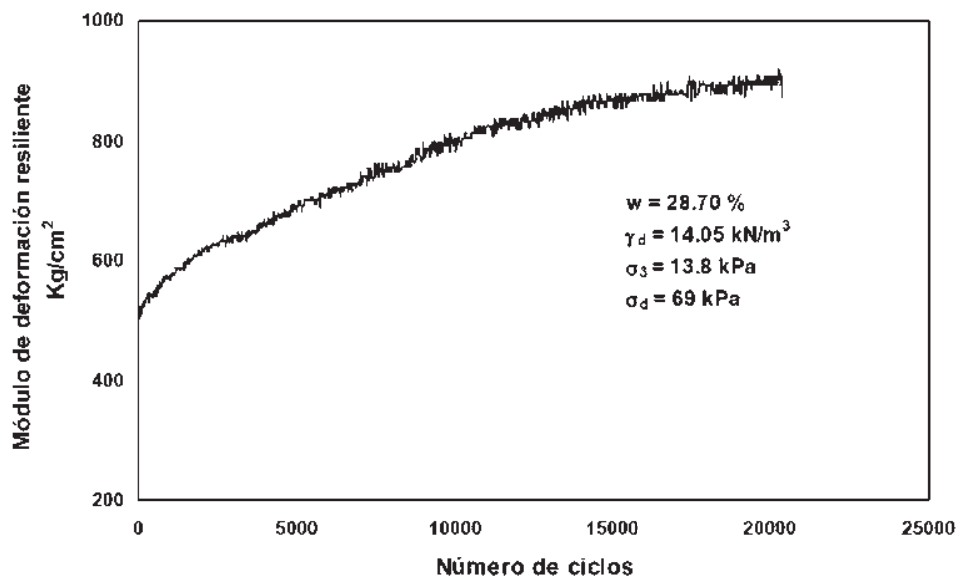


Figura 2. 15 Variación del módulo con el número de ciclos (Garnica et al 2002)

- **Tixotropía.** Se ha dicho que entre las partículas arcillosas se ejercen fuerzas debidas a las ligaduras fisicoquímicas que se manifiestan en sus respectivas películas envolventes de agua y cationes adsorbidos. Un amasado enérgico de la arcilla, puede romper esas ligaduras momentáneamente, lo cual se refleja macrofísicamente por una pérdida sensible de las propiedades de resistencia del material. Sin embargo, la mayoría de las arcillas vuelven más o menos lentamente a sus propiedades originales; este fenómeno se conoce como tixotropía. El fenómeno es consecuencia del restablecimiento de las películas adsorbidas en su primitiva condición.

En estudios previos sobre arcillas compactadas (Mitchell, 1960; Seed y Chan, 1957; y Seed et al., 1960) se ha encontrado que las muestras compactadas a altos grados de saturación, particularmente por métodos de compactación que inducen cortantes en el suelo, muestran un pronunciado incremento en la resistencia si se permite un periodo de reposo. Este

incremento en resistencia es atribuido a la tixotropía y al cambio progresivo en los arreglos de las partículas y presiones de poro del agua dentro del suelo en un tiempo prolongado. (Garnica et al 2002)

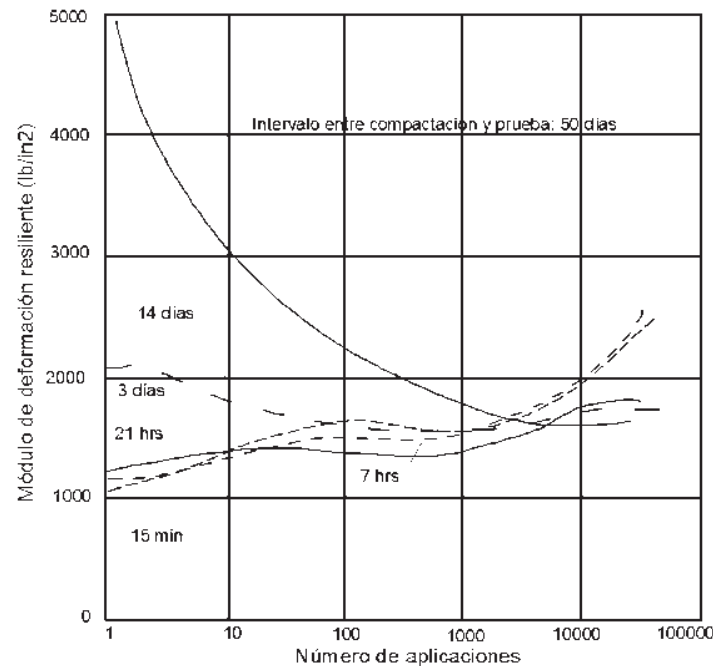


Figura 2. 16 Efecto de tixotropía en las características resilientes de un suelo (Garnica et al 2002)

En la Figura 2. 16 podemos observar que se sometieron a prueba diferentes especímenes, los cuales tuvieron un periodo de almacenamiento entre la compactación y el momento de hacer la prueba de 15 minutos, 7 y 21 horas, así como 3, 14 y 50 días. Como podemos ver a periodos mayores de almacenamiento se obtuvo mayor valor del módulo resiliente, esto es debido a las propiedades tixotrópicas del suelo, pero después de 5000 ciclos, se observa que ya no es tan diferente el valor del módulo, esto debido a que los ciclos de carga destruyen el acomodo de las partículas, haciendo ya el factor de tixotropía un factor no relevante para intervalos de carga superiores a los 5000 ciclos.

- **Magnitud del esfuerzo desviador.** El módulo de resiliencia de suelos cohesivos está afectado significativamente por la magnitud del esfuerzo desviador y del esfuerzo de confinamiento. Varios estudios (Seed et al., 1962; Monismith et al., 1967; Thompson y

Robnett, 1979; Tanimoto y Nishi, 1970; Brown et al., 1975 demostraron que, cuando el esfuerzo desviador aplicado es bajo, el valor del módulo resiliente decrece de forma significativa al aumentar el esfuerzo desviador, pero la disminución del módulo es más pequeña para esfuerzos desviadores grandes.

La Figura 2. 17 es el resultado de pruebas realizadas a una arcilla compactada, con un contenido de agua de 29.9 %, con un peso volumétrico de 13.93 kN/m^3 . Como se puede ver que el módulo de resiliencia depende en gran manera del esfuerzo desviador aplicado, mientras que el módulo de confinamiento no tiene tanta influencia sobre este.

Como se puede observar también en los esfuerzos desviadores iniciales (primeros valores), la pérdida de resistencia del módulo de resiliencia es rápida. Pero para esfuerzos mayores a 40 kPa, el decremento del módulo de resiliencia es inferior (inapreciable).

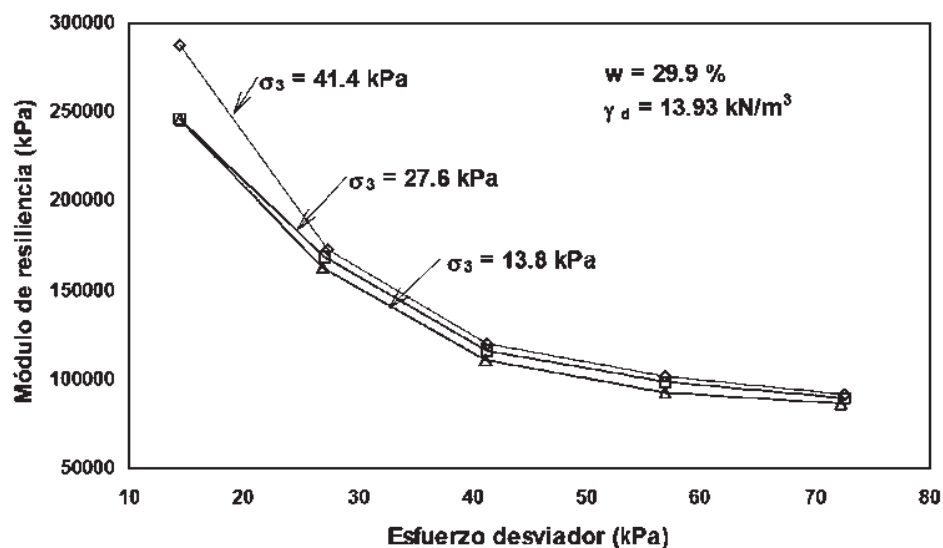


Figura 2. 17 Efecto de la intensidad del esfuerzo en las características de resiliencia (Garnica et al 2002)

- **Succión del suelo.** Aunque no es técnicamente correcto, el término succión puede ser descrito en forma simple como una medida de la afinidad del suelo con el agua. La succión total del suelo se puede definir como la magnitud de la presión relativa a la presión externa del gas en el agua pura. La succión del suelo está compuesta principalmente por dos

tipos diferentes de succión: la succión matricial, la cual es una presión negativa actuando en los granos sólidos del suelo y la succión osmótica, que está asociada al contenido de sales. La succión matricial (capilar) se expresa en cm de columna de agua. Estas presiones son negativas necesariamente, para mantener las condiciones de equilibrio en el suelo.

Dehlen (1969) y Finn et al. (1972) mostraron que existe una relación lineal entre el módulo de resiliencia medido mediante pruebas de laboratorio y la succión de humedad del suelo. Esto mostró también que los especímenes preparados en laboratorio exhiben las mismas características de rigidez que los especímenes compactados en campo cuando los especímenes son comparados utilizando los mismos valores de succión.

Fredlund et al. (1975, 1977) propuso el módulo de resiliencia como una función de tres variables de esfuerzos: esfuerzos de confinamiento ($\sigma_3 - U_a$), el esfuerzo axial ($\sigma_1 - \sigma_3$), y la matriz de succión ($U_a - U_w$). (Garnica 2002)

2.1.b) 6. Factores que afectan el módulo de resiliencia en materiales granulares

Como se ha visto a lo largo del tiempo los factores que afectan al módulo de resiliencia podemos mencionar que los más importantes son los relacionados al tipo del material y sus características, además podemos mencionar también los niveles de esfuerzos aplicados y la duración del pulso de carga, los cuales se describen brevemente a continuación:

- Tipo de material.
- Tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico y granulometría.
- Magnitud del esfuerzo aplicado.
- Contenido de agua.

• ***Tipo de material.*** Este factor toma en cuenta las características del material, donde podemos ver que la naturaleza de la roca y el grado de sanidad de la roca, son dos aspectos fundamentales, aunado al tamaño máximo, rugosidad y angulosidad de las partículas y su composición granulométrica.

Musharraf en 1994 realizó un estudio donde designó para las pruebas seis tipos de materiales, los cuales consistieron de tres calizas, una arenisca, un granito y una riolita, los cuales son de la región del Estado de Oklahoma, USA, que son materiales comúnmente usados en la construcción de base y subbase de pavimentos en esa región

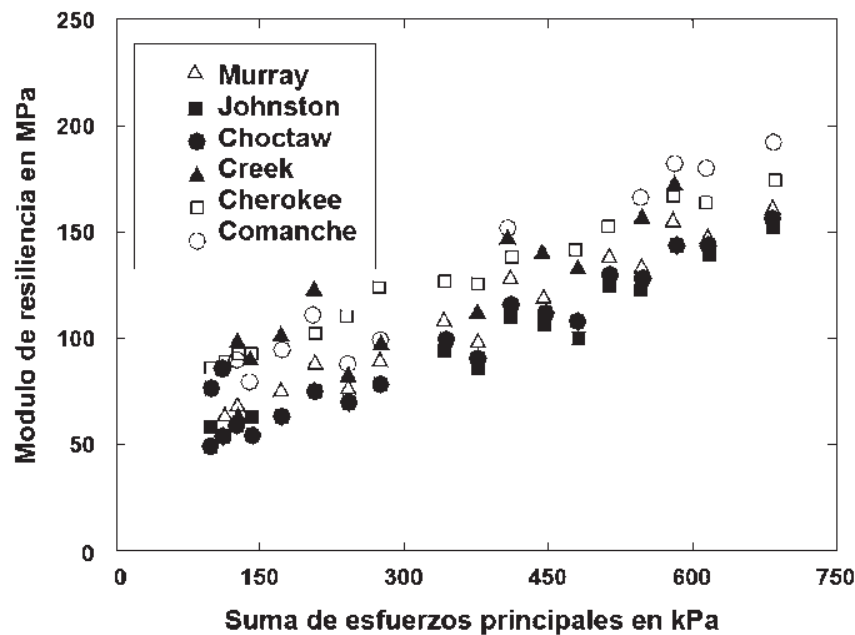


Figura 2. 18 Módulo de resiliencia obtenidos en seis materiales (Garnica et al 2002)

Como podemos observar en la Figura 2. 18 se ven que los valores del módulo de resiliencia varían de 50 a 200 kPa, de acuerdo a la suma de los esfuerzos principales, donde varían de un 20 a 50%. Además de que se presenta un efecto contrario a los resultados en suelos, ya que el módulo de resiliencia aumenta, conforme se va incrementando el nivel de esfuerzos.

- **Tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico y granulometría.** Investigaciones recientes han demostrado que los materiales granulares compactados al 95% de la prueba ASSHTO modificada, demostraron que hay incrementos en el valor del módulo de resiliencia se incrementa al aumentar el peso específico, que se relacionó con una densificación ligera del material al ser compactado a un nivel bajo de energía.

Para observar el efecto de tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico, granulometría y tamaño de la muestra se ven claramente en los resultados que presenta Musharraf et al 1994.

	TIPO DE PRUEBA					
	A	B	C	D	E	F
Procedimiento	T292-911	T292-911	T292-911	T292-911	T292-911	T292-911
Compactación	T180-90D	T180-90D	Vibratoria	Vibratoria	Vibratoria	Vibratoria
Tamaño del espécimen	10.16	15.24	10.16	15.24	15.24	15.24
Granulometría	I	II	I	II	I	III
Peso específico (gr/cm ³)	2.444	2.408	2.304	2.387	2.310	2.355

Tabla 2. 1 Características de los especímenes (Garnica et al 2002)

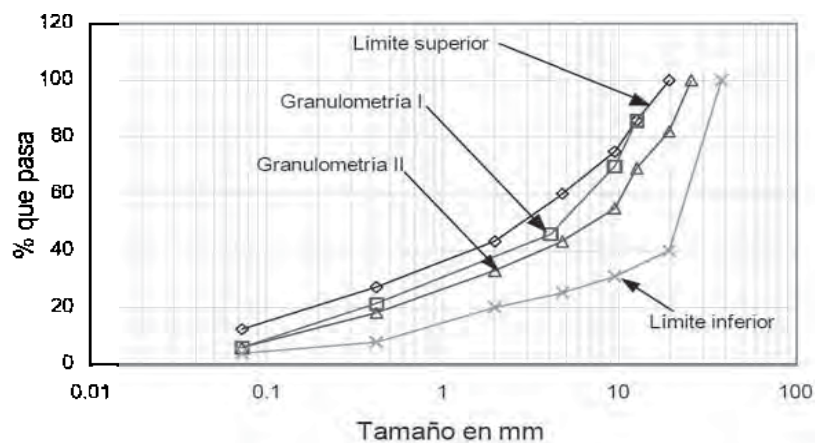


Figura 2. 19 Granulometría del tipo I y II (Garnica et al 2002)

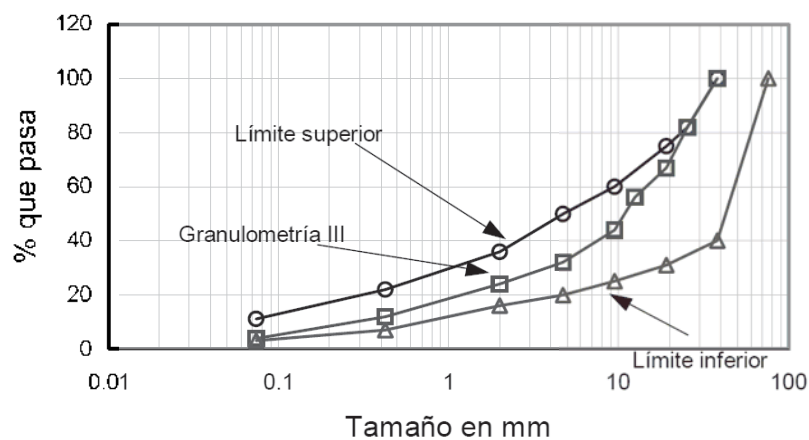


Figura 2. 20 Granulometría del tipo III (Garnica et al 2002)

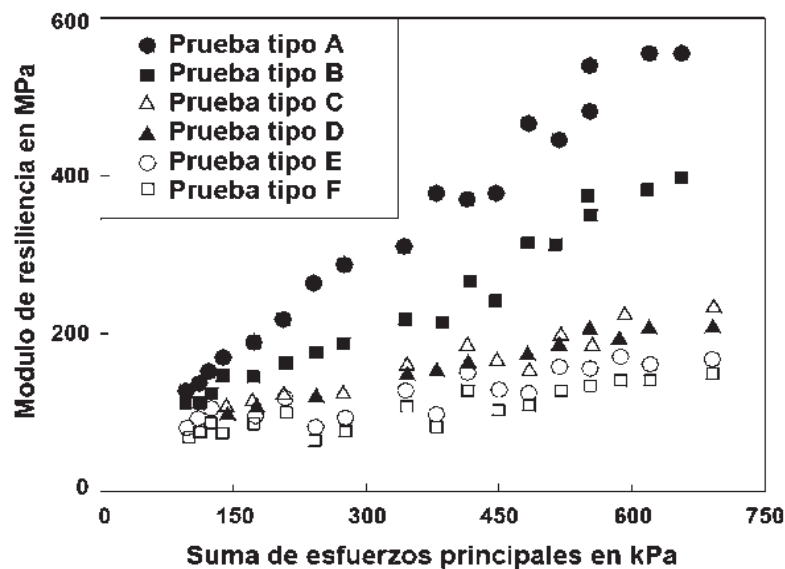


Figura 2. 21 Efecto de la compactación y granulometría en el modulo de resiliencia para especímenes de diferente tamaño (Garnica et al 2002)

Como se puede observar el valor más alto de módulo de resiliencia es para el espécimen de 10.16 cm, que presenta una granulometría tipo I, pero la diferencia del método de compactación y el peso específico al ser menor en el tipo C, confirman que son parámetros que influyen en los valores del módulo.

Mientras que para los especímenes de 15.24 cm se puede ver que la granulometría del tipo I sigue rigiendo la tendencia, que demuestra que para granulometrías más cercanas al límite superior en los materiales granulares se tiene una respuesta mejor. Además de que el peso específico es el más grande para el tipo C.

Por lo cual se llegó que para especímenes de diámetro gobernó la granulometría sobre el volumen de la muestra, pero esto también condujo a que si la granulometría está más cerca del límite superior de la gráfica de granulometría estandarizada y el procedimiento de compactación, nos presentan materiales con mayor módulo de resiliencia.

- **Magnitud del esfuerzo aplicado.** En el Instituto Mexicano del Transporte se realizaron pruebas para ver la influencia del esfuerzo aplicado en el modulo de resiliencia;

para lo cual se seleccionaron cuatro granulometrías, las identificadas como GW1 y GW2, son las que se encuentran dentro de los límites de materiales bien graduados, siendo GW1 colocada en la parte superior de la curva.

Las curvas GP1 y GP2, son materiales de granulometría uniforme, por lo cual se encuentra fuera de zonas granulométricas especificadas por la SCT.

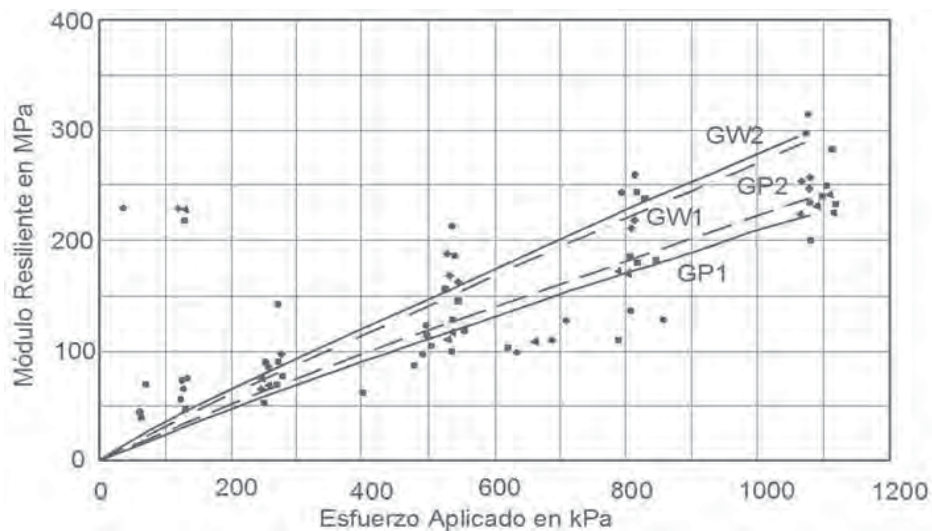


Figura 2. 22 Evolución del módulo de resiliencia con el nivel de esfuerzo aplicado (Garnica et al 2002)

Como se observa en la Figura 2. 22 podemos ver como el módulo de resiliencia va en aumento conforme se incrementa el esfuerzo aplicado, además los valores del módulo tienden a agruparse en los materiales de granulometría similar.

- **Contenido de Agua.** Ping Tiam después de una serie de estudios realizados con materiales de construcción usados comúnmente de base y subbase de un pavimento, en el Estado de Oklahoma, se trabajaron tres granulometrías con tres contenidos de agua, con el fin de encontrar la influencia de la humedad en el módulo de resiliencia. Los contenidos de agua fueron los correspondientes a la óptima (4.6 a 6.3%), 2% menor y 2% mayor a la óptima.

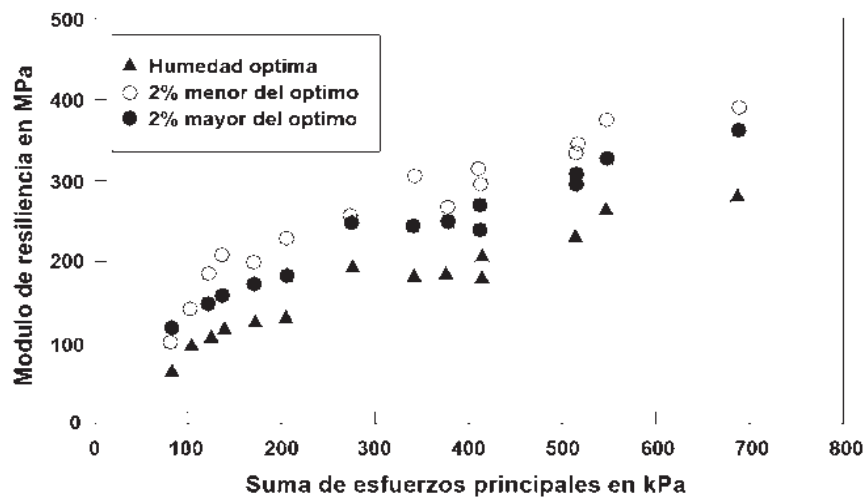


Figura 2. 23 Valores medios de módulos de resiliencia obtenidos para diferentes contenidos de agua (Garnica et al 2002)

Como se observa en la Figura 2. 23, los contenidos de agua óptimos presentaron resistencia menor a los matariles con 2% menor y mayor. Pero los materiales con un 2% menor de contenido de humedad, presentaron un módulo de resiliencia alto, por lo cual se puede inferir que no hay valor único de módulo de resiliencia, ya que como se ve en la gráfica para la misma granulometría, pero con diferentes contenidos de agua vario el módulo.

2.1.b) 7. Variación del módulo de resiliencia con contenido de agua

Esta investigación fue dirigida por Jianchao Li y su colaborador Bashar S. Qubain, donde se experimentaron módulos de resiliencia en Arcilla de baja plasticidad (CL), Arena arcillosa (SC) y una Grava arcillosa (GC), para pavimentos en una autopista de Pensilvania, el primer tramo en el área de Filadelfia y la otra en la región de Somerset al oeste de del Estado.

Se examinaron el efecto de la variación de humedad en el material, los contenidos de agua propuestos fueron de 2 a 3% menos del óptimo, óptimo 2 a 3% arriba del óptimo y saturado, el agua es agregada de forma minuciosa al suelo y se mezcla y se coloca en un

molde (71 mm de diámetro y 142 mm de alto) en 5 capas y compactados al 100% del valor de la prueba proctor estándar.

Material	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	Compactación (%)	Variación	Grado de saturación (%)	Humedad de prueba (%)	Mr (kPa)
CL- Seco	1.94	85	99	3% seco	57	8.3	110 649
CL- Optimo	1.96	11.8	100	óptimo	85	11.8	83 534
CL- húmedo	1.90	13.4	97	1.97% húmedo	85	13.2	59 241
CL-Saturado	1.96	11.8	100	6.3% húmedo	100	17.6	38 080
SC- Seco	2.04	8.2	101	1.6% seco	68	8.2	110 411
SC- Optimo	2.03	11.1	101	óptimo	91	11.1	125 391
SC- húmedo	1.97	14.2	97	3% húmedo	95	14.2	56 298
SC-Saturado	2.03	11.1	101	1.9% húmedo	100	13.1	87 976
GC- Seco	2.16	7.1	101	1.3% seco	84	7.7	103 831
GC- Optimo	2.15	9.4	100	óptimo	90	9.4	69 771
GC- húmedo	2.05	11.6	96	1.6% húmedo	90	10.6	52 737
GC-Saturado	2.15	9.4	100	2.1% húmedo	100	11.1	62 465

Tabla 2. 2 Resumen de resultados del proyecto del área de Filadelfia (Li y Qubain 2003)

El protocolo de la prueba es el designado por ASSHTO para la Determinación del Módulo de Resiliencia para suelos y materiales agregados (T307 – 99), donde se da un acondicionamiento de 1000 ciclos y 15 secuencias de carga (100 ciclos por secuencia), con una combinación de tres presiones de confinamiento (41.4, 27.6 y 13.8 kPa) y 5 niveles de esfuerzo desviador (12.4, 24.8, 37.3, 49.7 y 62.0 kPa). Las deformaciones eran tomadas por LVDT's colocados radialmente sobre la celda triaxial. Los resultados de los dos proyectos se muestran en las tablas 2. 2 y 2. 3.

En la tabla 2.2 se muestran los resultados del módulo de resiliencia para los 3 materiales de la zona de Filadelfia, donde la palabra “seco” se refiere al lado de la rama seca del óptimo de compactación; mientras que “húmedo” es referente al lado de la rama húmeda.

Material	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	Compactación (%)	Variación	Grado de saturación (%)	Humedad de prueba (%)	Mr (kPa)
Arena arcillosa	1.87	12.8	99	óptimo	78	12.8	108 330
				Saturado	100	16.4	50 370
Arena arcillosa	1.92	12.2	102	óptimo	81	12.2	96 600
				Saturado	100	15.5	71 070
Arena Arcillosa con grava	1.93	13.6	99	óptimo	92	13.6	90 390
				Saturado	100	15.2	54 510
Arena arcillosa	1.96	11.3	100	óptimo	82	11.3	137 310
				Saturado	100	14.2	57 960
Arena arcillosa con grava	1.87	12.0	100	óptimo	67	12.0	132 480
				Saturado	100	17.5	41 400
Arena arcillosa con grava	1.91	12.4	98	óptimo	81	12.4	91 080
				Saturado	100	15.0	53 820

Tabla 2. 3 Resumen de resultados del área de Somerset (Li y Qubain 2003)

Como podemos ver en la Tabla 2. 3 las pruebas a los tres tipos de materiales del área de Somerset, donde solo se realizó para la variación óptima y saturado. Las gráficas resultado de las pruebas nos muestran.

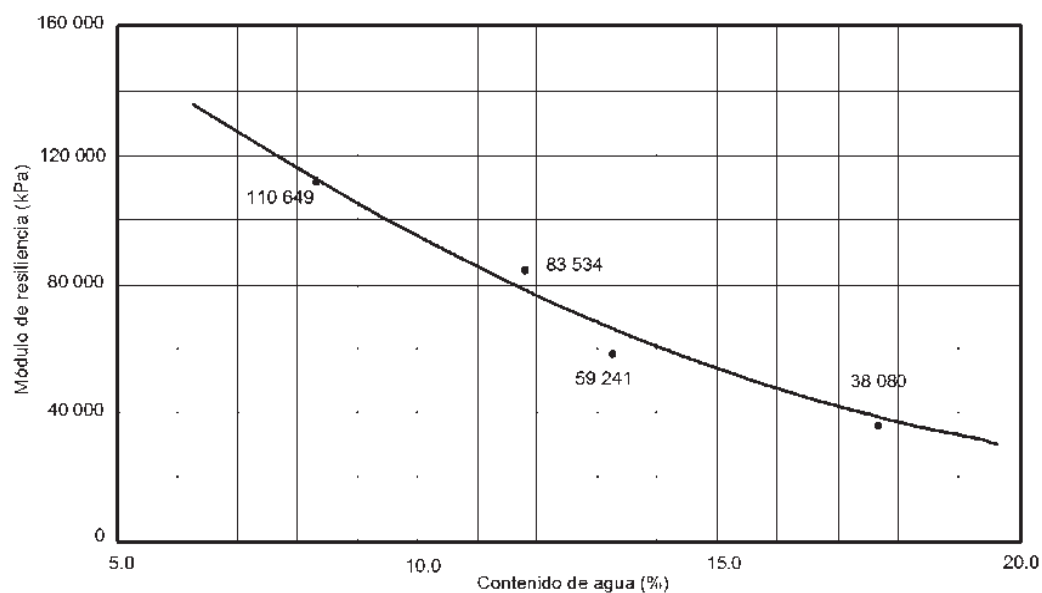


Figura 2. 24 Resultados para una arcilla (Li y Qubain 2003)

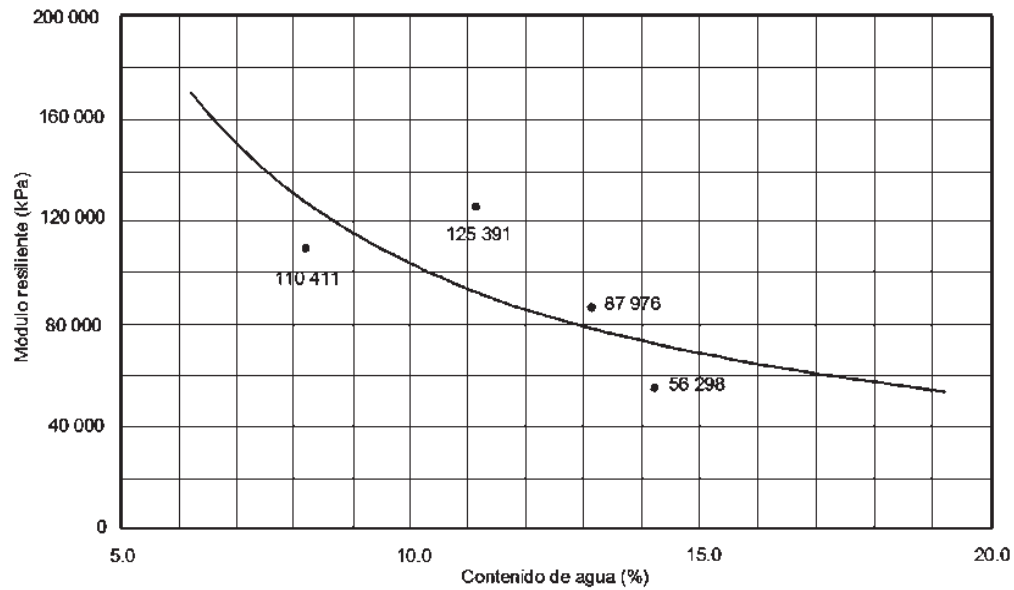


Figura 2. 25 Resultados para una arena arcillosa (Li y Qubain 2003)

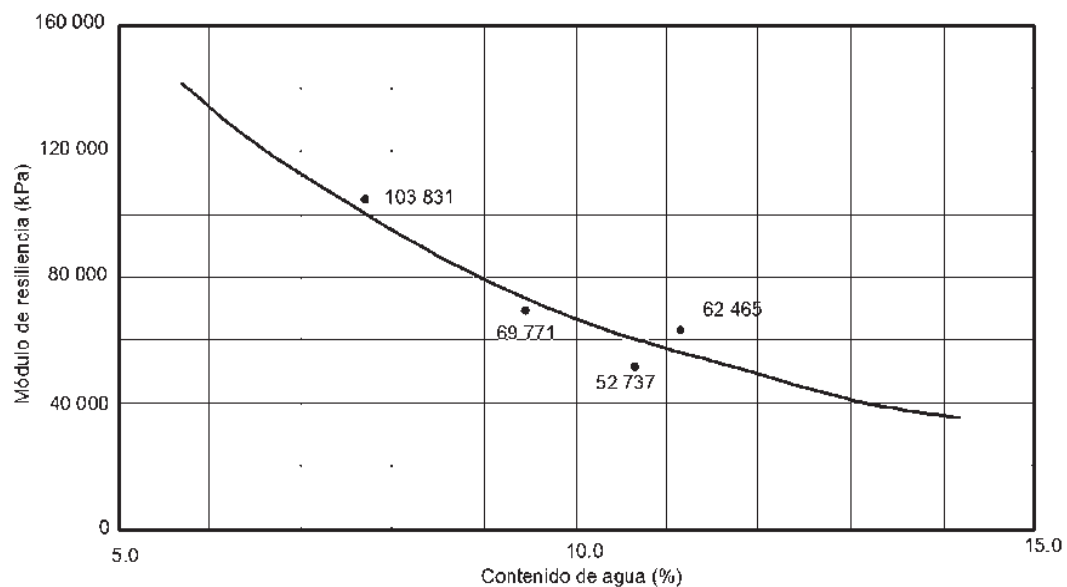


Figura 2. 26 Resultados para una grava arcillosa (Li y Qubain 2003)

Como podemos observar en las Figuras 2. 24, 2. 25 y 2. 26 podemos que a un mayor contenido de humedad disminuye la resistencia del módulo resiliente disminuye. Lo cual nos indica que existe una relación entre el contenido de agua y el módulo de resiliencia.

Por otro lado la relación que existe entre el estado de contenido de agua óptimo y saturado, donde los valores obtenidos del módulo con humedad óptima son superiores, otra observación es que sobre todo en la arcilla la variación del módulo da un porcentaje aproximado de 50% menor en el material saturado con respecto al estado optimo.

Por otro lado en la grava arcillosa se observó que la fluctuación del valor del módulo resiliente es del orden del 25% aproximadamente entre contenido óptimo y saturado de agua, lo cual se atribuye al tamaño de las partículas y al acomodo de las partículas finas, dentro del espécimen, una vez que entraron en contacto con el agua.

2.1.c) PRUEBA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE.

Las pruebas de deformación permanente consisten generalmente en la aplicación de una carga cíclica a una muestra, bajo la estandarización de 0.1 segundo de aplicación de carga y 0.9 segundos de reposo.

2.1.c) 1. Definición de deformación permanente.

En los materiales existen un límite elástico y un límite plástico, donde el límite elástico es el esfuerzo máximo que un material puede resistir, donde el material vuelve a su estado original una vez que se le ha dejado de aplicar el esfuerzo; a este estado se le llama deformación elástica, si se pasa este límite el material presenta un estado plástico, al cual se denomina deformación permanente, si se sigue aplicando esfuerzo llega el momento donde se pasa el límite plástico, donde se presenta una falla en el material.

Por lo cual podemos decir que la deformación permanente en suelos es estado plástico de esfuerzos, donde un suelo ya no recupera su estado inicial.

2.1.c) 2. Factores que afectan a la deformación permanente en suelos cohesivos

Los factores principales que determinan la deformación permanente en un suelo cohesivo compactado, sometido a carga repetida, son los siguientes:

- 1) Estado de esfuerzos del suelo.
- 2) Número de aplicaciones del esfuerzo desviador.
- 3) Estado físico del suelo.
- 4) Tipo de suelo.

- **Estado de esfuerzos del suelo.** Seed et al. (1955), Monismith et al (1975) y Brown et al (1977), en sus investigación demostraron que el esfuerzo desviador ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) es el principal factor que tiene en la deformación plástica acumulada para suelos finos bajo carga repetida. Por lo que el confinamiento o el esfuerzo σ_3 es un factor secundario. (Garnica et al 2002)

- **Número de aplicaciones del esfuerzo desviador.** A lo largo de las pruebas en laboratorio, se ha observado que la deformación permanente presenta tres etapas en su evolución:

Como se observa en la Figura 2. 27 la primera etapa presenta una deformación casi instantánea, la cual se presenta en los primeros ciclos de carga. La segunda etapa que se ve como fase de transición, en donde la deformación se acumula gradualmente durante los ciclos de aplicación de la carga. La tercera etapa se presenta un estado estable en la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeño, donde la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no es significativa en la acumulación de la deformación.

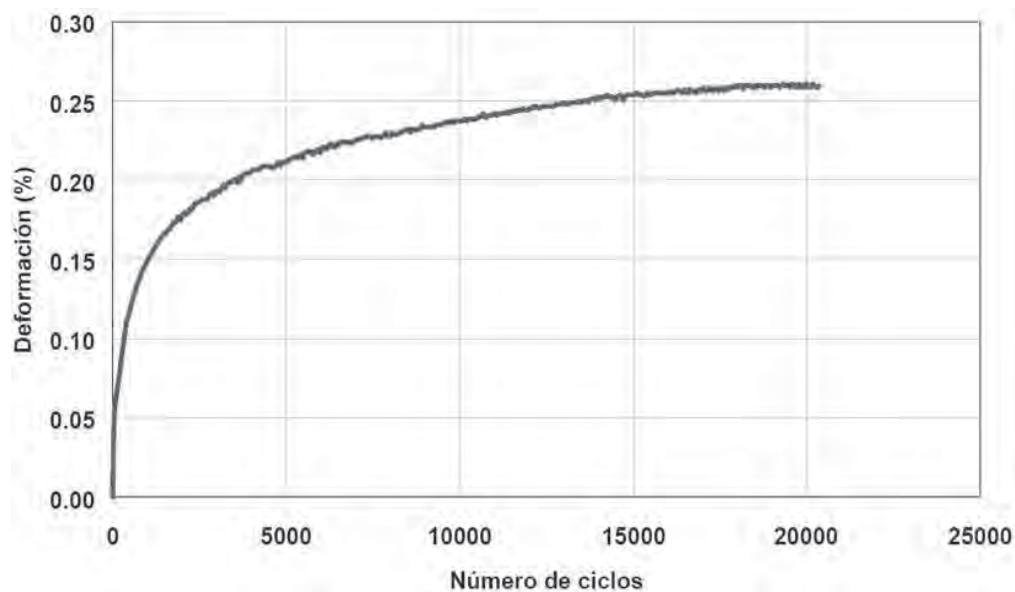


Figura 2. 27 Gráfico de deformación permanente en una arcilla (Garnica 2002)

Estado físico del suelo. Este factor lo constituyen el contenido de agua y peso específico y tiene un efecto significativo en el suelo. Garnica en el año 2001 realizó una serie de ensayos con el fin de analizar las condiciones de compactación. Los datos de las muestras se describen a continuación:

PRUEBA	w (%)	γ_d (kN/m ³)	ϵ_p (%)
A	18.40	12.96	0.07
B	35.37	12.95	0.54

Tabla 2. 4 Características del material ensayado (Garnica 2002)

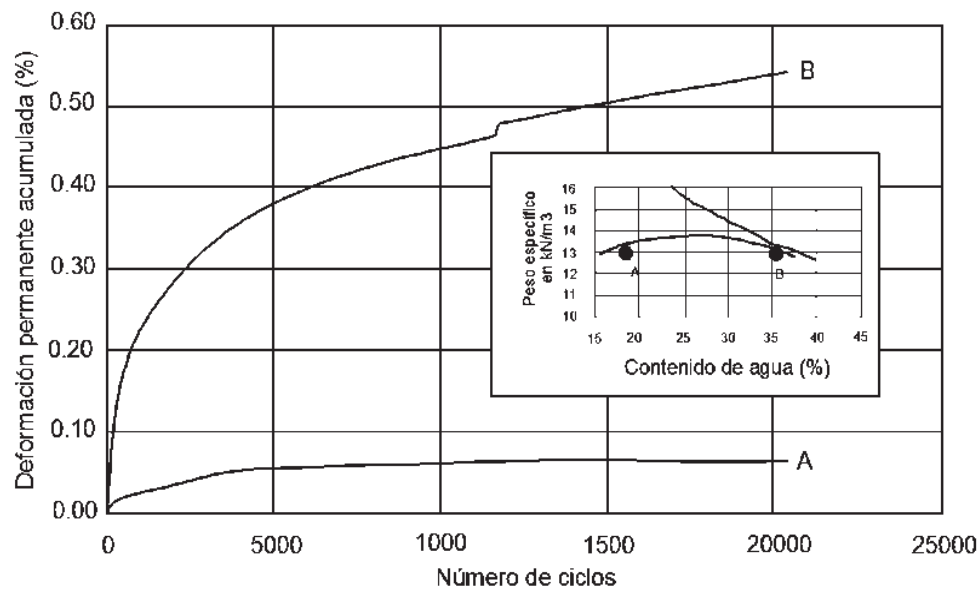


Figura 2. 28 Deformación permanente y contenido de agua (Garnica 2002)

En la Figura 2. 28 se observa que la muestra A fue compactada con un contenido de agua de 18.40% (rama seca) y una energía de compactación de $710 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$, y un peso volumétrico de $12.96 \text{ kN}/\text{m}^3$; la muestra B fue compactada con un contenido de agua de 35.37% (rama húmeda) y una energía de compactación de $600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$, y un peso específico de $12.95 \text{ kN}/\text{m}^3$. Como podemos ver la muestra A solo presenta una deformación acumulada del 0.07%, mientras que la muestra B se obtuvo una deformación de 0.56%. Por otro lado la deformación del espécimen A es tan solo el 12.5% de la deformación total de la muestra B.

- **Tipo de suelo.** De acuerdo a la estructura del suelo y su método de compactación que se utilice, así como de su compactación que se le aplique, como se analizó en el punto anterior.

2.1.c) 3. Factores que afectan a la deformación permanente en suelos granulares

Como es sabido las capas granulares de un pavimento no tienen una respuesta lineal a las cargas que son sometidos por el paso de los vehículos. Para poder comprender los aspectos

del comportamiento plástico de los materiales granulares, primeramente debemos comprender los factores que influyen en la respuesta de los materiales, estos determinan la deformación permanente del suelo. Estos factores son los siguientes:

- 1) Nivel de esfuerzos.
- 2) Rotación del esfuerzo principal.
- 3) Número de aplicaciones de carga.
- 4) Contenido de humedad.
- 5) Historial de esfuerzos.
- 6) Densidad.
- 7) Granulometría y tipo de agregado

- **Nivel de esfuerzos.** El nivel de esfuerzos es uno de los factores más determinantes en la deformación permanente de un suelo granular. Debido a que la magnitud del esfuerzo está relacionada con la acumulación de la deformación permanente e inversamente con la presión de confinamiento.

Lashine (1971) y Brown y Hyde (1975) en sus investigaciones encontraron que la deformación permanente se estabiliza en un valor que está directamente relacionado con el esfuerzo desviador y la presión de confinamiento actuante.

Otros resultados se obtuvieron con presiones de confinamiento variables y constantes, con resultados similares; por lo cual otros investigadores han intentado explicar estos fenómenos a partir del esfuerzo cortante máximo del material. La idea de esta línea de investigación considera que la deformación por la acción de las cargas repetidas es el límite permisible para el material. (Garnica et al 2002)

- **Rotación del esfuerzo principal.** El efecto de la reorientación del esfuerzo principal en el comportamiento de la deformación permanente no está todavía plenamente comprendido. Esto probablemente se debe al hecho de que la prueba triaxial de carga

repetida, el medio más común de reproducir las condiciones del tránsito en un laboratorio, falla al proveer el cambio continuo en la dirección de los esfuerzos principales.

Pero otro tipo de pruebas como la prueba de corte directo demostró que hay un incremento en la deformación permanente debido a la rotación del esfuerzo principal. Por otro lado Chan en sus investigaciones noto que cuando el esfuerzo cortante es mayor al esfuerzo normal aplicado la deformación permanente era mayor. (Garnica et al 2002)

- **Número de aplicaciones de carga.** El crecimiento de la deformación permanente en materiales granulares bajo carga repetida, es un proceso de acumulación de deformación que es producido gradualmente por acción de la carga que es aplicada al espécimen. por lo cual el número de ciclos es un factor a considerar ya que este es a largo plazo. Por lo cual varios investigadores infieren en que el comportamiento plástico de los materiales granulares se estabiliza poco a poco, por lo cual puede existir un valor límite para la acumulación de deformación permanente.

Lekarp y Dawson (1988) argumentan que la estabilización se logra sólo cuando los esfuerzos aplicados son bajos. Por otra parte, altos valores de esfuerzos, podrían resultar en incrementos continuos de deformación permanente y deterioro gradual. (Garnica et al 2002)

- **Contenido de humedad.** Los investigadores que han estudiado el efecto del contenido de agua en capas granulares de pavimento en el laboratorio y en el campo, creen que la combinación de un alto grado de saturación y una baja permeabilidad, debido a drenaje pobre, proporciona un aumento en la presión de poro, esfuerzo efectivo bajo y, consecuentemente, baja rigidez y baja resistencia a la deformación.

En un estudio conducido por Haynes y Yoder (1963), la deformación total axial permanente creció más del 100% cuando el grado de saturación se incrementó de 60 a 80%. Barksdale (1972) observó deformaciones axiales permanentes mayores, arriba del 68%, en muestras saturadas comparadas con otras ensayadas en condiciones parcialmente saturadas. (Garnica et al 2002)

- **Historial de esfuerzos.** El comportamiento de deformación permanente de suelos y materiales granulares está relacionado directamente con su historial de esfuerzos, esto quiere decir que cuando un esfuerzo se aplica de forma gradual, la deformación permanente resultante es menor, comparada con la que el esfuerzo fue aplicado de forma inmediata.

Aunque el efecto del historial de esfuerzos en el comportamiento de las deformaciones permanentes ha sido reconocido, investigaciones muy limitadas han sido hechas para estudiar este efecto. En pruebas de deformación permanente en laboratorio, el efecto del historial de esfuerzos es eliminado utilizando un nuevo espécimen de cada trayectoria de esfuerzo aplicada. (Garnica et al 2002)

- **Densidad.** El efecto de la densidad se considera un factor importante para el estudio de comportamientos a largo plazo de materiales granulares, ya que la resistencia a la deformación permanente bajo la acción de una carga repetida mejora como resultado de una densidad alta.

Estudios realizados por Holubec (1969) lo llevaron a la conclusión de que en materiales de densidad alta se ve una reducción de deformación permanente considerable en materiales de forma angular, además de que no hay incremento de presión de poro transitoria durante cargas repetidas.

Para agregados redondeados, sin embargo, este decremento en la deformación al incrementar la densidad no se considera significativa, mientras ellos son inicialmente de más alta densidad relativa que los agregados angulares para el mismo esfuerzo de compactación.

- **Granulometría y tipo de agregado.** Dunlap (1966) notó que si un cambio en la granulometría produce un incremento en la densidad relativa para el mismo esfuerzo de compactación, la deformación permanente decrecerá. El efecto de la granulometría también fue investigado por Thom y Brown (1988) donde encontraron que este no era claro,

mientras esta varía con el nivel de compactación. Cuando no están compactados, los especímenes con granulometría uniforme resultaron con la menor deformación permanente. Por otra parte, la resistencia a la deformación plástica fue similar para todas las granulometrías cuando los especímenes estaban altamente compactados.

El efecto del contenido de finos fue investigado por Barksdale (1972, 1991) y Thom y Brown (1988), quienes concluyeron que la resistencia a la deformación permanente en materiales granulares es reducida mientras la cantidad de finos se incrementa.

Allen (1973) relacionó la diferencia en deformaciones plásticas entre diferentes tipos de agregados, con la misma densidad, a las características superficiales de las partículas. Esto concluyó que materiales angulares, tales como roca triturada, experimentan deformaciones permanentes menores comparadas a materiales como grava con partículas redondeadas. Esto parecía ser el resultado de mayores ángulos de resistencia al cortante en materiales granulares debido a un buen enlace de partículas. (Garnica et al 2002)

2.1.c) 4. Caracterización de materiales no consolidados

Los investigadores Walaa E. I. Khogali y El Hussein H. Mohamed en el año de 2004 publicaron los resultados de sus pruebas realizadas a tres materiales: un suelo cohesivo, arena y material triturado. Esta prueba fue realizada durante tres años, la información recabada para la prueba, contiene los esfuerzos aplicados, tráfico e información de cambios, esto obtenido de una sección típica, con materiales de la región de Ontario Canadá.

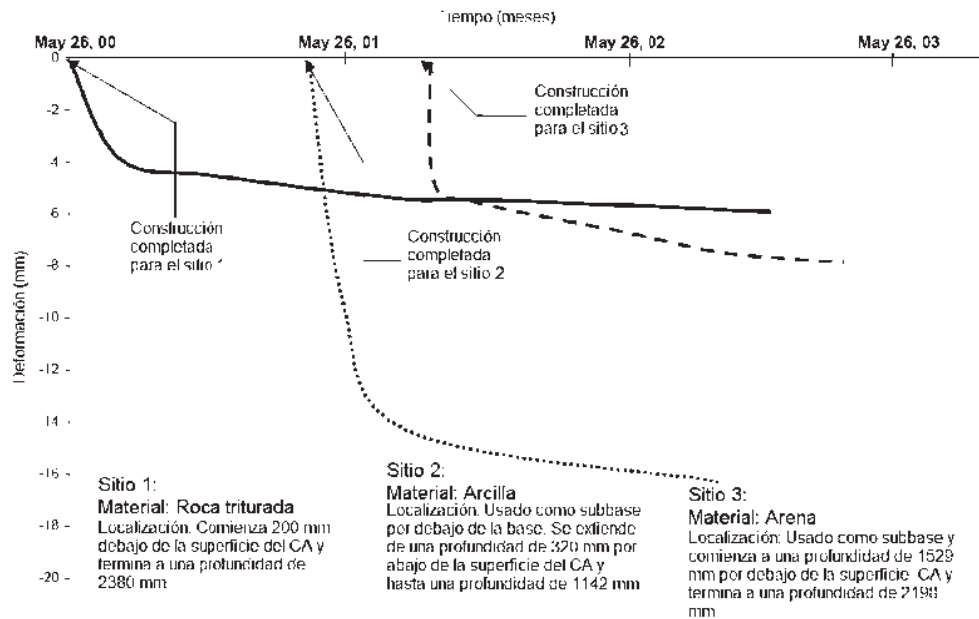


Figura 2. 29 Ubicación de los materiales y su deformación permanente (Khogali y Mohamed 2004)

Como se observa en la figura 2. 29 después de tres años de monitoreo, hay una deformación en los materiales, la cual es el producto del paso de los vehículos, además se observa que la mayor deformación permanente ocurre durante el primer año para los tres materiales. En base a esta información recabada se reprodujo todas las condiciones de esfuerzo como carga aplicada y confinamiento.

La reproducción de las condiciones en laboratorios cuidó que los factores de granulometría, densidad, compactación contenido de agua y la magnitud de esfuerzo aplicado fuera lo más real posible.

Se utilizó como protocolo de prueba la norma AASHTO T292-91, todos estos aspectos anteriormente llevó a la Consejo Nacional de Investigación de Canadá (NRC), a publicar los siguientes resultados.

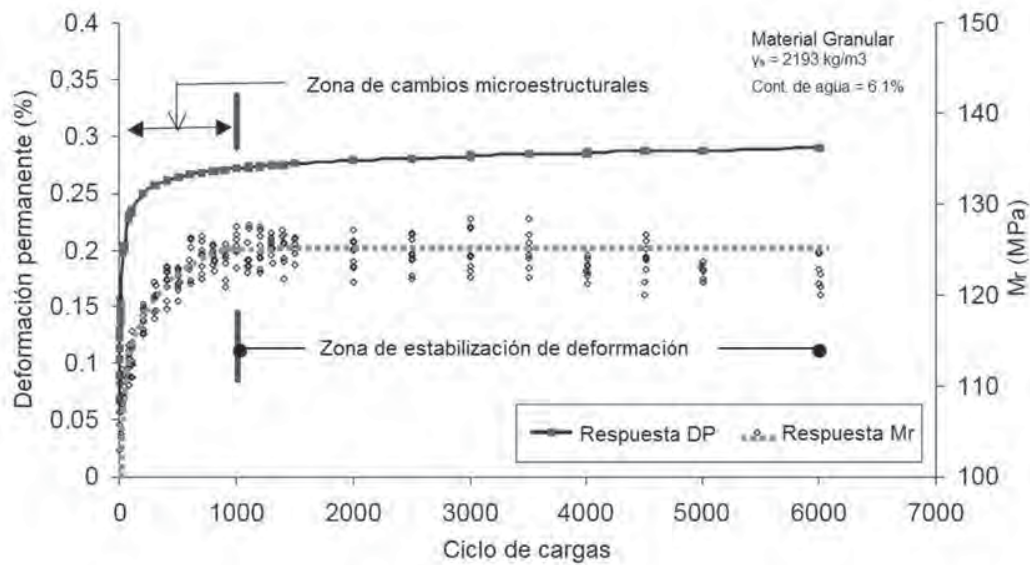


Figura 2. 30 Variación en la respuesta del módulo resiliente y la deformación permanente en roca triturada (Khogali y Mohamed 2004)

En la Figura 2. 30 se pueden observar que para una roca triturada, existe una zona donde hay un cambio rápido de deformación, seguido por una segunda etapa donde se presentan los cambios microestructurales que dan paso a la tercera etapa, esta consta en una estabilización aparente, debido a que las deformaciones son más pequeñas y en un periodo de tiempo más largo.

Además podemos ver que el módulo de resiliencia tiene una tendencia de ir aumentando su resistencia conforme pasan los ciclos de aplicación de carga. Esta resistencia se estabiliza aproximadamente en los mismos ciclos en donde comienza la zona de estabilización de la deformación permanente.

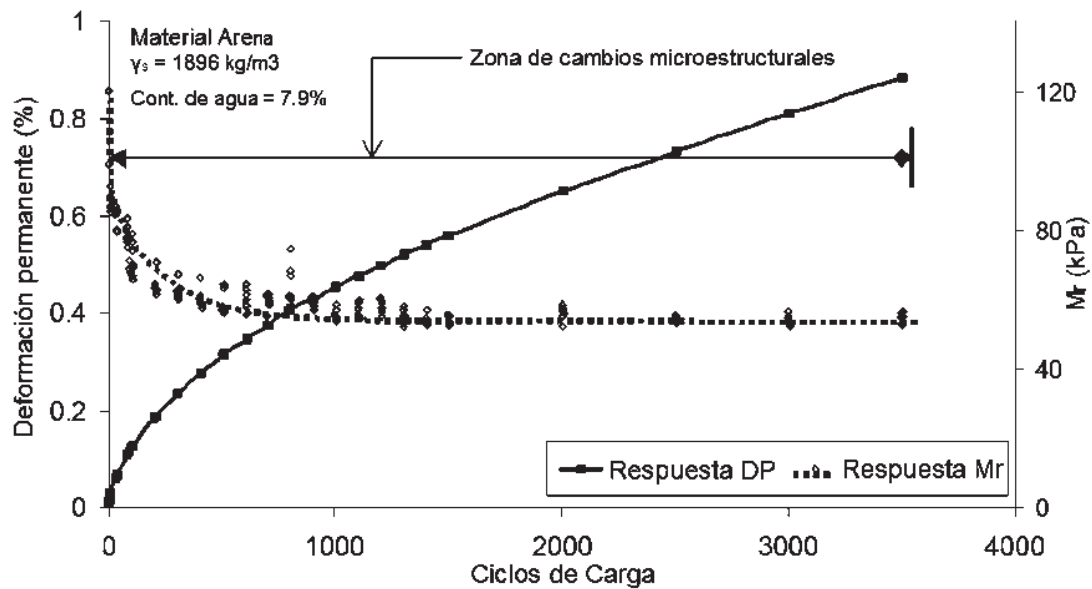


Figura 2. 31 Variación en la respuesta del módulo resiliente y la deformación permanente en una arena (Khogali y Mohamed 2004)

En la figura 2.31 se puede observar la respuesta de una arena, en este gráfico podemos ver no existe una zona de cambios rápidos de deformación, sino que se comienza directamente a presentarse los cambios microestructurales, los cuales siguieron para la prueba sin llegar a la zona de estabilización.

Además en lo referente al módulo de resiliencia, el valor de este decrece de una forma muy rápida hasta los primeros 100 ciclos, de ahí la resistencia sigue decreciendo hasta llegar a una zona de estabilización alrededor de los 1000 ciclos.

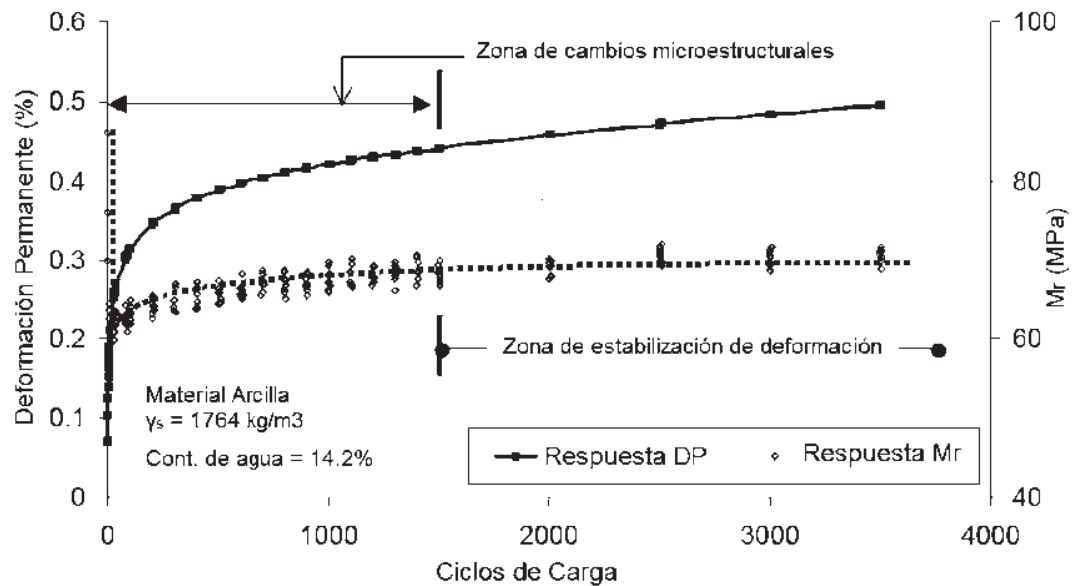


Figura 2. 32 Variación en la respuesta del módulo resiliente y la deformación permanente en una arcilla (Khogali y Mohamed 2004)

En la Figura 2. 32 se puede observar la variación de la deformación permanente en una arcilla su respuesta a la deformación permanente es rápida ya que comienza directamente en la zona de cambios microestructurales, para llegar a su zona de estabilización, aunque este paso es un mayor número de ciclos que con la roca triturada.

En lo referente al módulo de resiliencia podemos ver que al principio se presenta un efecto similar al de una arena, donde se comienza en un valor alto, pero decrece muy rápido, pero este valor a partir del décimo ciclo comienza a presentar el mismo comportamiento que en la roca triturada, un aumento del módulo en forma lenta, hasta llegar a una tendencia a estabilizarse el valor del módulo de resiliencia.

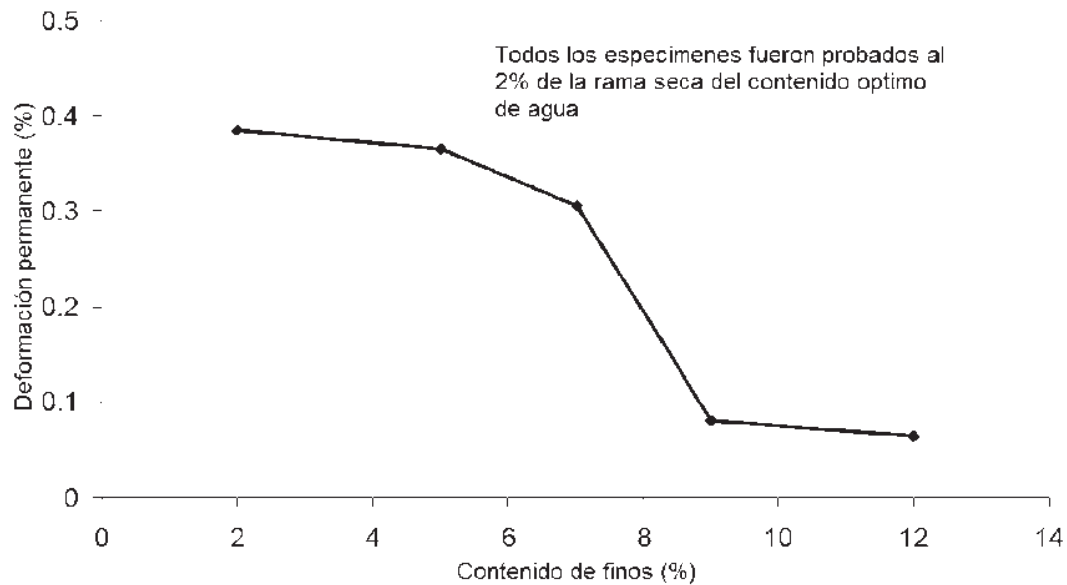


Figura 2. 33 Efecto del contenido de finos en la deformación permanente en un material granular típico de Ottawa (Khogali y Mohamed 2004)

En la Figura 2. 33 todos los especímenes fueron realizados con el mismo contenido de agua, pero con diferentes valores de contenido de finos, donde se llegó a la conclusión que para un contenido de finos de 12% se presentaron un mejor resultado en la resistencia a la deformación permanente, que en valores inferiores de contenido de finos.

Los resultados anteriores fueron de interés por lo cual se realizaron pruebas con material con un contenido de finos del 12%, pero con diferentes contenidos de agua. Por lo cual como se ve en la Figura 2. 34 con un valor inicial de contenido de agua de 3.5% se tiene una deformación permanente baja esta aumenta conforme se acerca el calor óptimo de agua (5.4%), pero en cuanto se pasa al nivel de saturación la deformación se dispara a más del doble.

Por lo que se llegó a la conclusión de que el contenido de agua tiene influencia directa sobre los valores de la deformación permanente, sobre todo en la fase de cambios microestructurales.

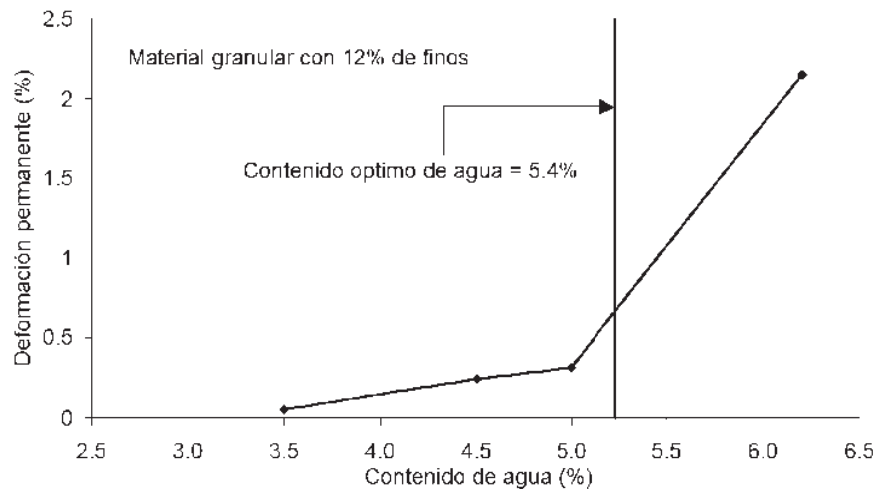


Figura 2. 34 Efectos del contenido de agua y finos en la deformación permanente (Khogali y Mohamed 2004)

2.1.c) 5. El impacto de material triturado en el rendimiento de la carretera

En el año 2009 el investigador Morched Zeghal publicó los resultados que obtuvo de estudiar dos materiales granulares a los cuales denominó “original” y “triturado”, refiriéndose al origen del material. Se trabajaron dos densidades 90 y 95% de la densidad máxima de la prueba proctor modificada; el esfuerzo desviador aplicado es de 50 y 80 kPa. El confinamiento es de 50 kPa para todas las pruebas.

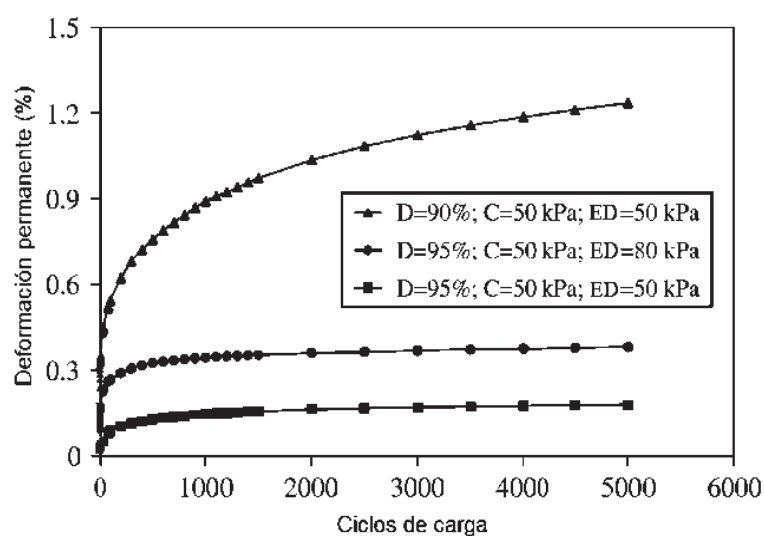


Figura 2. 35 Deformación permanente en el material original (Zeghal 2009)

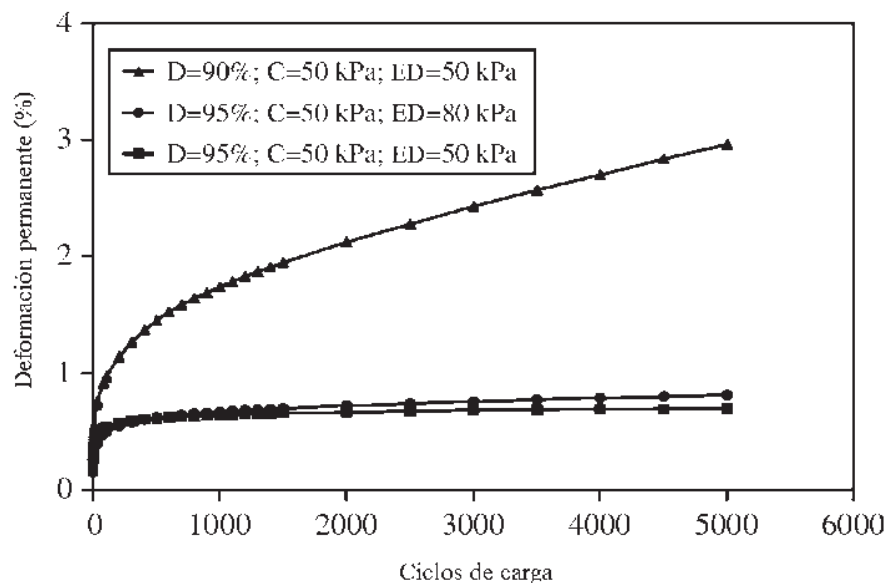


Figura 2. 36 Deformación permanente en el material triturado (Zeghal 2009)

Como se puede observar en las Figuras 2. 35 y 2. 36 se tienen que para la condición de Densidad igual a 90% y Esfuerzo desviador igual a 50 kPa, podemos ver que es la condición más desfavorable en los dos materiales; mientras que como es de esperarse para una Densidad igual a 95% y un Esfuerzo desviador de 50 kPa existe una menor deformación.

Pero se puede ver que para una densidad igual a 95% en la Figura 2. 35 el incremento de la deformación es de alrededor del 40%, de los especímenes probados con un Esfuerzo desviador de 50 kPa y 80 kPa. Mientras que para la Figura 2.36 el incremento de la deformación para las mismas condiciones nos presenta un valor del orden del 15%. Por lo cual se infiere que los materiales triturados tienen una mejor respuesta a la resistencia a deformarse que los materiales denominados original.

Como podemos observar en la Figura 2.37 la condición más desfavorable de las tres pruebas propuesta nos haría pensar debido a la magnitud del esfuerzo desviador, sin embargo muestra que el material original su deformación permanente es mayor que la del material triturado.

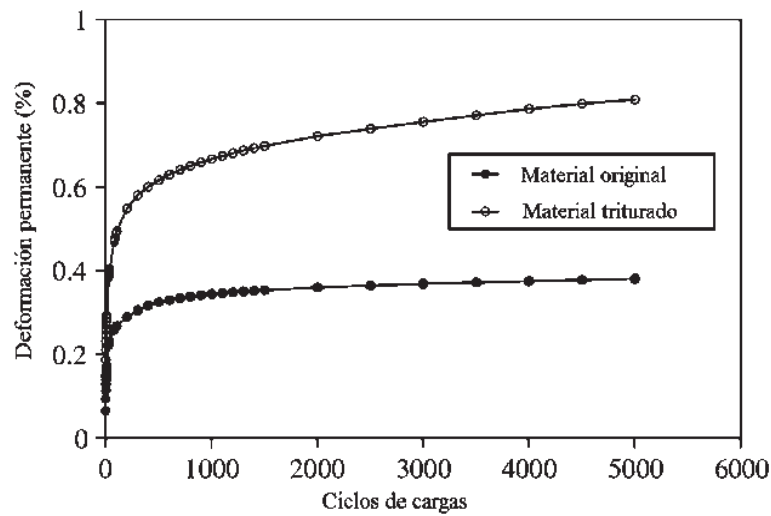


Figura 2. 37 Comparación de la deformación permanente entre los materiales originales y triturados compactados al 95% y un esfuerzo desviador aplicado de 80 kPa (Zeghal 2009)

En la figura 2. 38 es la condición más favorable se podría pensar debido a la magnitud del esfuerzo desviador, podemos ver que es en la condición donde se presenta una deformación permanente mayor en los dos materiales, de donde se puede concluir que un aspecto que afecta a las muestra es la densidad de compactación, la cual es inferior a la de las otras dos pruebas, por lo que una densidad baja es factor para la resistencia a la deformación.

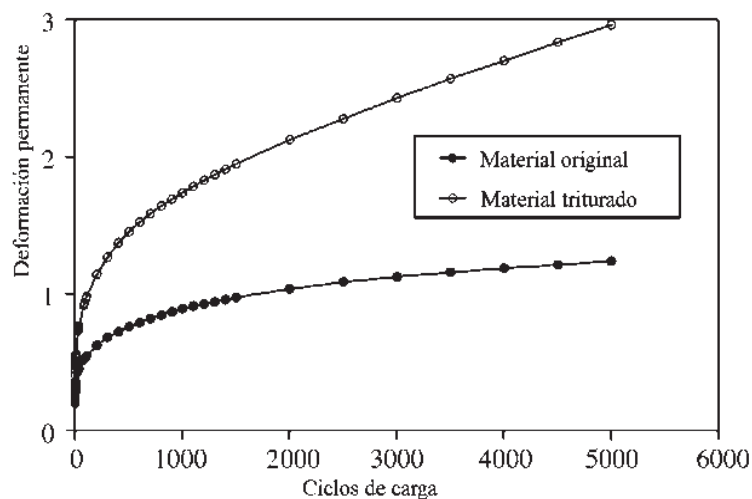


Figura 2. 38 Comparación de la deformación permanente entre los materiales originales y triturados compactados al 90% y un esfuerzo desviador aplicado de 50 kPa (Zeghal 2009)

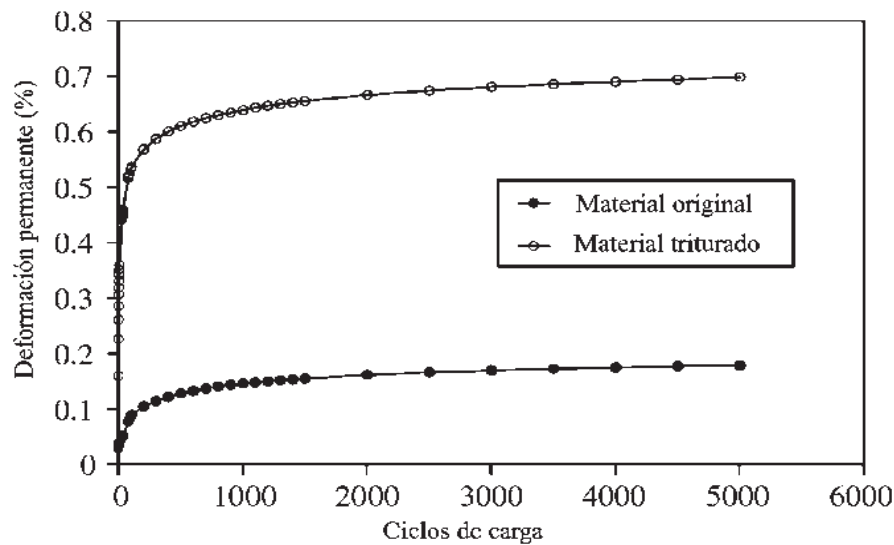


Figura 2. 39 Comparación de la deformación permanente entre los materiales originales y triturados compactados al 95% y un esfuerzo desviador aplicado de 50 kPa (Zeghal 2009)

En la Figura 2. 39 se presenta una condición semejante a la de la Figura 2. 37, por lo cual se ve que a mayor densidad del material se tiene mejor resistencia a la deformación, mientras que los materiales triturados tienen una deformación permanente menor a la del material denominado original. Además de que a mayor esfuerzo desviador cuando el material tiene una densidad alta los valores de deformación no tienen variaciones altas para el mismo material pero con diferente esfuerzo desviador.

2.2. CONCLUSIONES

Con lo visto anteriormente estamos en posibilidades de definir los aspectos más importantes que nos servirán como base para nuestro trabajo, de donde se desprenden las siguientes conclusiones:

- Para las pruebas de módulo de resiliencia tenemos que tener muy en cuenta que el tipo de material es un aspecto de suma importancia. En este trabajo se utilizó un material denominado tezontle, el cual presenta una textura porosa. Tomando en

cuenta lo anterior, más la susceptibilidad del material al agua, da como resultado una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante. Lo que disminuye el módulo de resiliencia.

- Como el contenido de agua y el esfuerzo desviador nos llevara a una degradación o rotura de partículas. La cual provoca un cambio en la granulometría, este cambio se vera tanto después de la compactación como después de la prueba. Como la compactación se realizara con un martillo neumático esto provocara en gran medida este cambio de granulometría.
- Los aspectos anteriormente mencionados se tuvieron en cuenta a la hora de realizar el diseño de los experimentos realizados en está tesis. Empezando desde el momento de la preparación del espécimen, pasando por su compactado y montado en el equipo, hasta el proceso de prueba, y como afectan en el resultado final de la prueba.
- En lo referente a la deformación permanente podemos concluir que el nivel de esfuerzos es de los aspectos más importantes, ya que no son los mismos mecanismos de deformación con valores bajos de esfuerzos aplicados que con altos, además que el número de aplicaciones de estos también delineara el comportamiento de la deformación permanente del espécimen.
- Además de que la densidad es otro factor que interviene con la deformación permanente, ya que una alta densidad permitirá resistir mejor los esfuerzos; si añadimos a esto los contenidos de agua altos, en la literatura nos describen un aumento en la deformación permanente con respecto a contenidos bajos de agua para el mismo material.
- Por lo cual para nuestro estudio la humedad y el nivel de esfuerzos aplicados, fueron las variables a controlar dentro del diseño de los experimentos, para entender su comportamiento



CAPITULO 3

DESCRIPCION DE PRUEBAS Y EQUIPO

CAPITULO 3

3. DESCRIPCION DE PRUEBAS Y EQUIPO

En este capítulo se describirán las diferentes pruebas que se utilizaron para la realización la tesis, así como el equipo existente y el equipo desarrollado en el laboratorio para poder realizar los objetivos del trabajo de tesis.

Para la descripción de cada uno de estos elementos primordiales en nuestro trabajo podemos clasificarlos en:

1. Pruebas y su equipo.
 - a. Prueba proctor
 - b. Prueba de módulo de resiliencia
 - c. Prueba de deformación permanente
2. Equipo auxiliar de prueba desarrollado en el laboratorio.
 - a. Tornillos sujetadores
 - b. Placa de distribución
 - c. Control de velocidad de la bomba

3.1. PRUEBAS Y SU EQUIPO

3.1. a) PRUEBA PROCTOR

Esta prueba que comúnmente se le denomina en México proctor, la ASTM International (American Society for Testing and Materials) la denomina según su traducción como la

prueba “D 698-00 *Métodos de Prueba Estándar para la caracterización en laboratorio de la compactación del suelo utilizando esfuerzo normal*”.

Estos métodos que describe la norma, nos incluye los métodos de compactación utilizados para determinar la relación entre el contenido de agua y la unidad de peso seco de los suelos (curva de compactación), compactados en un molde de 4 o 6 in (101.6 o 152.4 mm) de diámetro, con un martillo (pisón) de 5.5 lb de peso y 12 in de caída de la maza, que producen esfuerzo de compactación de 12400 ft-lb/ft³ (600 kN-m/m³).

Este método se aplica solo a materiales que el 30% o menos se retenga en la malla de ¾ in. Tres alternativas de métodos pueden ser aplicadas, de las cuales el tipo de granulometría designa cuál de estas tres alternativas se puede utilizar. Estas alternativas las denomina como métodos A, B o C.

3.1. a) 1. METODOS

Método A se le asigna el molde de 4” de diámetro y el material pasa por la malla No. 4, donde su llenado se hace en tres capas, donde por capa se le aplican 25 golpes con el martillo. Puede ser utilizado también si el 20% o menos del peso del material son retenidos en la malla No. 4. Aunque este método no es aplicable si cumple con las condiciones del método B o C.

Método B se le asigna el molde de 4” de diámetro y el material pasa por la malla No. 4, donde su llenado se hace en tres capas, donde por capa se le aplican 25 golpes con el martillo. Puede ser usado si más del 20% o menos del peso del material es retenido en la malla No. 4 y el 20% o menos del peso del material es retenido en la malla de 3/8”. Si no se cumple con la granulometría requerida se utilizara el método C.

Método C se le asigna el molde de 6” de diámetro y el material pasa por la malla de ¾”, donde su llenado se hace en tres capas, donde por capa se le aplican 56 golpes con el

martillo. Puede ser utilizado el método si mas del 20% del peso del material es retenido en la malla de $3/8''$ y menos del 30% del peso del material es retenido en la malla de $3/4''$.

3.1. a) 2. EQUIPO

- **Molde de prueba.** Este molde es de forma cilíndrica, hecho de metal rígido y la capacidad y dimensiones se indican en las Figuras 3. 1 y 3. 2 y su equivalencia de valores se ven en la Tabla 3.

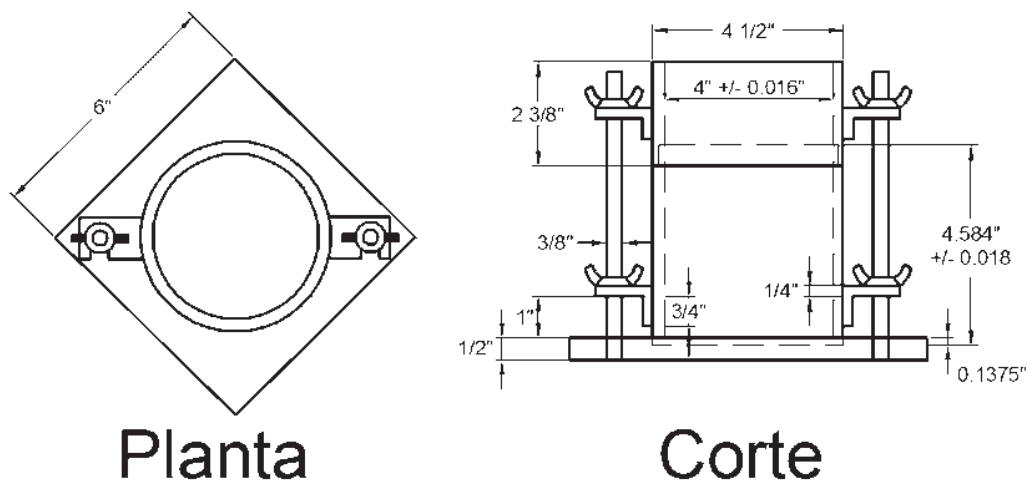


Figura 3. 1 Molde cilíndrico de 4" (ASTM Internacional)

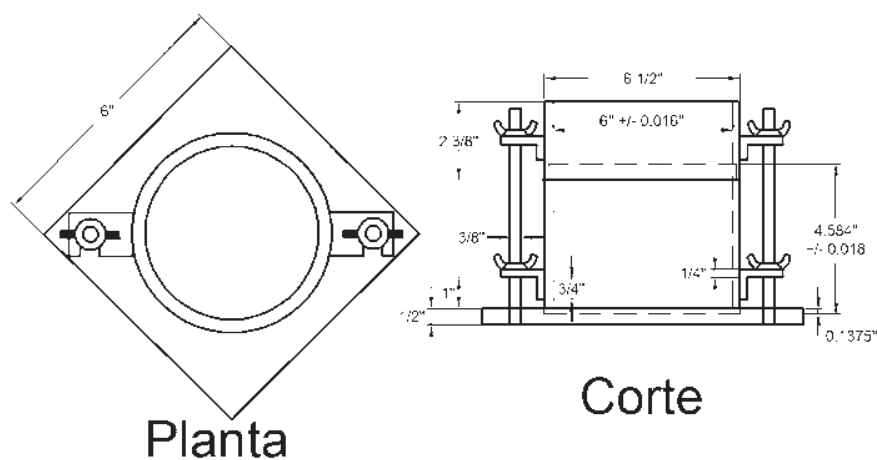


Figura 3. 2 Molde cilíndrico de 6" (ASTM Internacional)

Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros
0.016	0.41	4 ½	114.30
1.026	0.66	4.584	116.43
0.032	0.81	4 ¾	120.60
0.028	0.71	6	152.40
½	12.70	6 ½	165.10
2 ½	63.50	6 5/8	168.30
2 5/8	66.70	6 ¾	171.40
4	101.60	8 ¼	209.60

Tabla 3. 1 Equivalencia de unidades (ASTM Internacional)

- **Martillo.** El martillo puede ser manual o mecánico, para lo cual solo se describirá el martillo mecánico, que es una pieza compuesta por un cilindro de 12" de alto, que sirve como guía para la maza, la maza está conectada a una varilla, la cual sirve para mover hacia arriba y abajo la maza dentro de cilindro.



Figura 3. 3 Martillo manual y molde de prueba

- **Balanza.** Se utilizara una báscula de capacidad de 30 kg con aproximación a 1 gramo.
- **Horno de Secado.** El horno de secado servirá par secar las muestras a una temperatura de 110° +/- 5°.

- **Escantillón.** Es una pieza metálica que servirá para eliminar el exceso de material del molde una vez de haber colocado las tres capas.

- **Equipo para mezclar.** Este constara de una charola lo suficientemente grande y de metal para recibir el material, espátula metálica y una probeta graduada para controlar el contenido de agua.

3.1. a) 3. MUESTRAS PARA LA PRUEBA

El material requerido para el método A y B es de aproximadamente 16 kg, para el método C se necesitaran aproximadamente 29 kg. Una vez separado el material para la prueba se determina los porcentajes retenidos en las mallas No. 4, 3/8" y 3/4", para determinar si se utilizara el método A, B o C, en base a los porcentaje calculados de material retenido.

3.1. a) 4. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

- **Suelo.** El suelo no debe de haber sido compactado en laboratorio, se debe de cuidar de que si contiene humedad de sitio al momento de realizar la prueba, no se pierda en el transcurso de la preparación de los especímenes.

- **Método de preparación de la humedad.** Una vez que se ha determinado el método a utilizar, se determina el contenido de agua del suelo a compactar. Con el porcentaje de humedad que contiene la muestra se preparan de 4 a 5 muestras, para poder determinar el óptimo contenido de agua.

Para la primera muestra el contenido de agua se puede hacer por medio de información previa o por medio de inspección visual. Este contenido de agua que será utilizado para mezclarse con el material se mide en una probeta.

Para los demás especímenes se le debe ir agregando un 2% de agua de más que en la muestra anterior, esto para ir incrementando el contenido de agua, para poder tener valores del lado de la rama seca y húmeda de la curva de contenido de agua. Se debe cuidar que el incremento de humedad en cada espécimen no exceda del 4%.

Para los métodos A y B utilice aproximadamente 2.3 kg por espécimen, para el método C se deberá usar 5.9 kg por espécimen. Para cada uno de los especímenes el agua es agregada por medio de un rocío en forma de espray, se mezcla bien el material cuidando que no se hagan grumos en el espécimen. Se debe de cuidar de que el agua este a temperatura ambiente y que no exceda de 60° C.

- **Compactación.** Una vez que se ha hecho la mezcla se procede a realizar el baseado de las tres capas. La primer capa se coloca a que este por arriba del primer tercio, se procede a aplicar los 25 golpes con el martillo de compactación si es el método A o B, si es el método C se le darán 56 golpes; la segunda y tercera capa se repite el mismo procedimiento, se debe de cuidar de que al quitar el collarín la tercer capa no sobre pase de ¼” del molde, y se enraza con el escantillo para tener una superficie plana.

Una vez realizado esto se pesa el molde con el material y se anota como peso del material + molde, una vez obtenido el peso se procede a seleccionar una porción de suelo de la parte central de la muestra para obtener el contenido de agua de ese espécimen. Este procedimiento se repite para cada uno de los demás especímenes.

3.1. a) 5. CÁLCULOS

Una vez realizado el procedimiento anterior, la información recabada se procesa de acuerdo a la siguiente secuencia. Se calcula el contenido de agua para cada espécimen que es:

$$w = \frac{\text{Peso humedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

Se calcula la densidad húmeda del espécimen de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\rho_m = \frac{M_t - M_{md}}{1000 V}$$

Donde:

ρ_m = Densidad húmeda del espécimen compactado.

M_t = Peso del molde y el espécimen

M_{md} = Peso del molde

V = volumen del molde

El cálculo de densidad seca de espécimen:

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}}$$

ρ_d = densidad seca del espécimen

w = contenido de agua

Con la densidad seca o Peso especifico seco calculado se grafican Peso especifico contra contenido de agua.

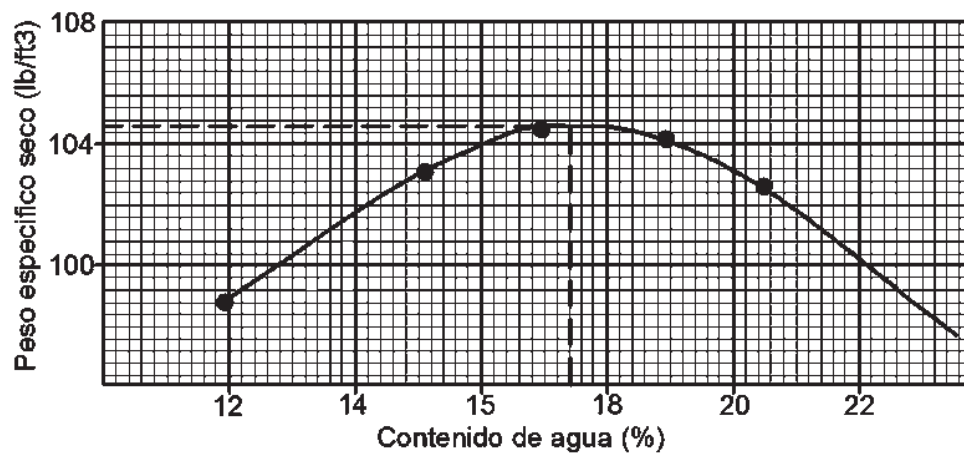


Figura 3. 4 Curva de Peso específico – Contenido de agua

Como se ve en la Figura 3. 4 podemos ver que se obtuvo en peso específico seco de 104.5 lb/ft³, con un contenido óptimo de agua para el material de 17.5%.

3.1. b) MÓDULO DE RESILIENCIA

Para la determinación del módulo resiliente se seguirá el protocolo de prueba aprobado por la AASHTO, denominada “*T 307-99 Método estándar para determinar el módulo resiliente de suelos y agregados materiales*” Esta prueba está diseñada para conocer la respuesta del suelo inalterado o alterado, así como muestras alteradas de materiales de base y subbase, trabajados en laboratorio. En este método de prueba los niveles de esfuerzo y confinamientos están dispuestos de acuerdo a la localización del material, en otras palabras si el suelo es utilizado como cuerpo de terraplén o es cimentación se trabajara con una combinación de esfuerzos y confinamiento, si es material de base o subbase se trabajara con otra combinación.

Donde los valores obtenidos de módulo de resiliencia por medio de este procedimiento, son el resultado de la medición de módulos elásticos en el suelo, base o subbase estudiado; además de que estos resultados pueden ser utilizados para el cálculo de la respuesta a la carga de un pavimento producto de las ruedas, o en el mismo diseño del pavimento.

3.1. b) 1. EQUIPO

El equipo a utilizar es un equipo triaxial cíclico con que cuenta el Laboratorio de Materiales “Luis Silva Rúelas”, de la UMSNH, el cual cabe recalcar fue desarrollado por el Dr. Carlos Chávez Negrete, profesor de la Facultad de Ingeniería Civil, donde la M. en I. Selene Citlalli Pérez López en su tesis para obtener su grado de Maestría describe perfectamente cada una de sus partes, por lo cual solamente me advocaré a describir las partes principales de este equipo.

- **Cámara triaxial.** Esta cámara de presión es utilizada para contener el espécimen a probar y contener los fluidos durante la prueba, los fluidos de confinamiento será aire; el material de la cámara es de policarbonato o acrílico resistente a las presiones de confinamiento. La cámara con que se cuenta se describe a continuación el la Figura 3. 5.

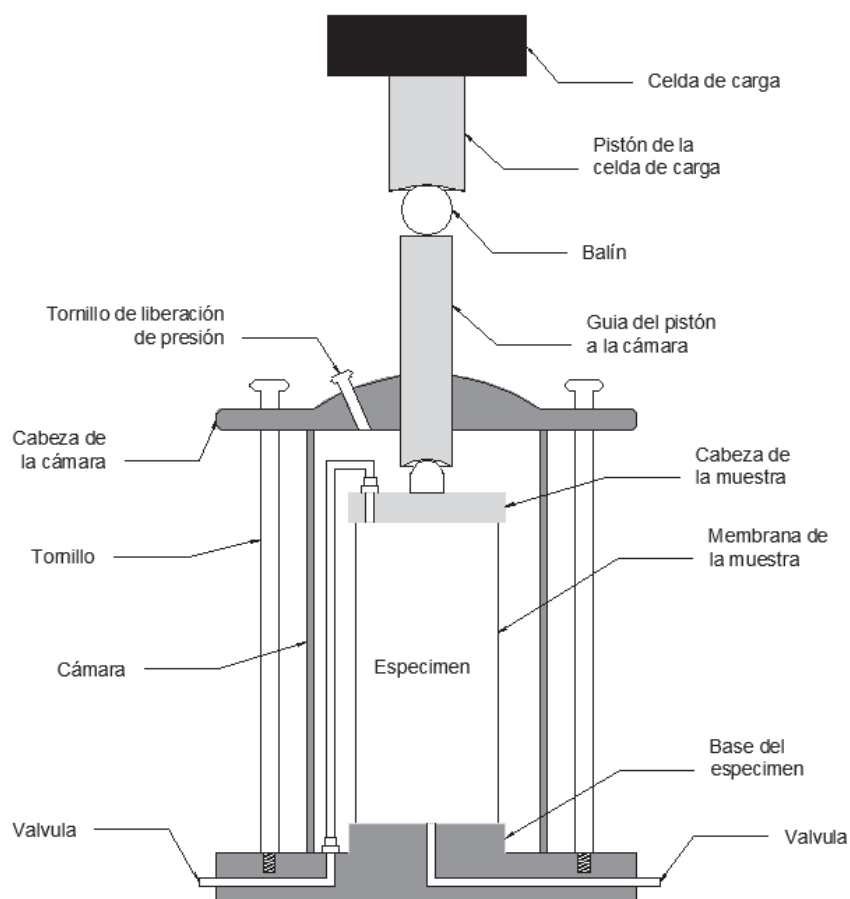


Figura 3. 5 Cámara triaxial

- **Dispositivo de carga.** El dispositivo de carga o celda de carga, es un dispositivo situado en la parte superior del marco de carga, que sirve para aplicar carga sobre el espécimen. Este puede ser electrohidráulico o electroneumático, donde su ciclo de aplicación de carga y reposo es de acuerdo a la tabla 3. 2. El equipo utilizado es del tipo electroneumático y lo podemos apreciar en la figura 3. 6.

Tipo de dispositivo	Periodo de carga (seg)	Periodo de reposo (seg)
Neumático	0.1	0.9 a 0.3
Hidráulico	0.1	0.9

Tabla 3. 2 Periodo de carga y reposo de la celda de carga



Figura 3. 6 Dispositivo de carga o celda de carga.

En la Figura 3. 7 se observa la forma de la curva senoidal que se produce por la aplicación del pulso de carga, donde se puede observar que siempre habrá una carga de contacto, la cual deberá ser restada a la carga máxima aplicada, para obtener el valor de la carga cíclica, que es el valor real para los cálculos.

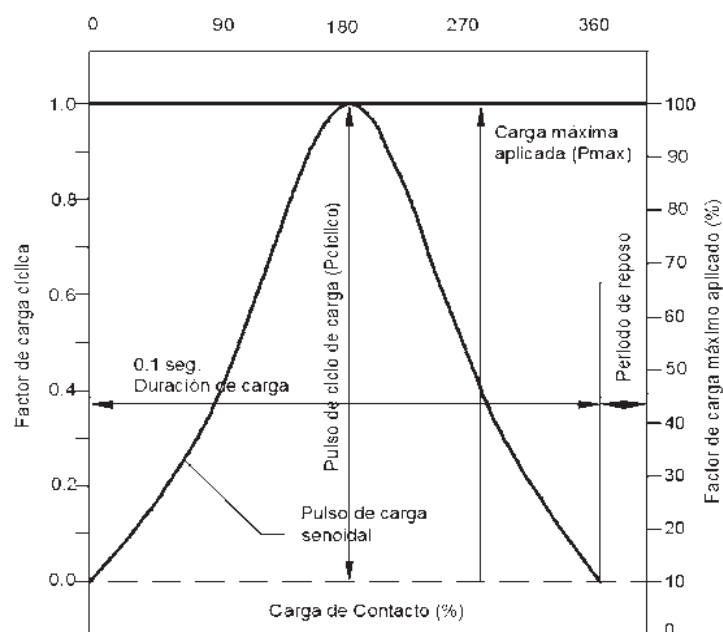


Figura 3. 7 Forma de la curva senoidal (AASHTO)

- **LVDT.** Estos elementos son utilizados para medir la deformación axial que se presenta en el espécimen, para la muestra se tiene dos LVDT's colocados en forma radial sobre la cámara triaxial como se ve en la Figura 3. 8. Estos equipos tendrán un rango de ± 1 mm. Los LVDT's están unidos al pistón de la celda de carga por medio de unas placas sujetadoras.



Figura 3. 8 LVDT's

- **Marco Triaxial.** Es la estructura principal del equipo, ya que es el soporte de la celda de carga, está formado por dos placas rectangulares, las cuales se encuentran unidas por dos postes que dan el claro para poder colocar dentro la cámara triaxial. En la placa superior se encuentra ranurada al centro, por donde pasa la celda de carga y el pistón de la celda como lo muestra la Figura 3. 9, esto para que el pistón de la celda carga pueda entrar en contacto con el vástago de la cámara triaxial, y así poder aplicar los pulsos de carga al espécimen.

Además de estar atornillada la celda de carga con la placa, esto para que al momento de aplicar carga no exista movimiento en el pistón de la celda y el vástago de la cámara.

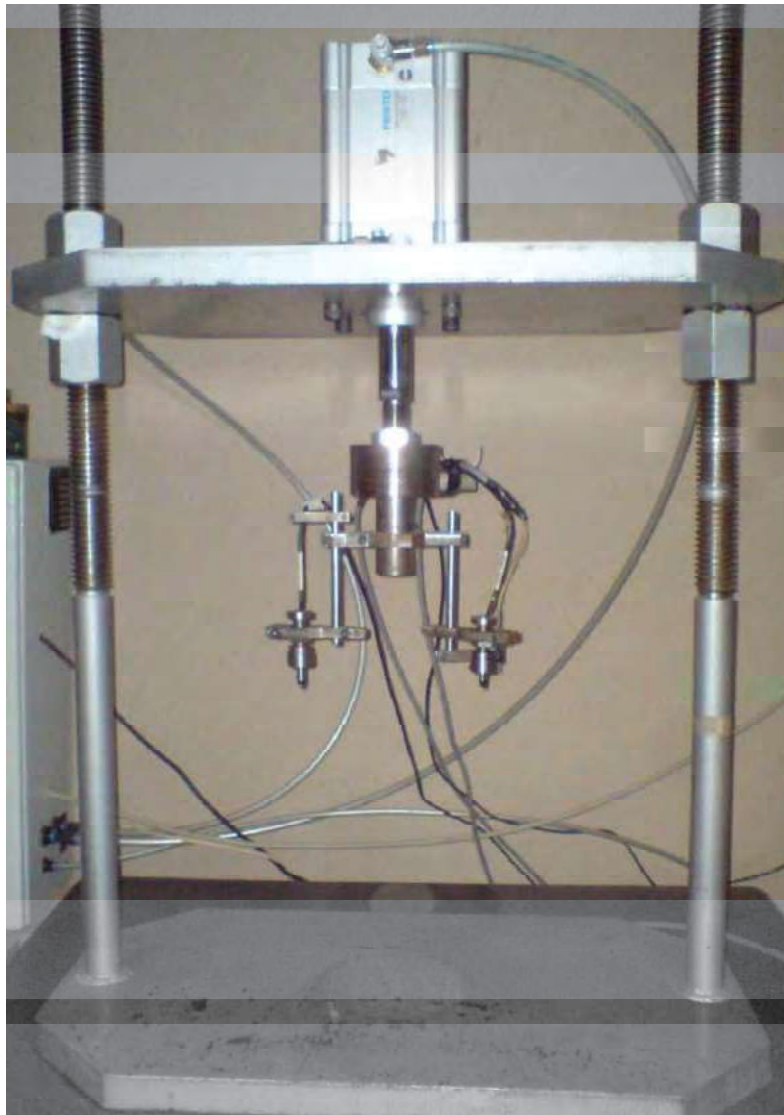


Figura 3. 9 Marco de carga

• **Panel de control.** En esta área se encuentran los controles del equipo los cuales están dividido en 9 partes. Las cuales describiremos a continuación.

1. Manómetro del esfuerzo desviador
2. Manómetro de confinamiento
3. Regulador de confinamiento
4. Regulador del esfuerzo desviador
5. Seleccionador de forma manual o prueba

6. Retractor del pistón de la celda de carga
7. Iniciar o parar prueba
8. Aplicador de carga en forma manual
9. Encendido o apagado del confinamiento.

Los incisos 1 y 2 son los indicadores de la presión del esfuerzo desviador y confinamiento respectivamente, que se va a aplicar en el momento de la prueba.

Los incisos 3 y 4 son los reguladores de la presión del esfuerzo desviador y confinamiento, que se lee en los manómetros, los cuales permiten subir o bajar la presión.

Este seleccionador permite seleccionar el modo de trabajo, donde el modo manual solo permite aplicar carga cada vez que se pulsa el botón de aplicar carga, mientras que en posición de prueba permite realizar toda la secuencia de ciclos de cargas a que fue programado, lo cual solo se inicia con la palanca de inicio o paro de prueba.

Iniciar o parar prueba permite iniciar o parar la prueba pero solo cuando el equipo está en modo prueba.

Aplicar carga permite cuando el equipo está en modo manual, aplicar una carga que si se deja apretado sigue aplicando carga.

Encendido y apagado del confinamiento permite controlar si se le va aplicar o no confinamiento a una muestra.

Esto lo podemos ver en detalle en la Figura 3. 10.

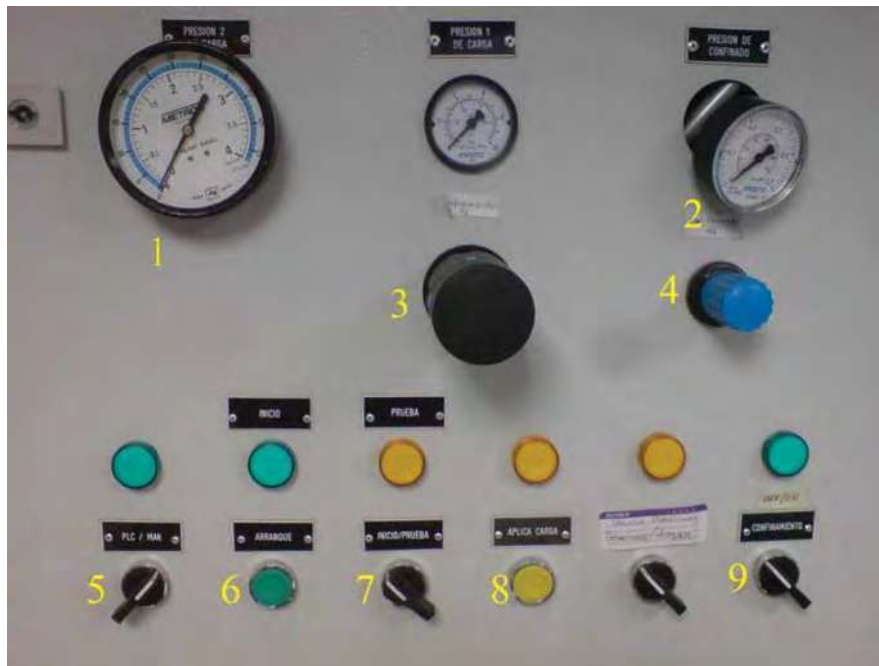


Figura 3. 10 Panel de control

- **Panel de adquisición de datos.** Esta se divide en dos partes en el panel de conversión de señal y unidad de procesamiento.

La unidad de conversión de señal es donde se convierten los impulsos electrónicos que mandan todos los componentes electrónicos del equipo como LVDT's, los controladores de las bombas, etc. Todos estos impulsos son enviados desde el CPU al panel de control y viceversa.



Figura 3. 11 Unidad de conversión de señal parte exterior e interior.

La unidad de procesamiento permite convertir la información binaria que recibe de la unidad de conversión en información legible, esta información es recibida dentro del programa LABview, la cual la presenta en una hoja de Excel y en la pantalla con gráfico de las lecturas en tiempo real.



Figura 3. 12 Unidad de procesamiento

LABview es un programa que permite controlar el comportamiento del equipo, tanto el tiempo de aplicación de la carga, el número de ciclos etc. Además nos presenta en forma amigable y en tiempo real las lecturas de los LVDT's y la celda de carga, además de establecer la ruta para guardar la información.

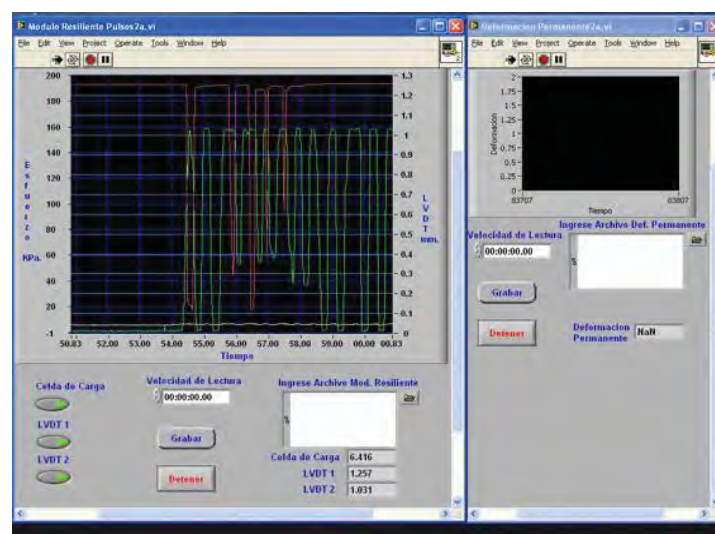


Figura 3. 13 Pantalla del programa LABview

3.1. b) 2. PREPARACION DE LA MUESTRA

Para la preparación del espécimen, se debe de contar con todos los siguientes elementos que se describen a continuación.

El primer paso es preparar la base de la cámara triaxial, la cual consiste en colocar en la parte inferior de la base la membrana de látex, y posterior mente colocar el molde para que la muestra sea conformada, en la parte superior del molde se saca la membrana para que se pueda colocar dentro el material. Los elementos se pueden ver en la Figura 3. 14 y 3. 15.



Figura 3. 14 Membrana de látex y molde



Figura 3. 15 Base de la cámara triaxial, conformación de los tres elementos.

Se procede a realizar la preparación de la muestra, que consiste en tomar el material y conocer su contenido de agua para después agregarle la cantidad necesaria de agua, para obtener el contenido de agua de la prueba, y se mezcla el agua y el material.

Con el material preparado se procede a llenar el molde en seis capas, las cuales se hace por medio de la compactación de un martillo neumático que en su punta tiene un pistón. Para cada capa se pesa la cantidad necesaria de material y se procede a compactarla hasta una altura que tiene designada el pistón en un costado como se ve en la Figura 3. 16.



Figura 3. 16 Martillo neumático y pistón de compactación

Una vez llenado las seis capas se le coloca el cabezal al espécimen y se sube la membrana hasta quedar sobre el cabezal. Una vez que se ha hecho lo anterior, se procede a quitar el molde con cuidado para no dañar la muestra.

Como la muestra es granular y fue compactada se le coloca una segunda membrana con el auxilio de un cilindro con un diámetro mayor al del espécimen, cuando se retira el cilindro la membrana queda sobre el espécimen.

Se le colocan un anillo de presión en la parte superior e inferior del espécimen, esto con el fin de sujetar el cabezal y la base de la cámara triaxial. Estos anillos permiten que no entre al interior del espécimen los fluidos de confinamiento. El espécimen terminado se ve en la Figura 3. 17.



Figura 3. 17 Espécimen preparado.

El último paso es colocar la parte superior de la cámara triaxial y atornillarla, se debe de tener cuidado de que el vástago de la cámara este sobre el cabezal de forma correcta.

Para las muestras al 50% de humedad relativa se prepara el espécimen de igual forma que al 100%, a excepción de que antes de la primera capa se coloca una placa perforada y antes de colocar el cabezal se coloca la otra placa, una vez que se ha cerrado la cámara triaxial se coloca el equipo en proceso de transferencia de humedad.

Para el sistema de transferencia de vapor de agua es un circuito cerrado que se puede apreciar a en la Figura 3. 18 que lo conforman las siguientes partes:

Bomba de aire

Panel de control de la bomba de aire

Deposito de sustancia secante o hidratante

Cámara triaxial

Contenedor del higrómetro

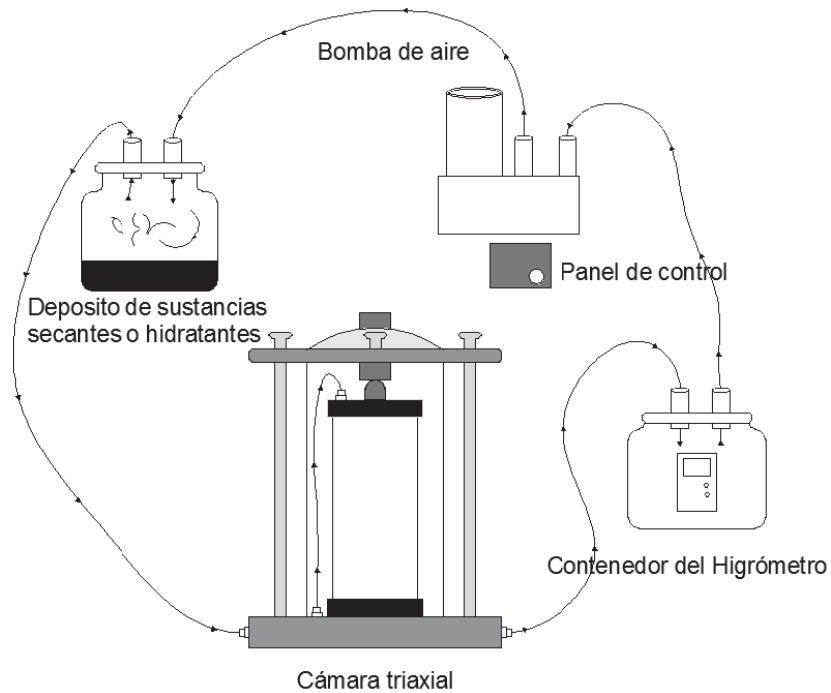


Figura 3. 18 Circuito de transferencia de humedad

La bomba de aire está compuesta por un motor eléctrico de 12 volts, el cual hace girar una rueda con aspas, las cuales al estar en una cámara sellada, solo permite la entrada por un conducto y salir el aire por otro conducto. Esta bomba está conectada a un panel de control.



Figura 3. 19 Bomba de aire

El panel de control es un circuito para controlar la energía que entra al motor de la bomba para poder regular su velocidad de trabajo, esto debido a que la bomba sin esta modificación trabaja a un mismo número de revoluciones. Cabe destacar que este circuito fue facilitado y diseñado por el Dr. Nelio Pastor Gómez, profesor de la Facultad de Ingeniería Civil.

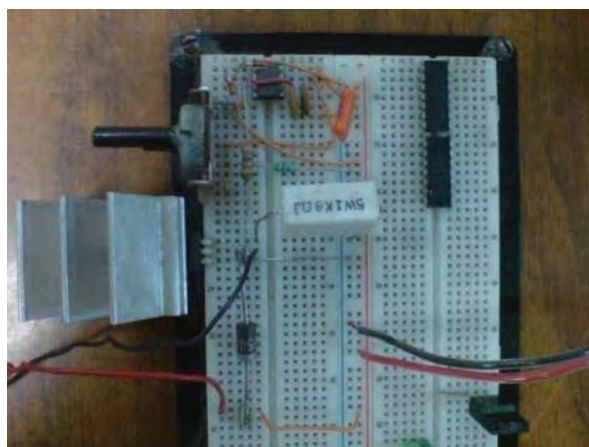


Figura 3. 20 Control de velocidad

El depósito de sustancias secante o hidratantes, es un deposito de cristal que en su parte superior tiene dos conectores, los cuales uno permite la entrada del aire proveniente de la bomba, el otro conector permite la salida de aire que ha estado en contacto con la sustancia, este aire sigue su camino hacia la cámara triaxial como se ve en la Figura 3. 21.

Las sustancias que se le pueden colocar dependiendo de lo que se desee hacer son muy vareadas, por ejemplo, si se desea eliminar humedad se le coloca algún tipo de sal o sosa caustica con el fin de producir calor en el contenedor, para hidratar el espécimen solamente se coloca agua.



Figura 3. 21 Deposito de sustancia secante o hidratante

Cámara triaxial como ya se ha descrito anteriormente, solo se mencionara que el aire proveniente del depósito de sustancia entra por una de las válvulas, la cual lleva el aire por dentro de la cámara hasta el cabezal por medio de una manguera, una vez en el cabezal baja hacia la placa perforada para repartir el aire dentro de la muestra, en la parte inferior del espécimen la placa perforada hace la función para recolectar el aire proveniente de la parte superior del espécimen, este aire se canaliza hacia la válvula de salida, todo esto se observa en la Figura 3. 22 de ahí sigue su recorrido hacia el contenedor del higrómetro.



Figura 3. 22 Conformación del circuito dentro de la cámara triaxial

El contenedor del higrómetro está compuesto por 2 partes; el contenedor es en sí un recipiente transparente con dos conectores en la parte superior, los cuales uno recibe el aire proveniente de la cámara triaxial y el otro conector desaloja el aire hacia la bomba de aire.



Figura 3. 23 Contenedor del higrómetro

La otra parte es el higrómetro el cual es un medidor de temperatura y cantidad de humedad en el aire, he ahí de la razón por la cual está dentro de un contenedor, el cual toma las lecturas del porcentaje de humedad que contiene el aire proveniente de la cámara triaxial.



Figura 3. 24 Higrómetro

Durante la extracción de la humedad el cuarto se mantiene a una temperatura constante mediante el uso de un aire acondicionado, llegando al porcentaje deseado de humedad se procede a montar la muestra y seguir el protocolo que se describen a continuación.

3.1. b) 3. MONTAJE DE LA MUESTRA EN EL EQUIPO TRIAXIAL.

Para comenzar el montaje primeramente se necesita retraer el pistón de carga, una vez arriba se coloca la cámara triaxial y en el vástago de la celda se coloca un balín.

Cuando el balín está en su sitio se deja bajar el pistón de carga y se centra la cámara triaxial, posteriormente se acomodan los LVDT's sobre los tornillos de la cámara para poder tomar sus deformaciones, para lo cual se pueden subir o bajar los tornillos sujetadores de los LVDT's.



Figura 3. 25 Cámara montada en el marco de prueba

Se da arranque a la unidad de procesamiento para verificar que el panel este funcionando, esto se hace aplicando movimiento a los LVDT's y la celda de carga para ver en el monitor

que funcionen estos elementos. Si todo funciona se escribe la ruta para guardar la información de la prueba.

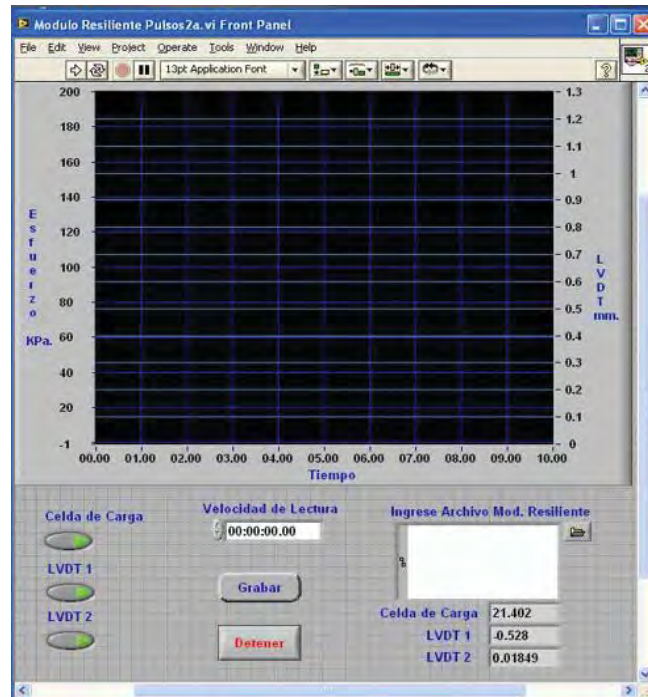


Figura 3. 26 Pantalla del programa LABview

El siguiente paso es revisar la cámara triaxial este cerrado el tornillo de liberación de confinamiento, y se conecta el confinamiento a la válvula de confinamiento. Las válvulas de drenaje interno del espécimen se abren.

Con los pasos anteriores una vez hechos, se procede a aplicar confinamiento a la muestra y regularla al valor necesario, y el esfuerzo desviador se calibra a la presión necesaria para la prueba. Cuando esto se ha revisado se puede dar inicio a la prueba y correr el programa.

3.1. b) 4. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

El procedimiento de prueba está compuesto por una etapa de acondicionamiento, esta etapa sirve para preparar la muestra, si en la lectura de los LVDT's no hay deformaciones

importantes en los primeros 500 ciclos, se comienza la secuencia de esfuerzos y confinamiento; de no ser el caso se procede a aplicarle otros 500 ciclos. En ocasiones es necesario aplicarle otros 500 ciclos aparte de los 1000 que marca la norma.

Una vez terminado el periodo de acondicionamiento existen 15 combinaciones de esfuerzo desviador y confinamiento. Lo anterior se describe en la tabla 3. 3.

Secuencia	Confinamiento		Esfuerzo máximo axial		Esfuerzo axial de contacto		Esfuerzo cíclico aplicado		No de aplicaciones
	kPa	Psi	kPa	Psi	kPa	psi	kPa	psi	
Acond.	103.4	15	103.4	15	10.3	1.5	93.1	13.5	500 – 1000
1	20.7	3	20.7	3	2.1	0.3	18.6	2.7	100
2	20.7	3	41.4	6	4.1	0.6	37.3	5.4	100
3	20.7	3	62.1	9	6.2	0.9	55.9	8.1	100
4	34.5	5	34.5	5	3.5	0.5	31.0	4.5	100
5	34.5	5	68.9	10	6.9	1.0	62.0	9.0	100
6	34.5	5	103.4	15	10.3	1.5	93.1	13.5	100
7	68.9	10	68.9	10	6.9	1.0	62.0	9.0	100
8	68.9	10	137.9	20	13.8	2.0	124.1	18.0	100
9	68.9	10	206.8	30	20.7	3.0	186.1	27.0	100
10	103.4	15	68.9	10	6.9	1.0	62.0	9.0	100
11	103.4	15	103.4	15	10.3	1.5	93.1	13.5	100
12	103.4	15	206.8	30	20.7	3.0	186.1	27.0	100
13	137.9	20	103.4	15	10.3	1.5	93.1	13.5	100
14	137.9	20	137.9	20	13.8	2.0	124.1	18.0	100
15	137.9	20	275.8	40	27.6	4.0	248.2	36.0	100

Tabla 3. 3 Secuencia de pruebas

3.1.b) 5. CALCULOS

Para el cálculo a partir de la información presentada en Excel se hace lo siguiente.

	A	B	C	D	E
1	LabVIEW Measurement				
2	Writer_Versi	0.92			
3	Reader_Vers	1			
4	Separator	Tab			
5	Multi_Head	No			
6	X_Columns	One			
7	Time_Pref	Absolute			
8	Operator	Administrado			
9	Description	GUARDAR ARCHIVOS			
10	Date	17/02/2009			
11	Time	25:03.0			
12	***End_of_Header***				
13					
14	Channels	4			
15	Samples	1	1	1	1
16	Date	17/02/2009	17/02/2009	17/02/2009	17/02/2009
17	Time	25:03.0	25:03.0	25:03.0	25:03.0
18	X_Dimension	Time	Time	Time	Time
19	X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20	Delta_X	1	1	1	1
21	***End_of_Header***				
22	X_Value	Untitled	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3
23		0	21.254685	1.601079	1.319661
24		90.906	0	19.768839	1.585819
25		90.922	0	19.958522	1.580908
26		90.922	0	21.475981	1.585907
27		90.937	0	22.708917	1.58082

Figura 3. 27 Información de LABview

En la figura 3. 27 se muestra la hoja que despliega LABview en formato Excel, de donde se describe que el TIEMPO es el tiempo transcurrido durante la prueba en segundos. CELDA DE CARGA es la lectura del esfuerzo máximo aplicado en ese lapso de tiempo; LVDT 1 y 2 son las lecturas de deformación en los LVDT's, los cuales pueden estar colocados a la misma altura o no.

Para hacer los cálculos se deben seleccionar los últimos 5 periodos de carga aplicados a la muestra, esto se puede ver en la columna de la celda de carga. Una vez seleccionados estos periodos se procede a procesarlos.

Primeramente se necesita calcular la deformación de la prueba, esto se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$Deformación = Lec. 0 - lec. n$$

Donde:

Deformación = Diferencia entre la lecturas en el tipo calculado.

Lec. 0 = Lectura del tiempo cero

Lec. n = Lectura del tiempo que se calcula

Con la deformación calculada se procede a calcular la deformación unitaria.

$$Def. Unit = \frac{\left[\frac{Deformación\ 1 + Deformación\ 2}{2} \right]}{A. espécimen}$$

Donde:

Def. Unit = Deformación unitaria

Deformación 1 = Resultado de la deformación el LVDT 1

Deformación 2 = Resultado de la deformación el LVDT 2

A espécimen = Altura del espécimen

Con estos datos calculados se grafican carga contra deformación permanente.

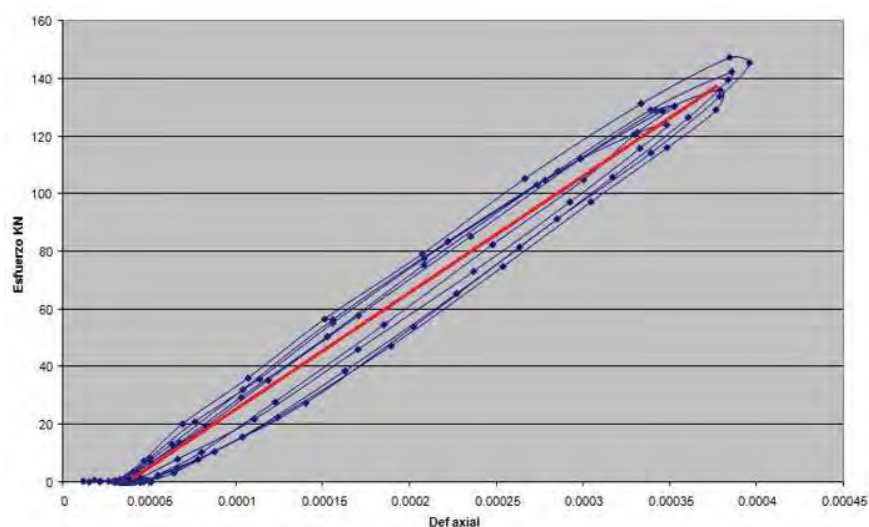


Figura 3. 28 Grafico de módulo de resiliencia

Para obtener el valor del módulo de resiliencia se obtiene la ecuación de la recta y la pendiente de esta será el valor del módulo resiliente. Para la siguiente ecuación el valor de m es la pendiente de la recta.

$$y = xm + c$$

Una vez calculado el valor de todas las secuencias se calcula el esfuerzo invariante, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Esfuerzo invariante} = \sigma_d + 3\sigma_3$$

Donde:

σ_d = Esfuerzo desviador aplicado (kPa)

σ_3 = Esfuerzo de confinación (kPa)

Después de obtener los esfuerzos invariantes se grafican módulo resiliente contra el esfuerzo invariante y mediante una línea de tendencia del tipo potencial se obtiene la relación entre el módulo resiliente y esfuerzos principales.

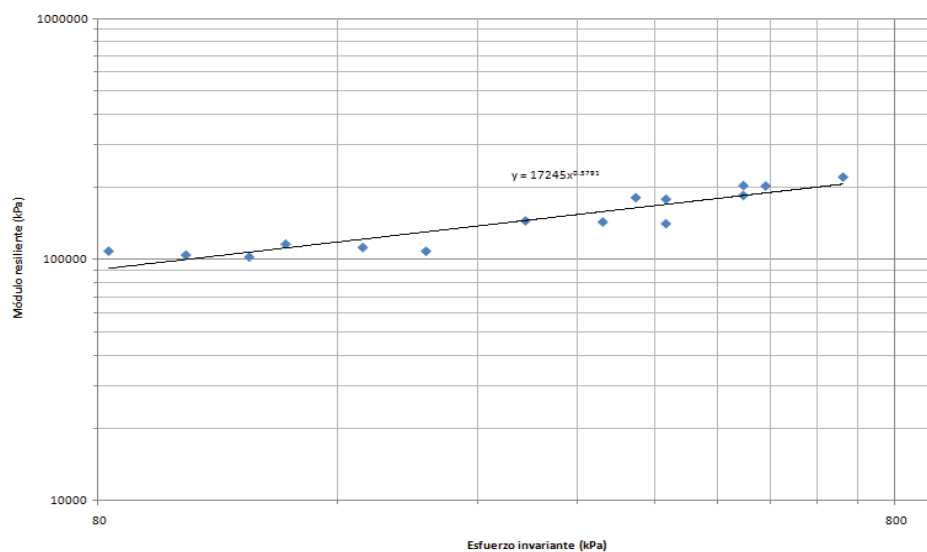


Figura 3. 29 Grafico de regresión de un suelo granular.

La relación entre el modulo resiliente y esfuerzos principales para materiales granulares es:

$$E = K_1 \theta^{K_2}$$

la que expresa la relación entre el módulo de resiliencia y la suma de los esfuerzos principales; en donde K_1 y K_2 son obtenidas de manera experimental y el “ θ ”, constituye el valor de la suma de los tres esfuerzos normales; σ_x , σ_y , σ_z , o la suma de los tres esfuerzos principales; σ_1 , σ_2 , σ_3 , incluyendo el peso del sistema de capas, con la expresión:

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \gamma z (1 + 2K_0)$$

En donde:

γ = Peso promedio

Z = Profundidad

K_0 = Coeficiente de la presión de tierra en reposo.

θ = Suma de los esfuerzos principales

3.1. c) PRUEBA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE

Para la prueba de deformación permanente no se encontró un procedimiento estandarizado a nivel mundial, por lo cual se selecciono seguir el protocolo de investigación de Khogali y Mohamed en sus investigaciones. Este protocolo lo utilizaron en sus investigaciones en Canadá en el año 2004.

3.1. c) 1 EQUIPO

El equipo a utilizar para esta prueba es el equipo triaxial cíclico, este equipo es el mismo utilizado para la prueba para módulo de resiliencia.

3.1. c) 2. PREPARACION DE LA MUESTRA

La preparación de la muestra es de la misma forma descrita para el módulo de resiliencia con contenido de humedad al 50%.

3.1. c) 3. MONTAJE DEL EQUIPO

El procedimiento de montaje es el mismo que para la prueba de módulo resiliente descrita anteriormente con las siguientes adiciones.

La primera es que se utilizara un LVDT sin regreso o medidor de deformaciones, este es una pieza metálica que va recorriendo de acuerdo a como se le va tocando para su recorrido, este recorrido solo avanza pero no tiene regreso al menos que se le aplique una fuerza en sentido contrario.



Figura 3. 30 LVDT o medidor de deformación

La otra diferencia es que se tendrá que utilizar el programa de LABview diseñado para esta prueba, el cual está programado para aplicar 1000 ciclos de forma continua.

Además hago referencia al M. en I. Tarsicio Domínguez Téllez por el apoyo en esta parte ya que él fue quien programó y acondiciono el equipo para poder tomar las deformaciones permanente durante la prueba, que podemos ver su pantalla en la figura 3. 31.

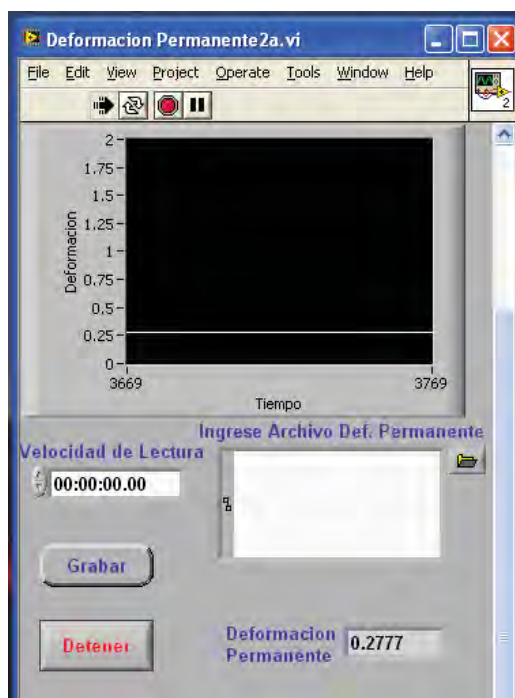


Figura 3. 31 Pantalla del programa de deformación permanente en LABview

3.1. c) 4 PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

El procedimiento como se dijo al inicio de esta sección se utilizara el protocolo de prueba utilizado por Khogali y Mohamed y la NRC Canadá, en su publicación NRCC-47023.

- **Procedimiento para muestras al 100% de humedad.** La prueba una vez preparada al 100% consiste en una vez colocado el espécimen y revisado todos los sistemas se prepara para el primer ciclo.

Un ciclo consiste en aplicar la carga cíclica al espécimen en estado al 100%, para lo cual se tendrá un total de 3000 ciclos de carga. La deformación se toma en forma continua durante toda la prueba. Una vez aplicado los 3000 ciclos se puede terminar la prueba o aplicar un segundo ciclo.

El segundo ciclo consiste primeramente que una vez terminando de aplicar los 3000 ciclos, se conecta el circuito de transferencia de humedad para extraerle humedad hasta tener un 50% de humedad; cuando se tiene este porcentaje se procede a saturar la muestra, es de notar que durante el proceso de secado y saturación se toma la deformación a la muestra.

Cuando se ha saturado la muestra se desconecta la introducción de agua y se conecta el circuito de transferencia de humedad, para sacar el exceso de agua hasta que por la válvula de salida de la cámara triaxial no aparezca agua, durante toda esta etapa se toman deformaciones ocasionalmente. Durante la realización de todas las etapas anteriores no se apaga para nada el confinamiento, la muestra debe de estar bajo confinamiento desde el principio hasta que se dé por terminada la prueba.

- ***Procedimiento para muestras al 50% de humedad.*** La prueba una vez preparada al 100%, se procede por medio del circuito de transferencia de humedad se extrae la humedad hasta tener un 50%, una vez estabilizado el espécimen se prepara la muestra para la prueba, que consiste en aplicar 3000 ciclos de carga.

Cuando se desea un segundo ciclo se satura la muestra y posteriormente se conecta el circuito de transferencia de humedad, una vez que se ha estabilizado la muestra en 50% se le vuelven a aplicar los 3000 ciclos de carga; durante esta etapa se vuelve a tomar deformación periódicamente. El confinamiento se debe mantener desde el principio hasta terminar la prueba.

Todo esto se realiza en un ambiente controlado para lo cual se tiene una temperatura constante durante toda la prueba.

- ***KENLAYER.*** La determinación del confinamiento y el esfuerzo desviador se realizó por medio de la utilización del programa Kenlayer. El cual es un programa de computación el cual se aplica a pavimentos flexibles con o sin capas rígidas. Está basado en un sistema multicapas bajo una área de carga circular. La solución es superpuesta para múltiples ruedas, aplicada a capas no lineales. Los resultados del programa pueden ser bajo

una, dual, dual – tándem, o dual – tridem llantas, para condiciones lineales, no lineales o viscoelástico. El daño también puede ser analizado para diferentes ciclos como máximo 12. Cada periodo puede tener hasta 12 cargas sencillas o múltiples.

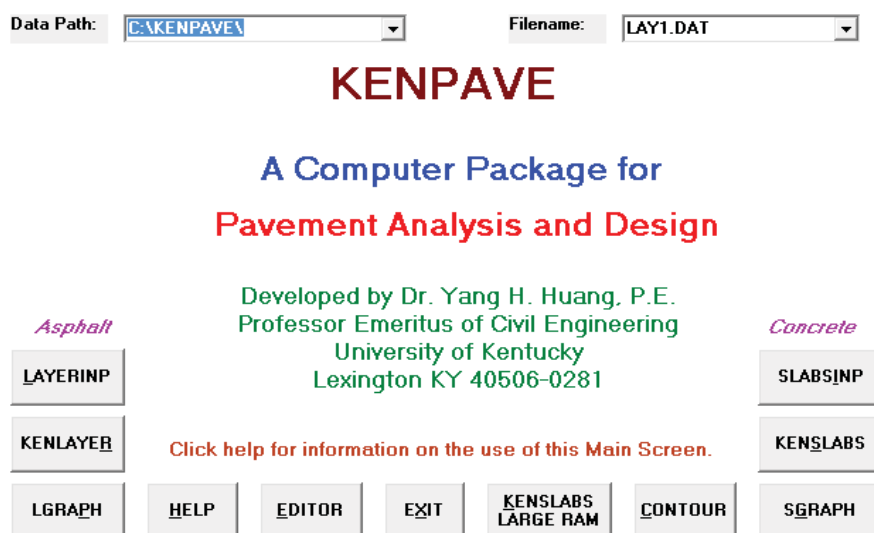


Figura 3. 32 Pantalla principal del programa KENLAYER

El área de asfaltos está compuesta por los botones LAYERINP, KENLAYER, LGRAPH, HELP, EDITOR y EXIT; donde cada uno de estos permite realizar las siguientes operaciones.

LAYERINP. Esta función permite introducir toda la información de las capas, así como sus tipos de análisis.

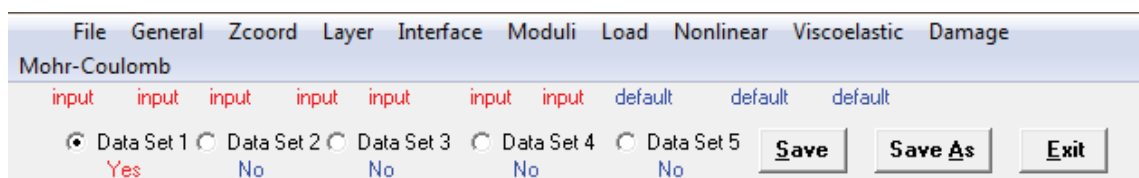


Figura 3. 33 Pantalla del botón LAYERINP

En forma breve serán definidas las diferentes interfaces presentadas en la Figura 3. 33.

- 1) FILE. Introduce la ruta y el nombre del archivo que se va a trabajar
- 2) GENERAL. Permite introducir la información como la del tipo de material si es lineal, no – lineal, viscoelástico o combinado. Si se va a realizar análisis de daños, numero de periodos por año, capas, coordenadas Z por analizar y grupos de carga. El numero de integraciones para el cálculo y el sistema de unidades de medición a utilizar entre otros factores.
- 3) ZCOORD. Permite introducir las coordenadas de los puntos que se desean estudiar la respuesta del suelo a esa profundidad.
- 4) LAYER. Permite introducir el espesor de cada capa, así como el valor de la relación de Poisson para estas. La última capa se considera infinita.
- 5) INTERFACE.
- 6) MODULI. Permite introducir el valor del módulo resiliente para cada capa, permitiendo hasta 12 diferentes periodos.
- 7) LOAD. Permite especificar el tipo de carga que está siendo aplicada (eje sencillo con una llanta, eje sencillo dos llantas, eje tandem o eje tridem. Además del área de contacto de la llanta y la presión de contacto en esta; también permite introducir las coordenadas del centro de esta área de contacto.
- 8) NONLINEAR. Permite introducir la información de las capas no – lineales, como el número de capas no lineales, la profundidad del punto a analizar, como el tipo de material para la capa y los parámetros del suelo.
- 9) VISCOELASTIC. Esta sección está más relacionada con el aspecto de la capa de rodamiento, ya que se estudia el tiempo de aplicación de carga, temperatura del asfalto, periodos de carga aplicados.
- 10) DAMAGE. Permite introducir el número de tráfico, así como la información de los puntos de análisis de esfuerzo de la parte superior e inferior de la capa a estudiar.

KENLAYER. Este botón permite correr el programa para que realice los cálculos una vez que se introdujo toda la información necesaria.

LGRAPH. Presenta un grafico del la información que se introdujo para realizar los cálculos

HELP. Presenta información de ayuda.

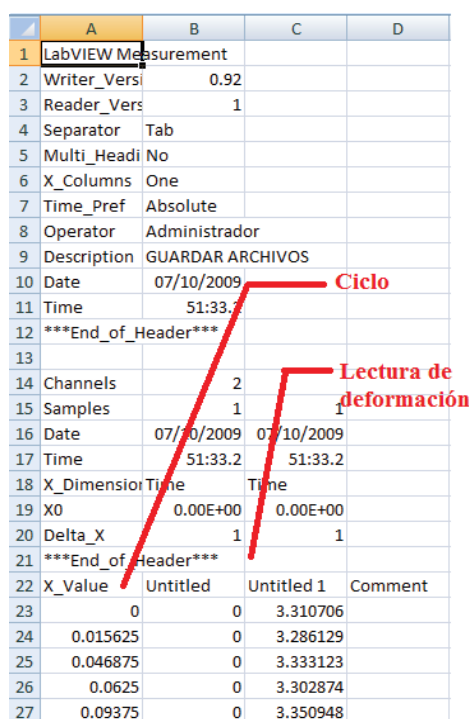
EDITOR. Presenta en formato toda la información introducida en formato de block de texto.

EXIT. Permite salir del programa.

Con lo visto anteriormente se describe de forma breve el programa que se utilizó para determinar el esfuerzo desviador y confinamiento que se le aplicará a la muestra para la prueba de deformación permanente.

3.1. c) 5. CALCULOS.

Los cálculos de la prueba se realizan procesando la información recabada a través del programa LABview.



	A	B	C	D
1	LabVIEW Measurement			
2	Writer_Versi	0.92		
3	Reader_Versi	1		
4	Separator	Tab		
5	Multi_Head	No		
6	X_Columns	One		
7	Time_Pref	Absolute		
8	Operator	Administrador		
9	Description	GUARDAR ARCHIVOS		
10	Date	07/10/2009		
11	Time	51:33.1		
12	***End_of_Header***			
13				
14	Channels	2		
15	Samples	1		
16	Date	07/10/2009	07/10/2009	
17	Time	51:33.2	51:33.2	
18	X_Dimension	Time	Time	
19	X0	0.00E+00	0.00E+00	
20	Delta_X	1	1	
21	***End_of_Header***			
22	X_Value	Untitled	Untitled 1	Comment
23		0	0	3.310706
24		0.015625	0	3.286129
25		0.046875	0	3.333123
26		0.0625	0	3.302874
27		0.09375	0	3.350948

Figura 3. 34 Información procesada en LABview

Con la información en formato Excel, se calcula la deformación permanente que realiza mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Deformación permanente} = \text{Lectura 0} - \text{Lectura n}$$

Donde:

Deformación permanente = Deformación en el ciclo deseado.

Lectura 0 = Lectura al inicio de la prueba.

Lectura n = Lectura en el ciclo a calcular.

Con la información ya procesada se procede a graficar la deformación contra número de ciclo.

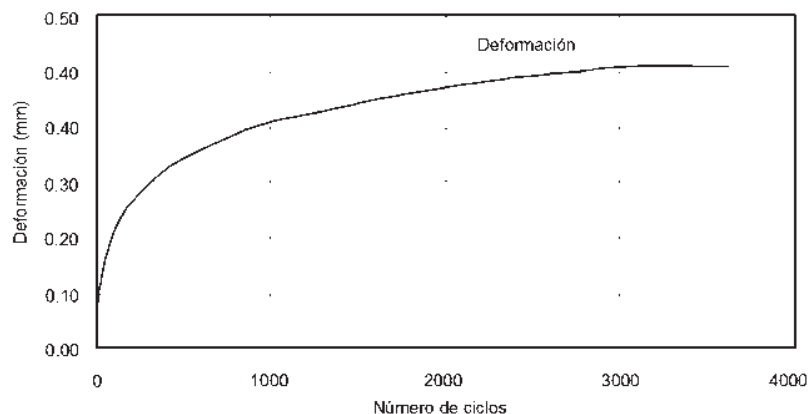


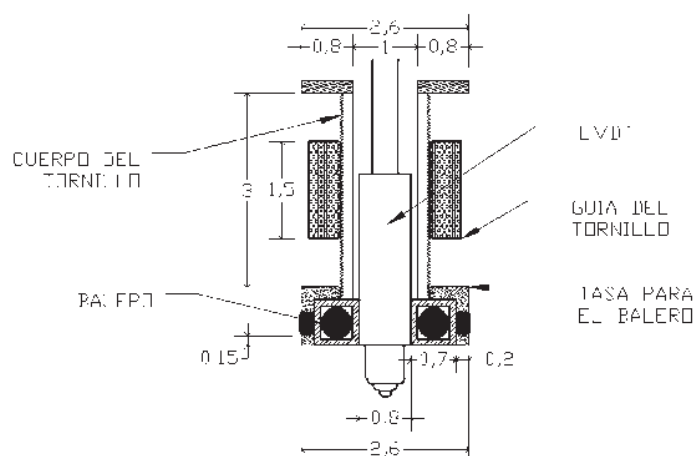
Figura 3. 35 Grafico típico de deformación permanente.

3.2. EQUIPO AUXILIAR DE PRUEBA DESARROLLADO EN EL LABORATORIO

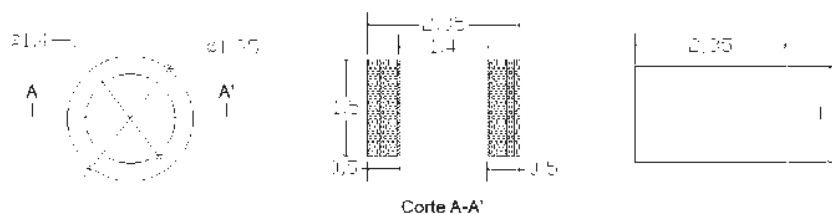
3.2. a) TORNILLOS SUJETADORES

Para un mejor manejo de los LVDT's se tuvo que desarrollar un mecanismo que pudiera retener el LVDT y poder manipularlo, ya que el sujetador con que se contaba era necesario desatornillar y atornillar el LVDT de la placa. El principal obstáculo era poder mantener el

LVDT en su posición al momento de subir o bajar, ya que este cuenta con un cable de transferencia, el cual si se utilizaba un tornillo al hacerlo girar para subir o bajar, este se enrollaba y se corría el riesgo de desprenderse.



TORNILLO PARA LOS LVDT's



GUIA PARA EL TORNILLO

NOTA: Las cotas estan en cm.

U.M.S.N.H.	
Fac. de Ingeniería Civil	
DISEÑO Y DIBUJO Ing. Tarsicio Audifred Hurtado Solórzano	
ESCALA Sin Escala	TORNILLO SUJETADOR DE LVDT
NUMERO DE PLANO P - Tornillo - 1	
FECHA Junio de 2008	

Figura 3. 36 Esquema del tornillo sujetador de LVDT.

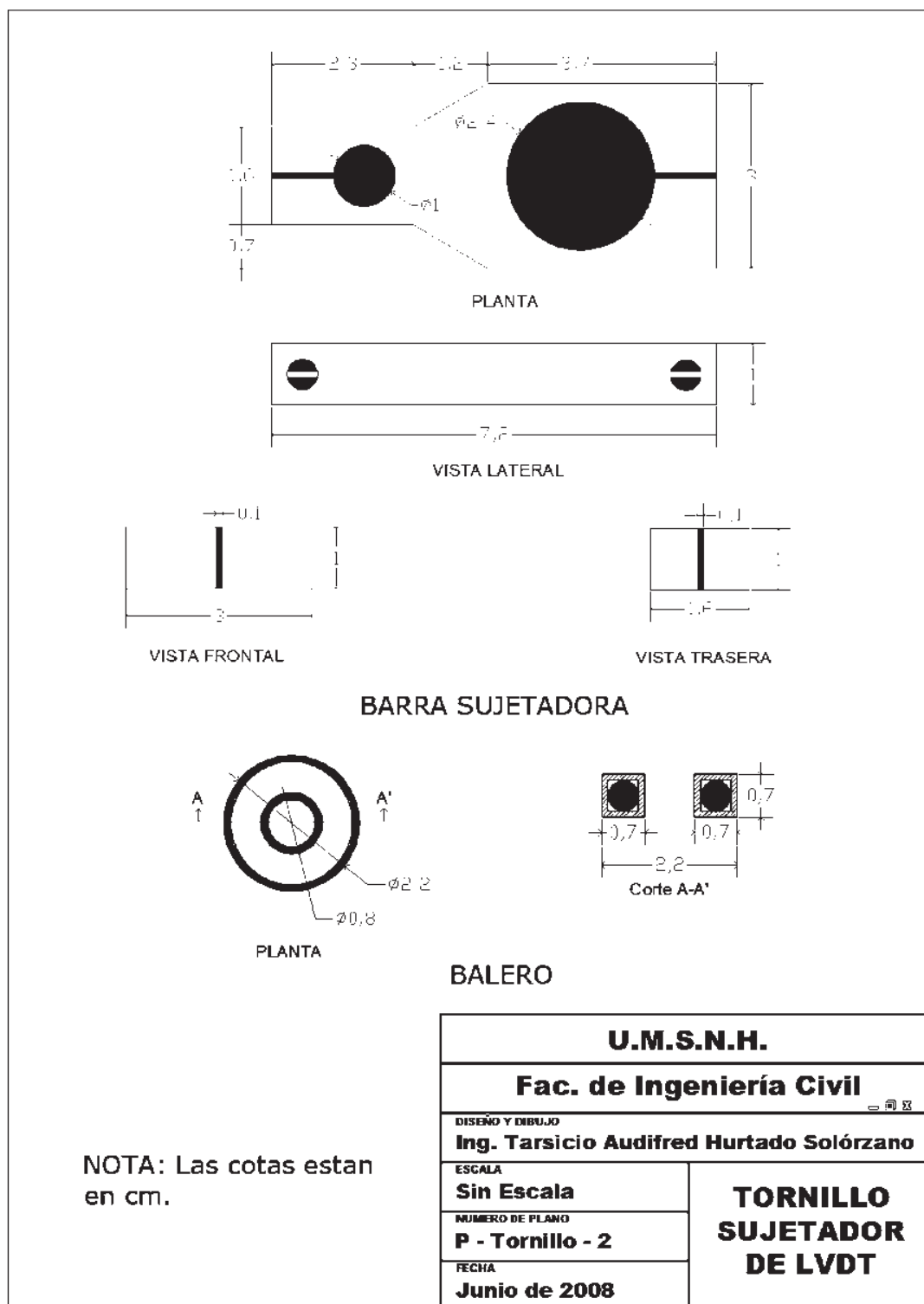


Figura 3. 37 Esquema del tornillo sujetador de LVDT.

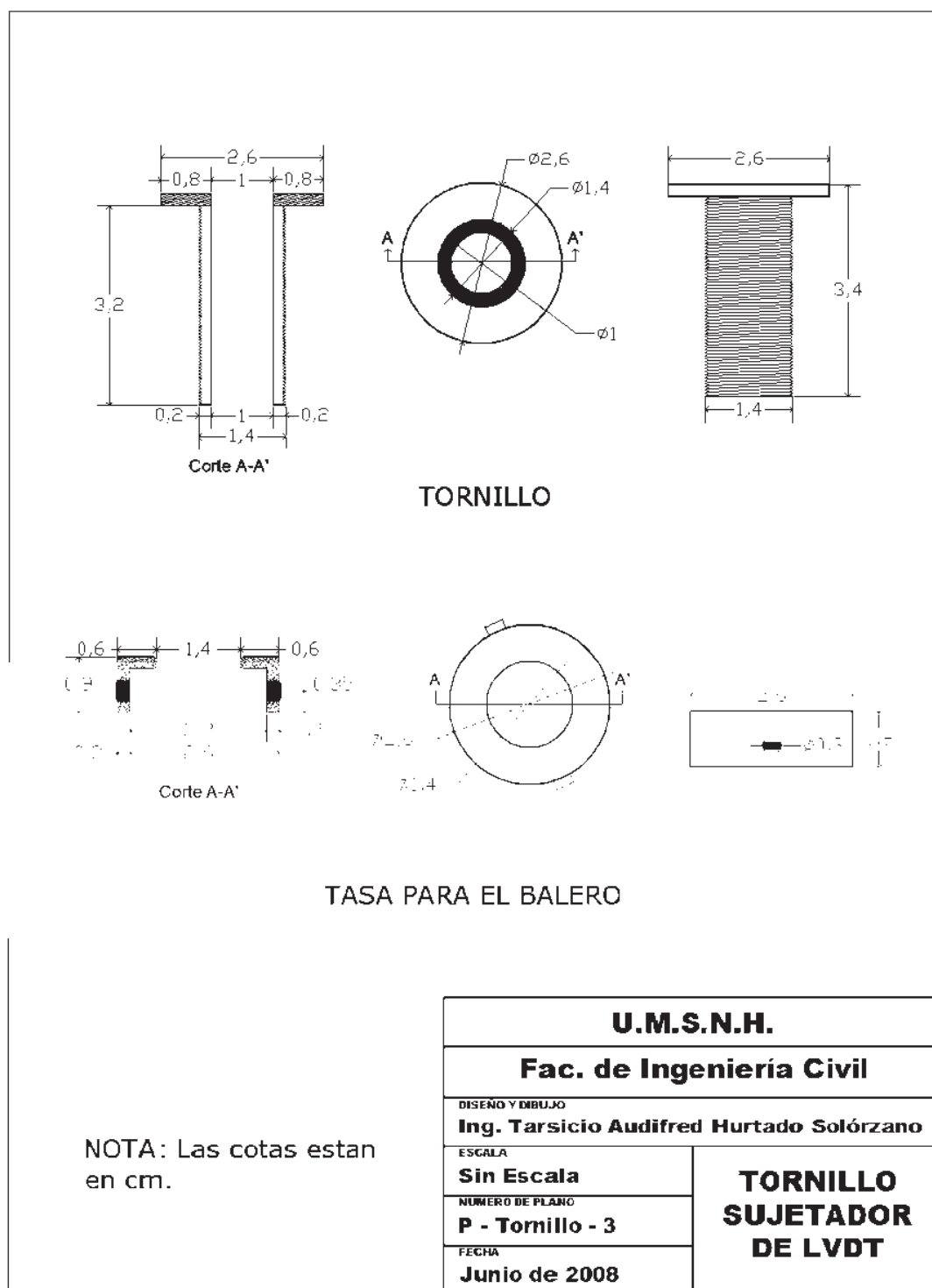


Figura 3. 38 Esquema del tornillo sujetador de LVDT.

3.2. b) PLACA DE DISTRIBUCIÓN

Esta placa fue desarrollada principalmente para la distribución del aire dentro del espécimen, para la transferencia de humedad durante la preparación de un espécimen a un determinado porcentaje necesario para la prueba.

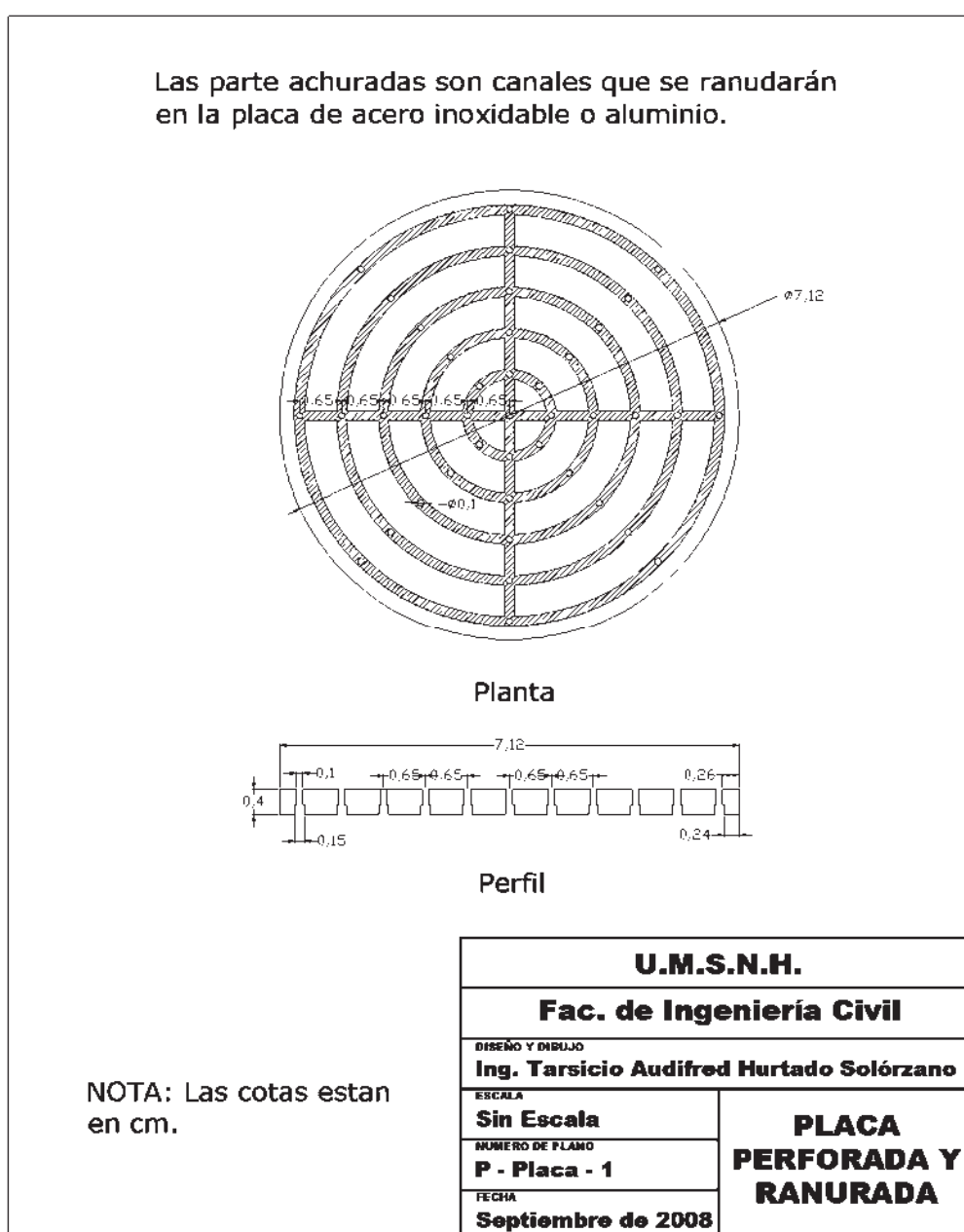


Figura 3. 39 Placa de distribución

3.2. c) CONTROL DE VELOCIDAD DE LA BOMBA

El control de velocidad para un motor de corriente continua, fue proporcionado por el Dr. Nelio Pastor Gómez, lo cual permite alterar la velocidad desde un alto total hasta velocidad máxima del motor por medio de un potenciómetro.

El circuito se basa en un integrador NE555 el cual genera un tren de impulso necesario para controlar el transistor, el cual acciona por medio de pulsos el motor. El diodo en paralelo al motor impide que el transistor se queme cuando se quita la corriente. Los componentes de las terminales 2, 6 y 7 del integrado regulan la frecuencia de oscilación del circuito y por ende la velocidad del motor. El transistor con un buen disipador de calor, se puede manejar hasta 75W de potencia.

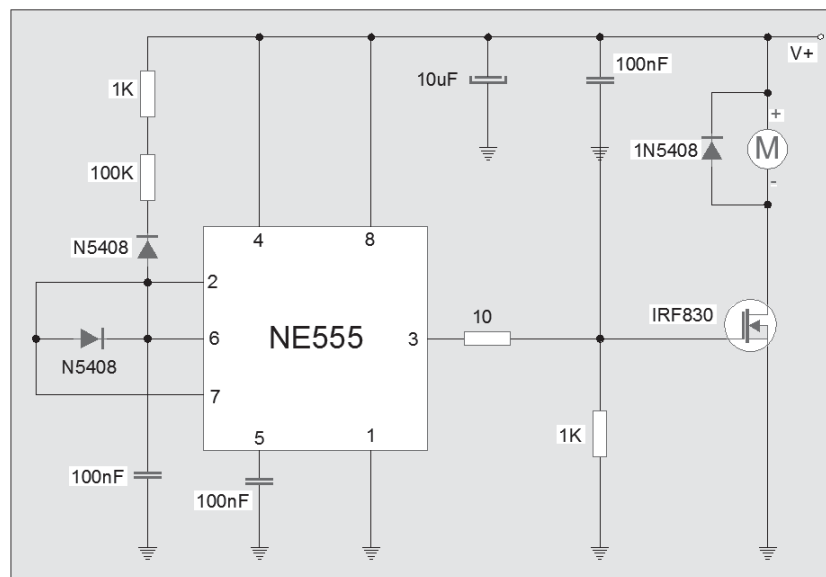


Figura 3. 40 Diagrama del circuito



CAPITULO 4

RESULTADOS

CAPITULO 4

4. RESULTADOS

En este capitulo se presentaran los resultados obtenidos de las diferentes pruebas que se realizaron para este trabajo de tesis. Para este trabajo se seleccionaron 2 tipos de granulometría, las cuales se seleccionaron a partir de la tesis del M. en I. Damián Vargas Martínez, en su tesis para la obtención de su grado. El material es del banco Joyitas localizado al Noroeste de la ciudad de Morelia.

Por lo cual se estructuro de la siguiente forma para presentar los resultados de las pruebas:

1. Granulometría
2. Prueba Proctor Estándar D-698
3. Módulos de resiliencia
4. Deformación permanente

4.1. GRANULOMETRIA

4.1.1. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA

La primer granulometría que se definió para la tesis como *BIEN GRADUADA*, es referente a las condiciones de distribución de tamaños o granulometría que especifica la SCT, con respecto a materiales utilizados para base de acuerdo a la norma N-CMT-4-02-002-04 (Figura 4. 1). Esta norma marca dos límites superiores de acuerdo al número de ejes equivalente durante la vida útil del pavimento (Σ_L).

Límite superior A. Este límite se utiliza para cuando los ejes equivalentes son menores a 10, 000,000 de ejes durante la vida del pavimento ($\Sigma_L \leq 10^6$).

Límite superior B. Este límite se utiliza cuando los ejes equivalentes son mayores a 10, 000,000 de ejes durante la vida del pavimento ($\Sigma_L > 10^6$).

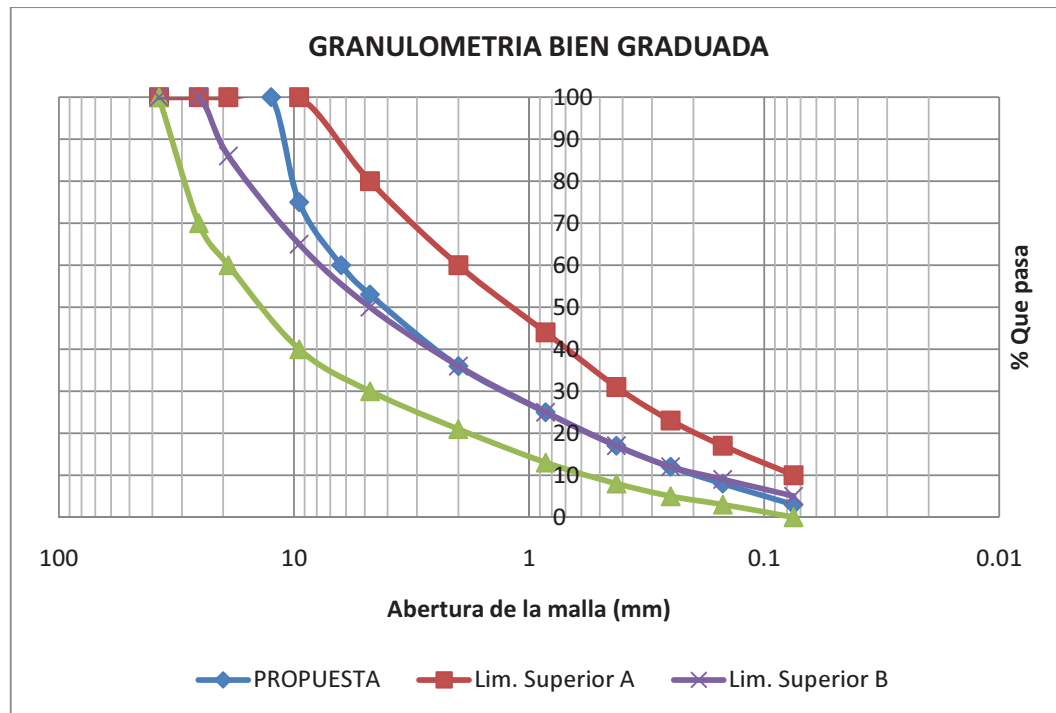


Figura 4. 1 Distribución de la Granulometría Bien Graduada propuesta con el límite superior A ($\Sigma_L \leq 10^6$) y el límite superior B ($\Sigma_L > 10^6$)



Figura 4. 2 Granulometría Bien Graduada

Como se puede observar en la Figura 4. 2 se presenta una muestra del material que se trabaja, como podemos observar es un material en su mayoría de color negro con algunas

partículas rojizas y café claro. La distribución que se utilizara para trabajar cada prueba será de acuerdo a la Tabla 4. 1.

Granulometría Inicial				
Malla No.		% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa
37.5	1 1/2"	0	0	100
25.4	1"	0	0	100
19	3/4"	0	0	100
12.5	1/2"	0	0	100
9.5	3/8"	25	25	75
6.3	1/4"	15	40	60
4.75	4	7	47	53
2	10	17	64	36
0.85	20	11	75	25
0.425	40	8	83	17
0.25	60	5	88	12
0.15	100	4	92	8
0.075	200	5	97	3
Pasa malla No. 200		3	100	0

Tabla 4. 1 Granulometría Bien Graduada de trabajo

4.1.2. GRANULOMETRIA UNIFORME

Esta granulometría como su nombre lo indica, la muestra de trabajo solo está conformada por material de un solo tamaño, que para este caso será material retenido en la malla de 1/4". Esto se ve un las Figuras 4. 3 y 4. 4.



Figura 4. 3 Granulometría Uniforme

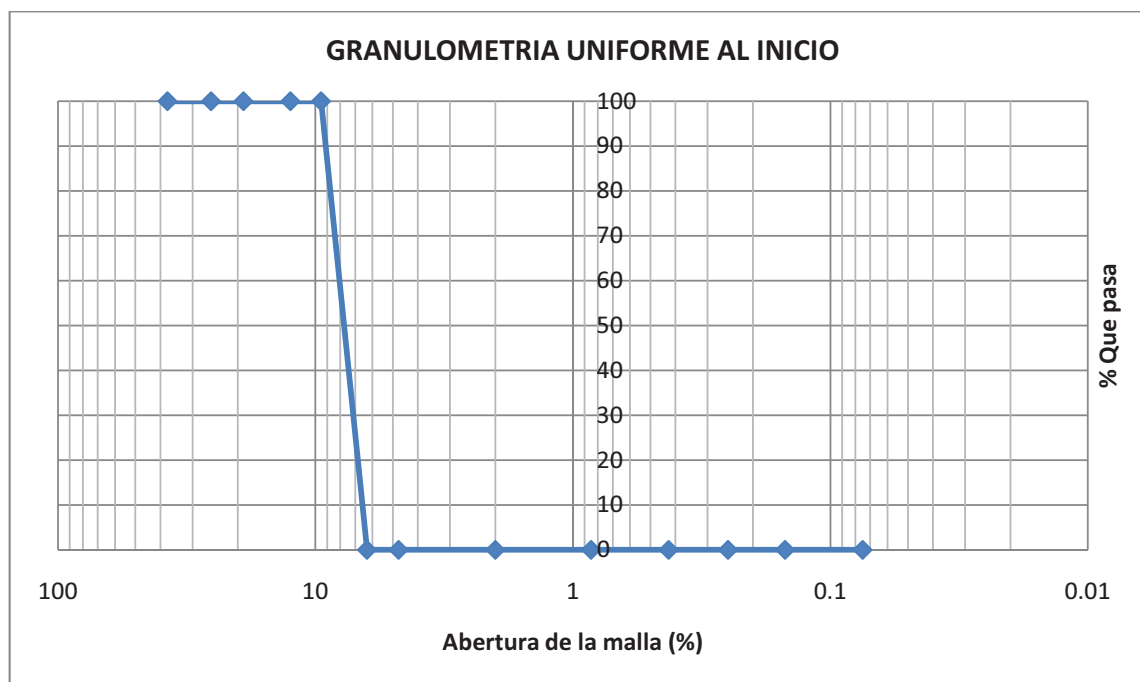


Figura 4. 4 Distribución de la Granulometría Uniforme

4.2. PRUEBA PROCTOR ESTANDAR D-698

Como se describió en el capítulo 3, el método de prueba utilizado es el C, el cual marca la utilización del molde de 6" y se conformara en 3 capas, donde por capa se aplicaran 56 golpes. Como se puede observar en la figura 4. 5.



Figura 4. 5 Molde y un punto de la prueba

4.2.1. PRUEBA PROCTOR GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA

La prueba se realizó de acuerdo al método C que marca la prueba proctor estándar D-698 de la ASTM, la tabla de cálculo se encuentra en el Anexo A. Como se puede observar en la Figura 4. 6 se ve la gráfica de la curva de contenidos de agua, de donde se obtienen los datos de que el peso seco específico seco de la muestra se tiene 1.634 gr/cm^3 , así como un contenido óptimo de agua de 10.95%. Todos estos datos son la información para preparar el espécimen de prueba para este tipo de granulometría.

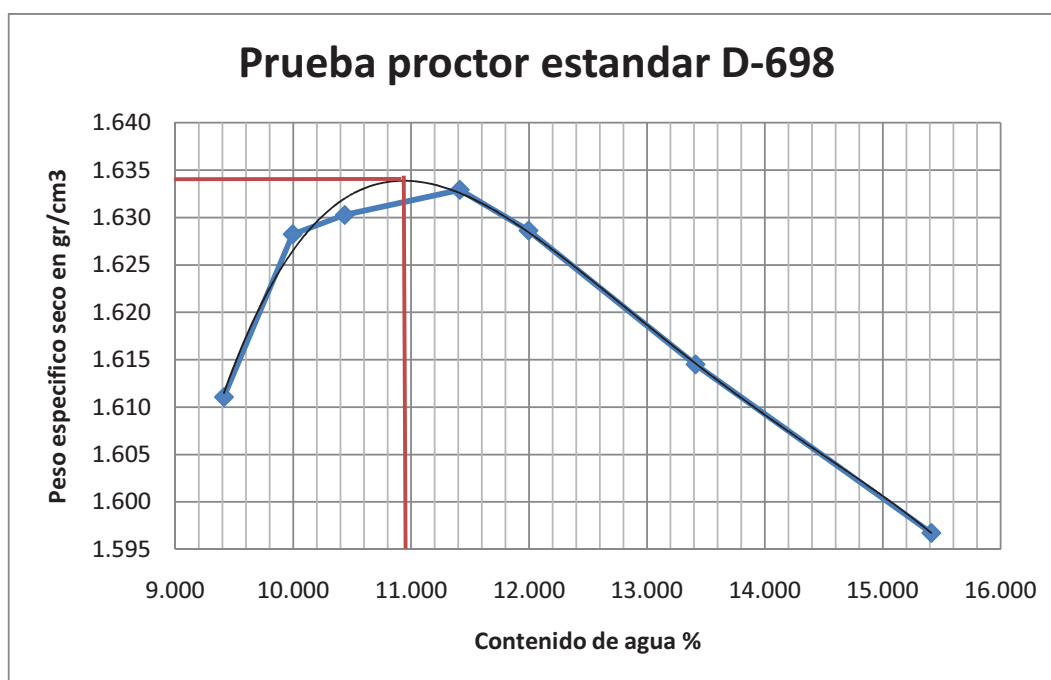


Figura 4. 6 Curva de contenido óptimo de agua

4.2.1. PRUEBA PROCTOR GRANULOMETRIA UNIFORME

Para la granulometría se decidió utilizar también el método C de la prueba proctor estándar D-698, la tabla de calculo se encuentra en el Anexo A. Como se puede observar en la Figura 4. 7 se ve la gráfica de la curva de contenidos de agua, de donde se obtienen los datos de que el peso seco específico seco de la muestra se tiene 1.187 gr/cm^3 , así como un

contenido óptimo de agua de 6.65%. Todos estos datos son la información para preparar el espécimen de prueba para este tipo de granulometría.

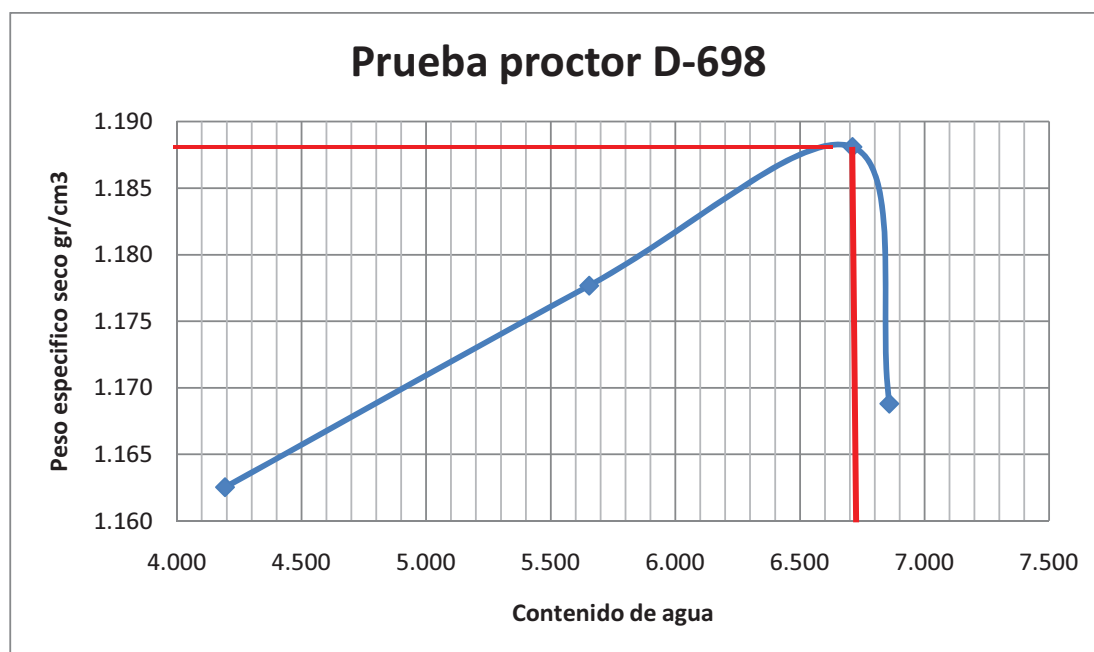


Figura 4. 7 Curva de contenido óptimo de agua

4.3. MODULOS DE RESILIENCIA

4.3.1. MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 100% DE HUMEDAD RELATIVA

A continuación se presentan los resultados del módulo de resiliencia de la granulometría bien graduada al 100% de humedad.

Secuencia 0. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa). Con estos esfuerzos se aplicaron para darle un acondicionamiento necesario al espécimen. Se le dieron primeramente 500 ciclos y se revisó sus ultimas deformaciones en los LVDT's, como todavía eran importantes se le aplicaron otros 500 ciclos de acondicionamiento. La figura 4. 8 muestra el espécimen antes de la prueba.



Figura 4. 8 Espécimen al inicio de la prueba y durante la prueba.

Después de la prueba se obtuvieron los siguientes datos de la granulometría como se muestra en la en la Figura 4. 9.

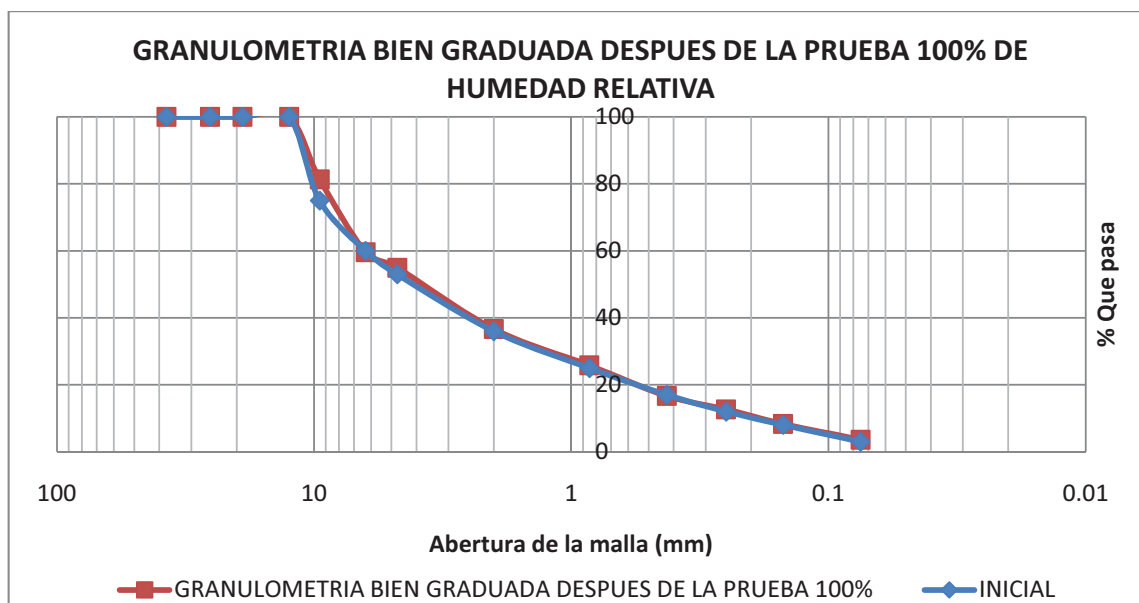


Figura 4. 9 Gráfico de granulometría bien graduada después de la prueba al 100% de humedad relativa

A continuación se presenta en la Tabla 4. 2 los resultados del cálculo del esfuerzo invariante que fue obtenido con la siguiente fórmula:

$$\text{Esfuerzo invariante} = \sigma_d + 3\sigma_3$$

SECUENCIA	ESFUERZO	ESFUERZO	MODULO	ESFUERZO
	CONFINAMIENTO	DESVIADOR	RESILIENTE	INVARIANTE
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
1	20.7	20.7	107955	82.8
2	20.7	41.4	104072	103.5
3	20.7	62.1	102138	124.2
4	34.5	34.5	115523	138
5	34.5	68.9	111875	172.4
6	34.5	103.4	107975	206.9
7	68.9	68.9	144444	275.6
8	68.9	137.9	142944	344.6
9	68.9	206.8	140520	413.5
10	103.4	68.9	180556	379.1
11	103.4	103.4	177895	413.6
12	103.4	206.8	184314	517
13	137.9	103.4	202686	517.1
14	137.9	137.9	201923	551.6
15	137.9	275.8	219828	689.5

Tabla 4. 2 Esfuerzo Invariante para la Granulometría bien Graduada al 100% de humedad relativa

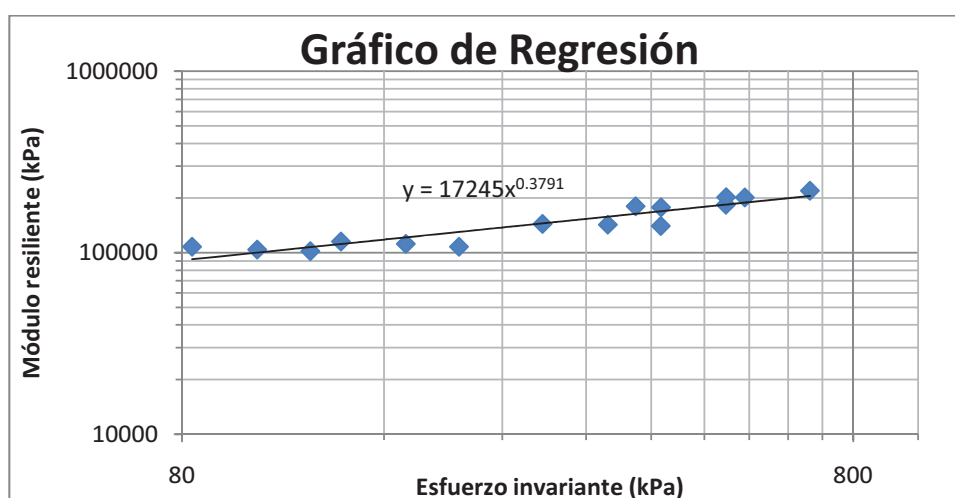


Figura 4. 10 Gráfico de regresión para Granulometría Bien Graduada 100% de humedad relativa

De donde se obtuvieron un valor para $K1 = 17,245$ y $K2 = 0.3791$.

4.3.2. MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA

A continuación se presentan el gráfico de módulo resiliente para la granulometría bien graduada al 50% de humedad relativa. Los gráficos de carga se presentan en el Anexo A.

Secuencia 0. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa). Con estos esfuerzos se aplicaron para darle un acondicionamiento necesario al espécimen. Se le dieron primeramente 500 ciclos y se revisó sus ultimas deformaciones en los LVDT's, como todavía eran importantes se le aplicaron otros 500 ciclos de acondicionamiento. En la figura 4. 11 se muestran el espécimen para esta prueba.



Figura 4. 11 Especimen antes de la prueba y durante la prueba

Después de la prueba se obtuvieron los siguientes datos de la granulometría como se muestra en la Figura 4. 12

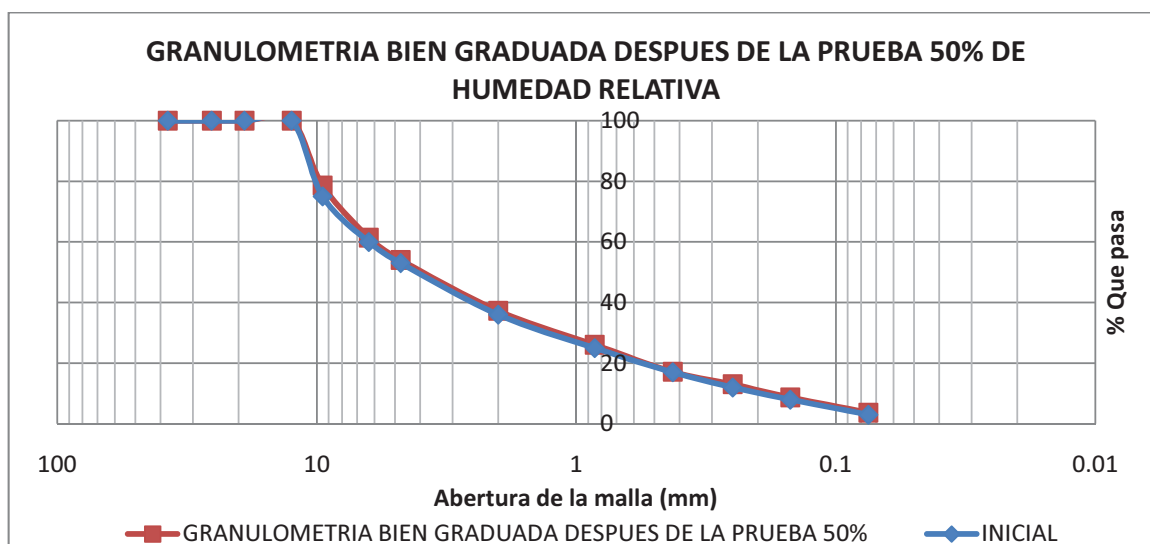


Figura 4. 12 Gráfico de granulometría bien graduada después de la prueba al 50% de humedad relativa

A continuación se presenta en la Tabla 4. 3 los resultados del cálculo del esfuerzo invariante que fue obtenido con la siguiente fórmula:

$$\text{Esfuerzo invariante} = \sigma_d + 3\sigma_3$$

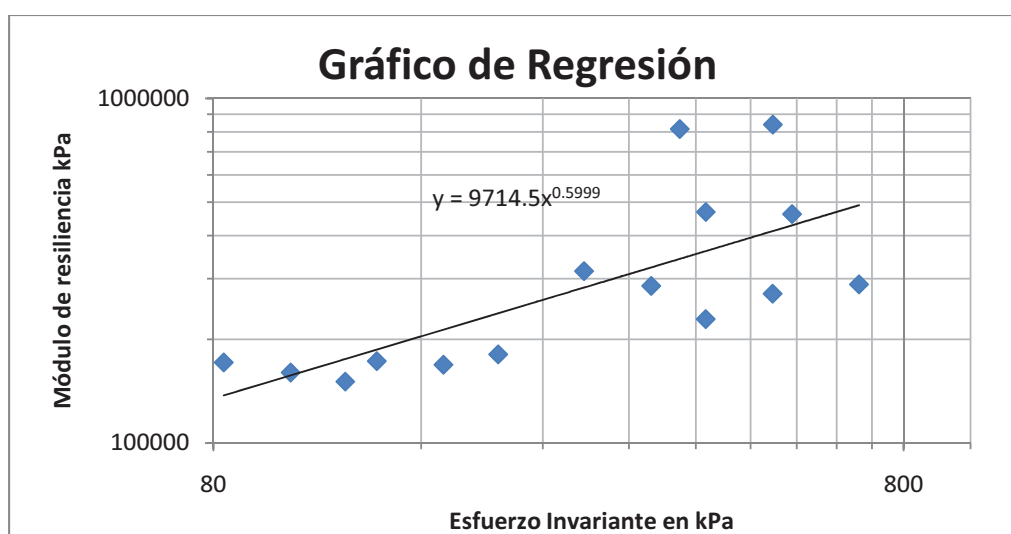


Figura 4. 13 Gráfico de regresión para Granulometría Bien Graduada 50% de humedad relativa

De donde se obtuvieron un valor para $K_1 = 9,714$ y $K_2 = 0.5999$.

GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA				
SECUENCIA	ESFUERZO	ESFUERZO	MODULO	ESFUERZO
	CONFINAMIENTO	DESVIADOR	RESILIENTE	INVARIANTE
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
1	20.7	20.7	171429	82.8
2	20.7	41.4	160000	103.5
3	20.7	62.1	150694	124.2
4	34.5	34.5	172727	138
5	34.5	68.9	168750	172.4
6	34.5	103.4	180851	206.9
7	68.9	68.9	315476	275.6
8	68.9	137.9	285714	344.6
9	68.9	206.8	228916	413.5
10	103.4	68.9	815384	379.1
11	103.4	103.4	468571	413.6
12	103.4	206.8	271111	517
13	137.9	103.4	840000	517.1
14	137.9	137.9	461538	551.6
15	137.9	275.8	288636	689.5

Tabla 4. 3 Esfuerzo Invariante para la Granulometría bien Graduada al 50% de humedad

4.3.3. MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA UNIFORME AL 100% DE HUMEDAD RELATIVA

A continuación se presentan el gráfico de módulo resiliente para la granulometría bien graduada al 100% de humedad relativa. Los gráficos de carga se presentan en el Anexo A.

Secuencia 0. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa). Con estos esfuerzos se aplicaron para darle un acondicionamiento necesario al espécimen. Se le dieron primeramente 500 ciclos y se reviso sus ultimas deformaciones en los LVDT's, como todavía eran importantes se le aplicaron otros 500 ciclos de acondicionamiento



Figura 4. 14 Espécimen durante la prueba

Después de la prueba se obtuvieron los siguientes datos de la granulometría como se muestra en la Figura 4. 15.

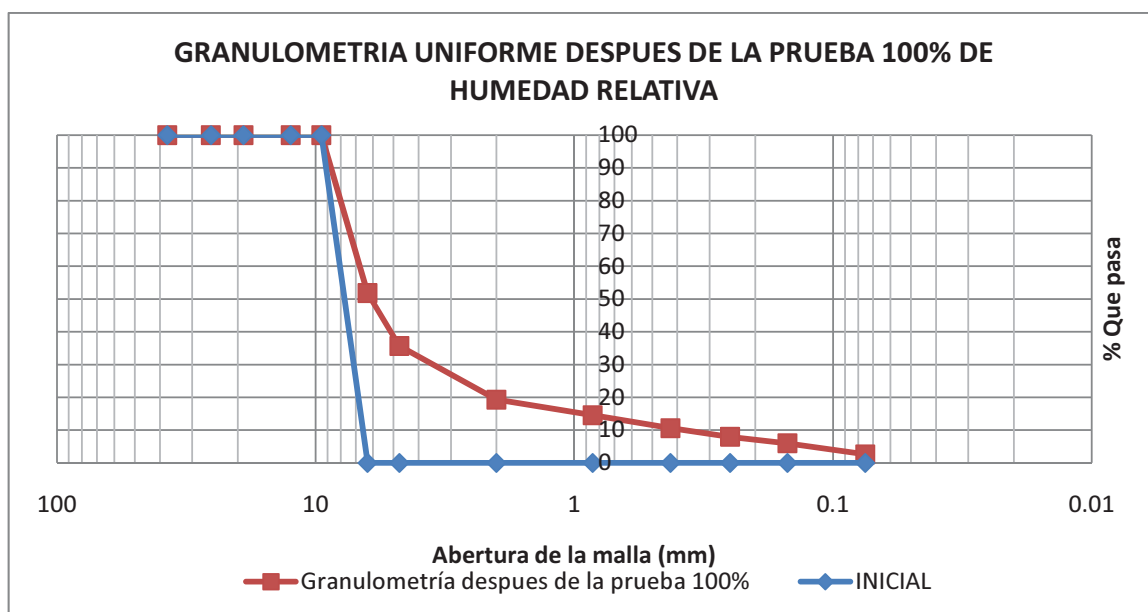


Figura 4. 15 Gráfico de granulometría Uniforme después de la prueba al 100% de humedad relativa

A continuación se presenta en la Tabla 4. 4 los resultados del cálculo del esfuerzo invariante que fue obtenido con la siguiente fórmula:

$$\text{Esfuerzo invariante} = \sigma_d + 3\sigma_3$$

GRANULOMETRIA UNIFORME 100% DE HUMEDAD RELATIVA				
SECUENCIA	ESFUERZO	ESFUERZO	MODULO	ESFUERZO
	CONFINAMIENTO	DESVIADOR	RESILIENTE	INVARIANTE
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
1	20.7	20.7	178571	82.8
2	20.7	41.4	161111	103.5
3	20.7	62.1	148368	124.2
4	34.5	34.5	180328	138
5	34.5	68.9	175000	172.4
6	34.5	103.4	172340	206.9
7	68.9	68.9	228916	275.6
8	68.9	137.9	219298	344.6
9	68.9	206.8		413.5
10	103.4	68.9	270503	379.1
11	103.4	103.4	263768	413.6
12	103.4	206.8	255263	517
13	137.9	103.4	289809	517.1
14	137.9	137.9	281532	551.6
15	137.9	275.8	280435	689.5

Tabla 4. 4 Esfuerzo Invariante para la Granulometría Uniforme al 100% de humedad

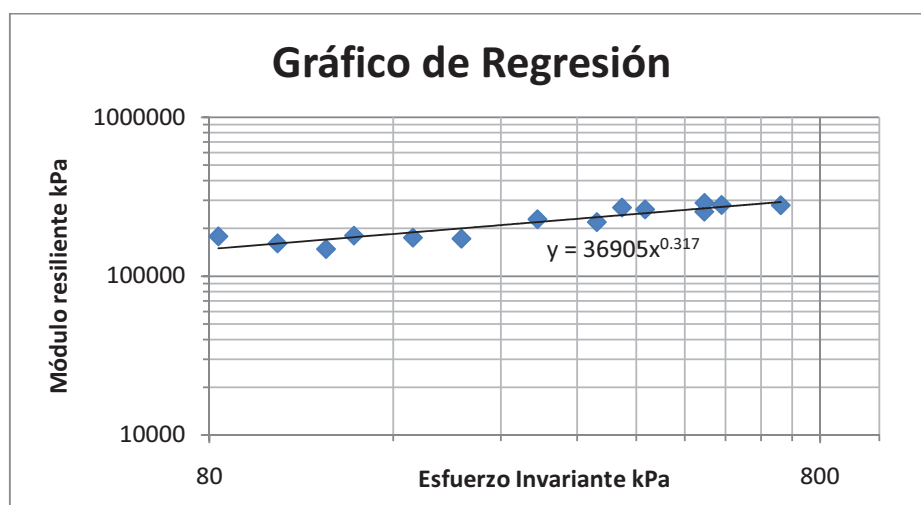


Figura 4. 16 Gráfico de regresión para Granulometría Uniforme 100% de humedad relativa

De donde se obtuvieron un valor para $K1 = 3,6905$ y $K2 = 0.317$

4.3.4. MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA UNIFORME 50% DE HUMEDAD RELATIVA

A continuación se presentan el gráfico de módulo resiliente para la granulometría bien graduada al 50% de humedad relativa. Los gráficos de carga se presentan en el Anexo A.

Secuencia 0. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa). Con estos esfuerzos se aplicaron para darle un acondicionamiento necesario al espécimen. Se le dieron primeramente 500 ciclos y se reviso sus ultimas deformaciones en los LVDT's, como todavía eran importantes se le aplicaron otros 500 ciclos de acondicionamiento.



Figura 4. 17 Especimen durante la prueba

Después de la prueba se obtuvieron los siguientes datos de la granulometría como se muestra en la Figura 4. 18.

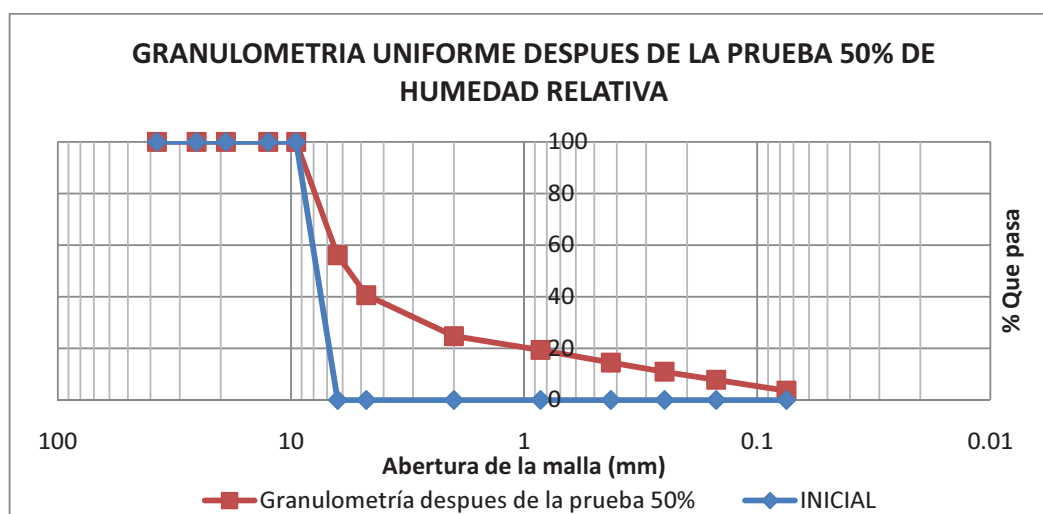


Figura 4. 18 Gráfico de granulometría Uniforme después de la prueba al 50% de humedad relativa

A continuación se presenta en la Tabla 4. 5 los resultados del cálculo del esfuerzo invariante que fue obtenido con la siguiente fórmula:

$$\text{Esfuerzo invariante} = \sigma_d + 3\sigma_3$$

Granulometría Uniforme 50% de humedad relativa				
SECUENCIA	ESFUERZO	ESFUERZO	MODULO	ESFUERZO
	CONFINAMIENTO	DESVIADOR	RESILIENTE	INVARIANTE
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
1	20.7	20.7	101124	82.8
2	20.7	41.4	97015	103.5
3	20.7	62.1	93284	124.2
4	34.5	34.5	125000	138
5	34.5	68.9	118750	172.4
6	34.5	103.4	116667	206.9
7	68.9	68.9	148831	275.6
8	68.9	137.9	146612	344.6
9	68.9	206.8	148355	413.5
10	103.4	68.9	167638	379.1
11	103.4	103.4	162500	413.6
12	103.4	206.8	161864	517
13	137.9	103.4	180488	517.1
14	137.9	137.9	176880	551.6
15	137.9	275.8	175333	689.5

Tabla 4. 5 Esfuerzo Invariante para la Granulometría Uniforme al 50% de humedad relativa

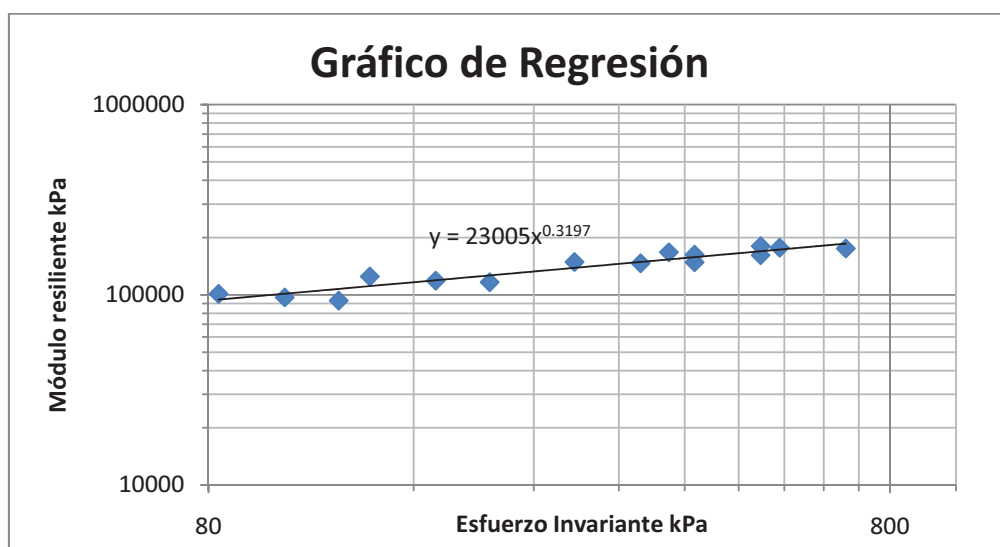


Figura 4. 19 Gráfico de regresión para Granulometría Uniforme 50% de humedad relativa

De donde se obtuvieron un valor para $K1 = 23,005$ y $K2 = 0.3197$.

4.3.5 RESUMEN DE RESULTADOS

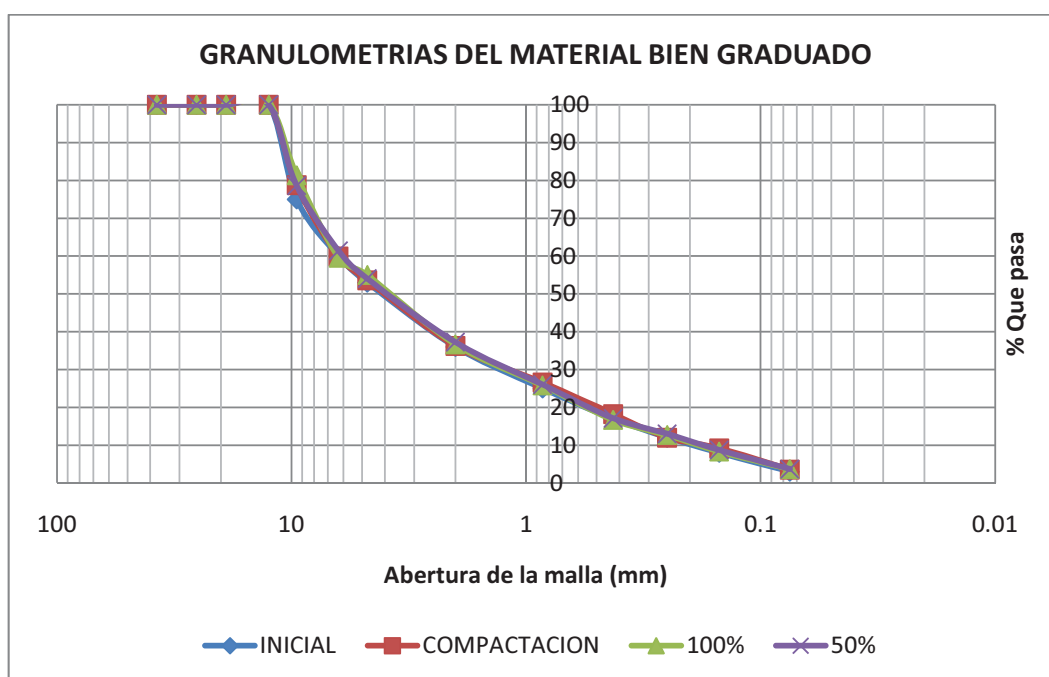


Figura 4. 20 Granulometría del material bien graduado

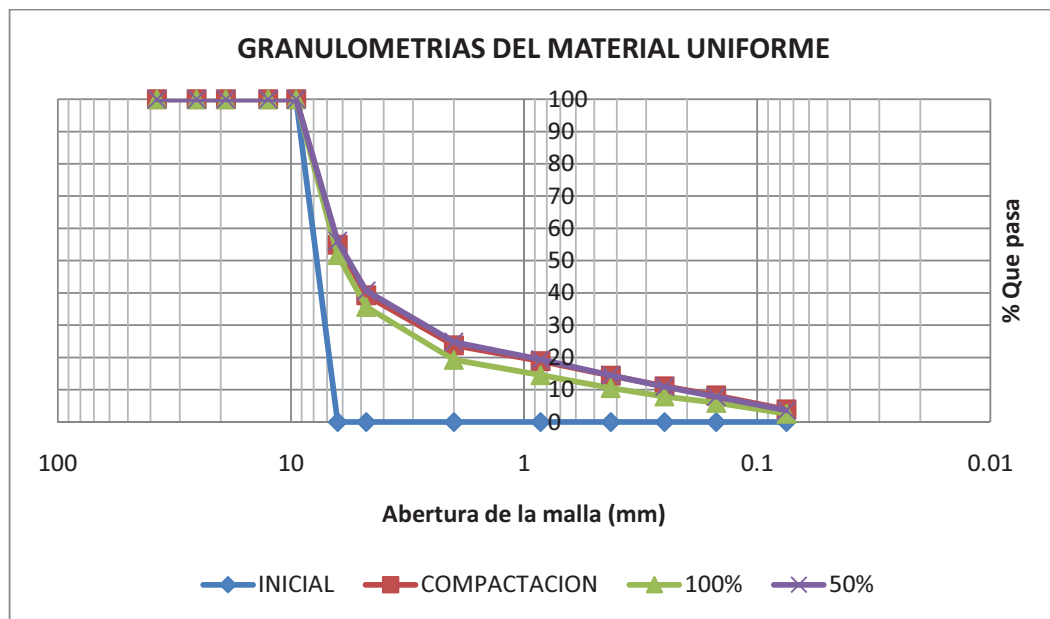


Figura 4. 21 Granulometría del material Uniforme

Como se puede observar en la granulometría uniforme es la que presenta más cambios en su estructura debido a la rotura de las partículas que conforman el espécimen.

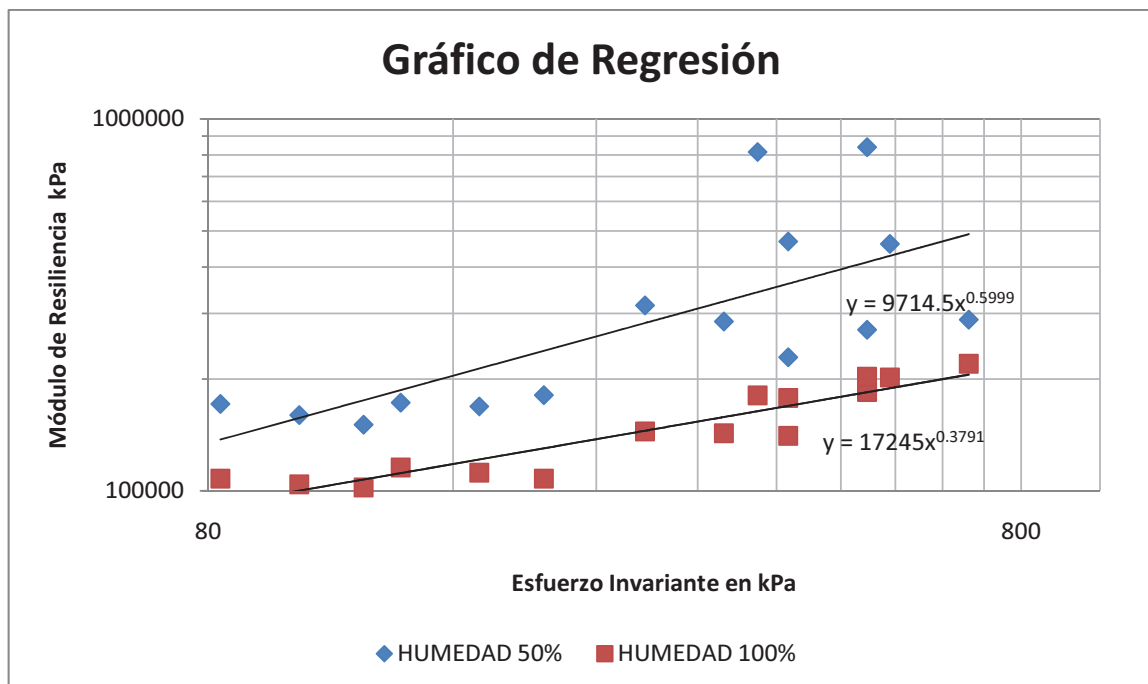


Figura 4. 22 Gráfico de regresión del material de Granulometría Bien Graduada

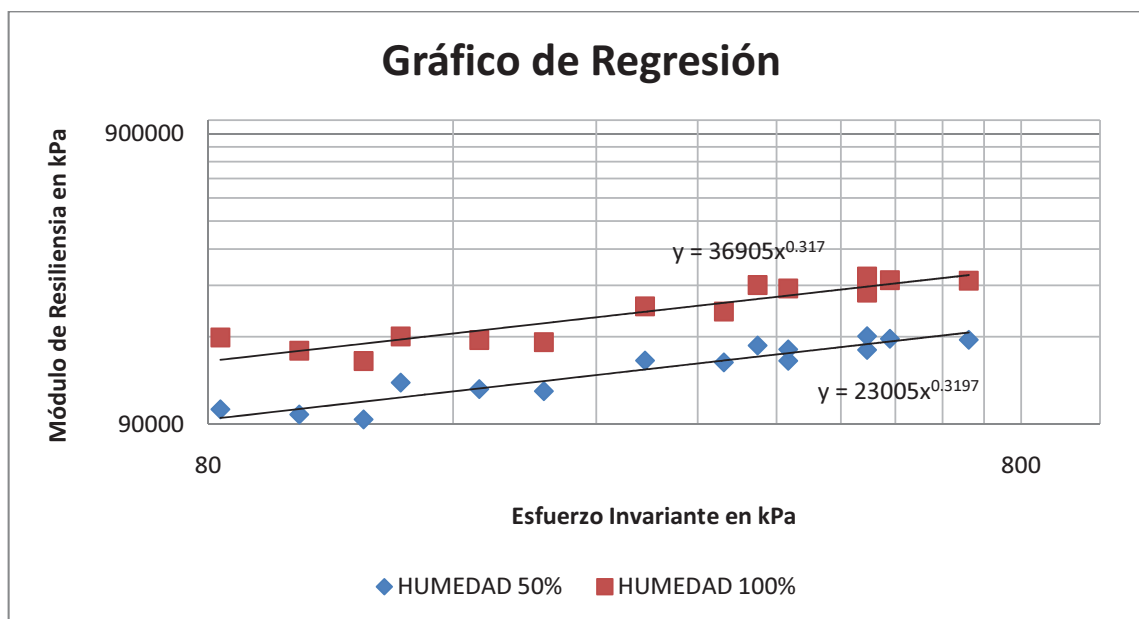


Figura 4. 23 Gráfico de regresión del material de Granulometría Uniforme

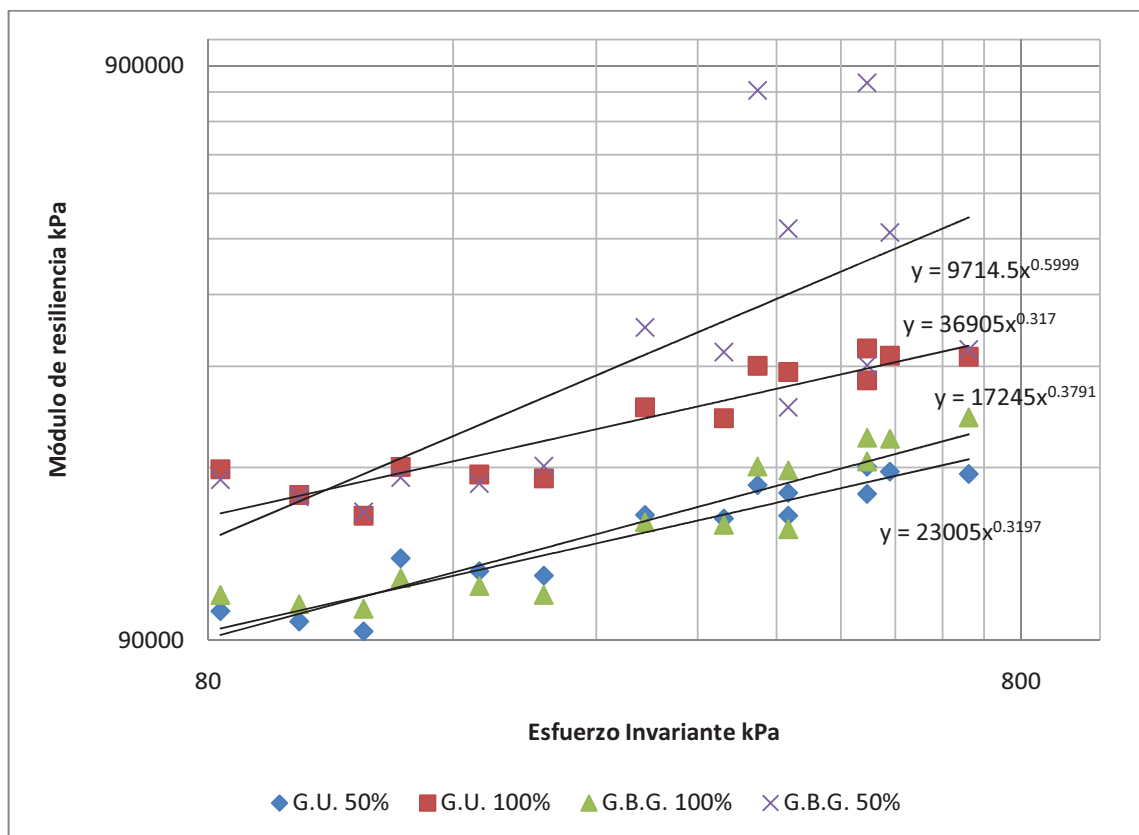


Figura 4. 24 Gráfico de regresión de los materiales Uniforme y Bien Graduado

Como podemos observar en la Granulometría bien graduada hay una mayor dispersión de datos, debido a que la celda y el pistón de carga tenían un rozamiento que fue cambiado para la granulometría uniforme, en la celda se adapto un Balero tipo Thompson y la celda de carga con un pistón de rozamiento mínimo.

4.4. DEFORMACION PERMANENTE

A continuación se presentan los resultados de deformación permanente que se obtuvieron de una granulometría bien graduada. Todos estos resultados son presentados en forma de gráficos.

La prueba consistió en aplicar un esfuerzo de confinamiento de 6.15 psi y un esfuerzo desviador de 370.9 kPa. Estos datos se obtuvieron del análisis de esfuerzos que actúan en una estructura de un pavimento por medio del programa Kenlayer como se muestra en la figura 4. 25. Los datos fueron obtenidos de un camión C2 que es el tipo de eje que presenta mayor daño en el pavimento ya que aplica 10 toneladas en su eje trasero.

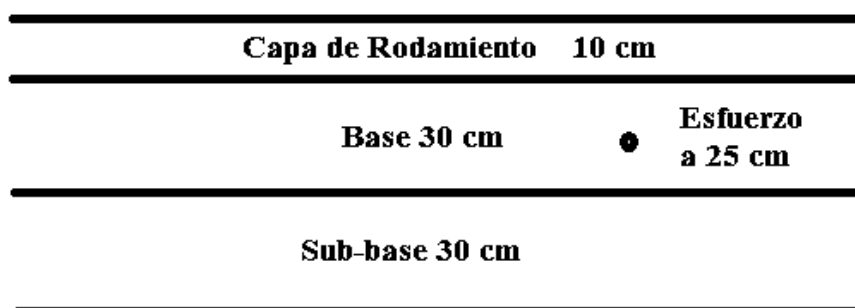


Figura 4. 25 Estructura de un pavimento tipo en México

4.4.1. HUMEDAD RELATIVA AL 100%

En esta modalidad de prueba se aplicó carga durante 3000 ciclos de carga, la información que se arroja se presenta a continuación en la figura 4. 26.

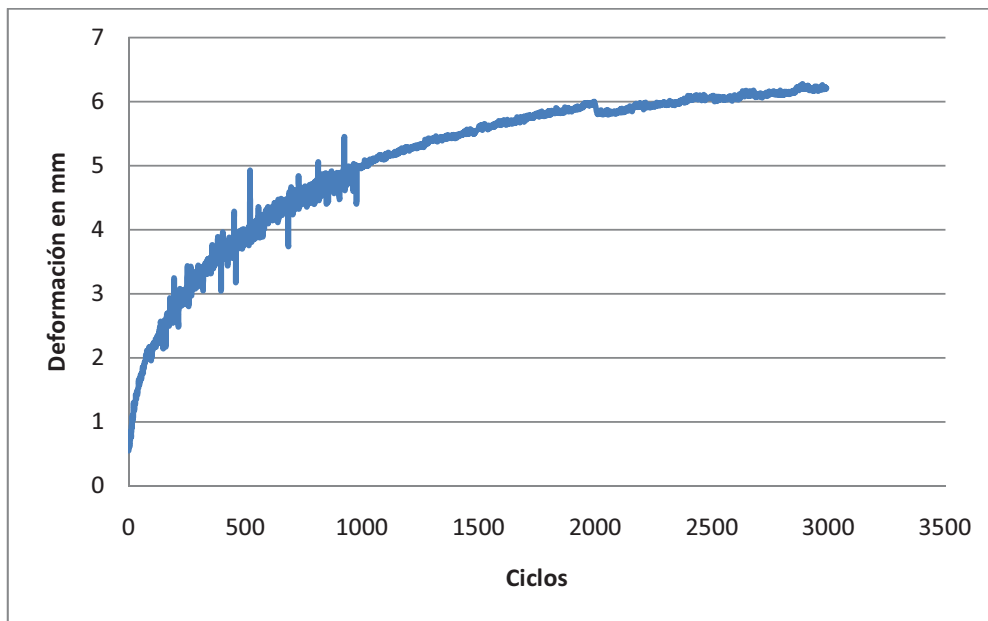


Figura 4. 26 Gráfico de deformación permanente durante 3000 ciclos para una humedad relativa de 100%



Figura 4. 27 Deformación permanente después de la prueba al 100% de humedad relativa

Como se observa en los primeros 1000 ciclos se presenta una deformación alta y en los siguientes 2000 ciclos, la deformación fue estabilizándose, pero no llega a la fase de estabilización durante el proceso de la prueba.

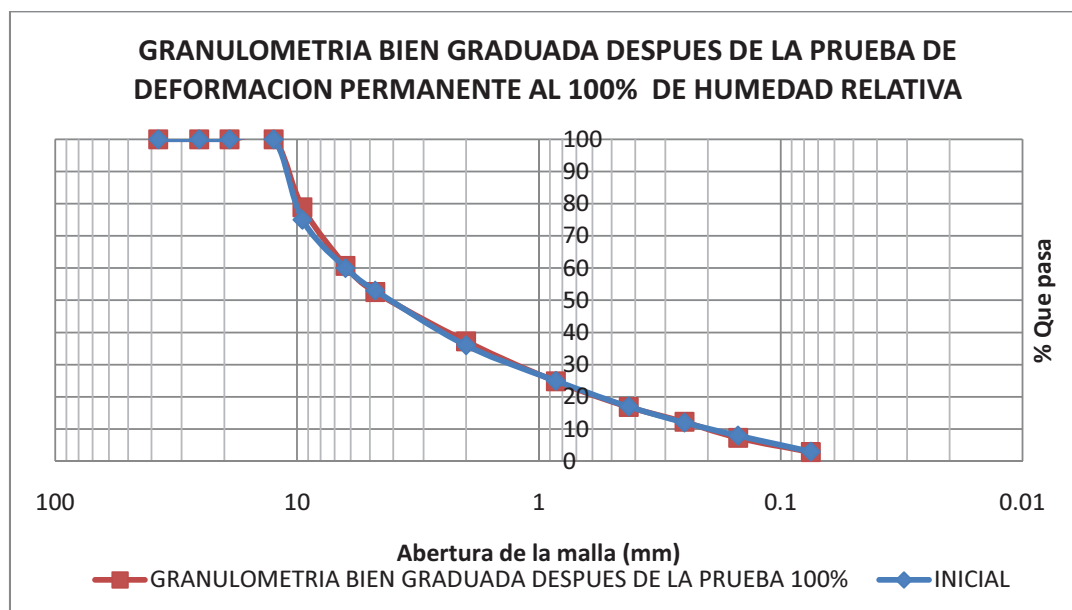


Figura 4. 28 Granulometría después de la prueba de deformación permanente al 100% de húmeda relativa

4.4.2. HUMEDAD RELATIVA AL 50%

En esta etapa se preparó el espécimen al 50% de humedad relativa y se le aplicaron 3000 ciclos de carga, una vez aplicado esto se procedió a saturar el espécimen; cuando el espécimen logró su saturación se procedió a expulsar la humedad dentro del espécimen, por medio del circuito de transferencia de humedad hasta estabilizarla a 50% humedad relativa nuevamente.

Cuando se llegó a la estabilización se aplicaron nuevamente 3000 ciclos, al finalizar los ciclos se volvió a saturar, durante todo este proceso de saturación se tomó deformación del espécimen. La prueba completa con los procesos de saturación se presenta a continuación en la figura 4. 29, de donde el tiempo de saturación se convirtió a ciclos para poder presentar una gráfica en forma continua.

La figura 4. 30 presenta solamente la deformación permanente producida por aplicación de carga marcándose solamente los puntos donde se inició el proceso de saturación.

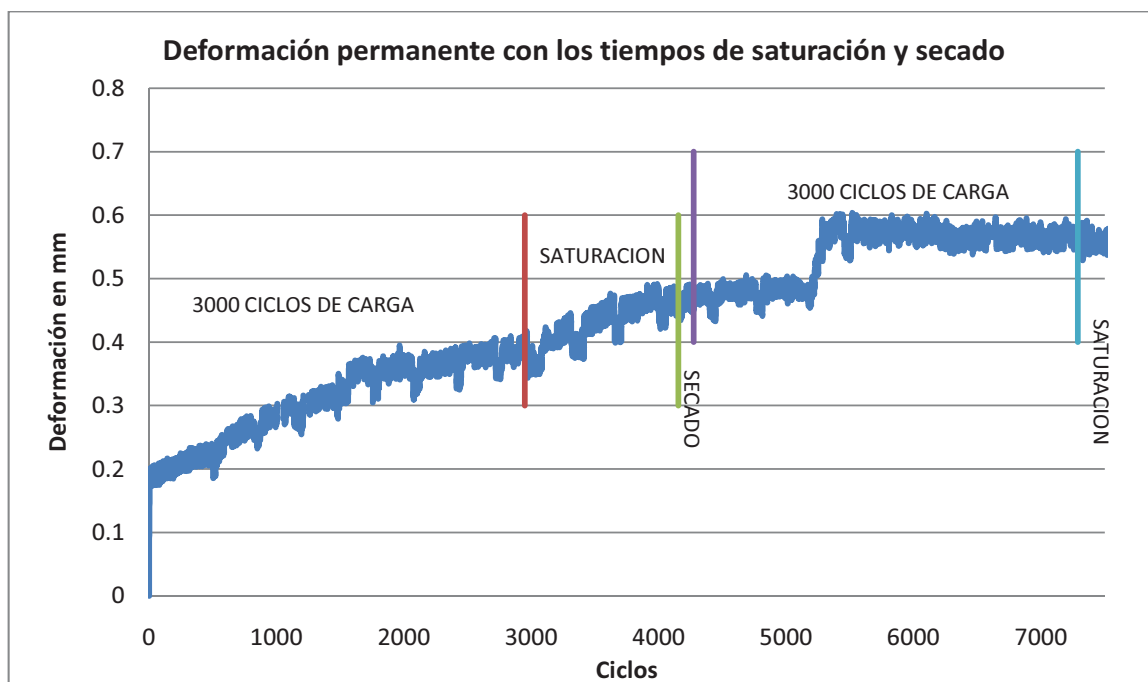


Figura 4. 29 Gráfico de Deformación permanente y proceso de saturación y secado para 50% humedad relativa

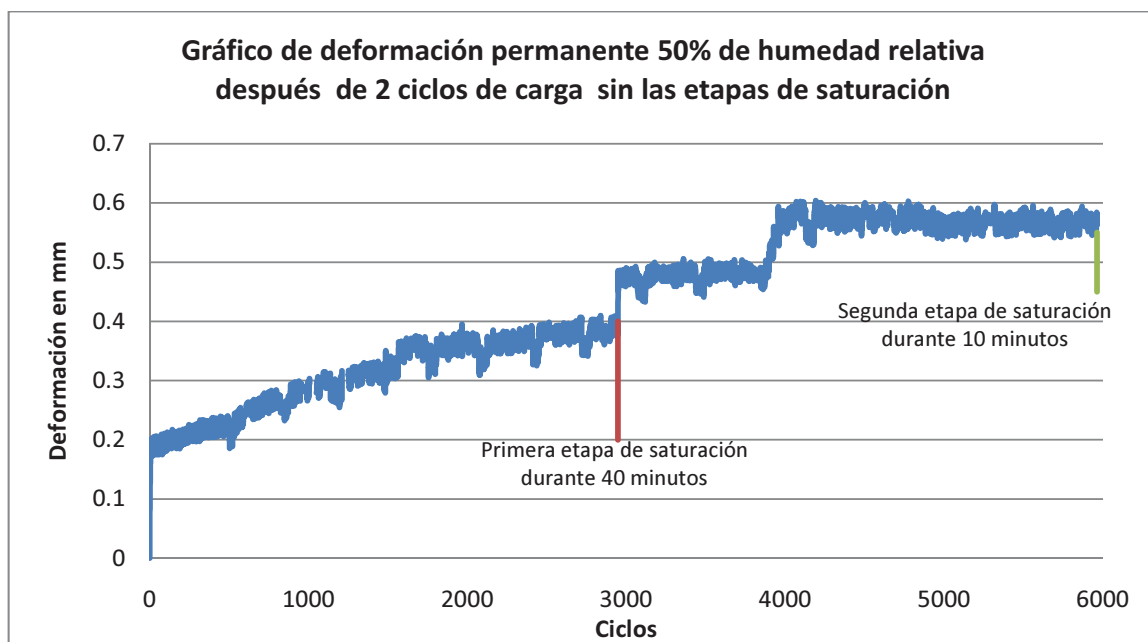


Figura 4. 30 Gráfico con los 2 ciclos de carga sin el proceso de saturación para 50% de humedad relativa

En la figura 4. 30 se observa la primera etapa de 3000 ciclos de carga.

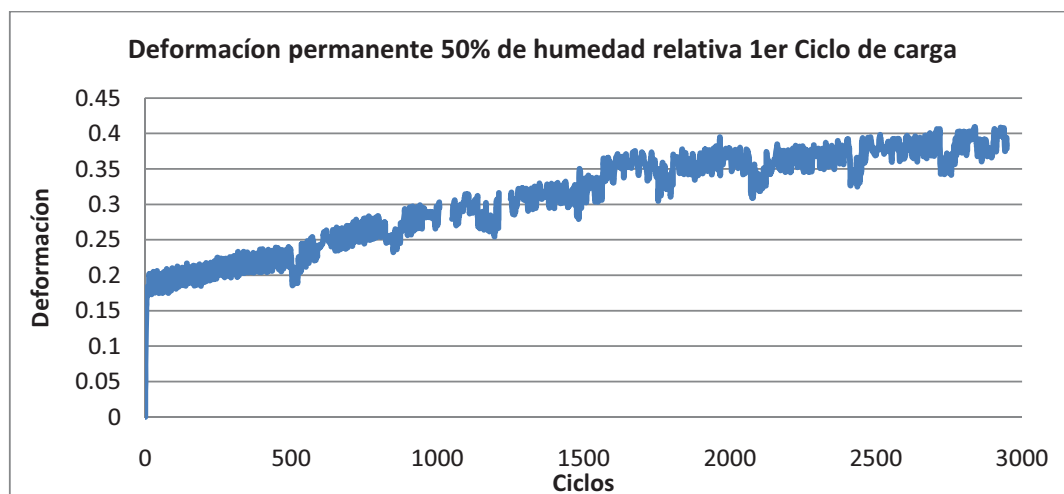


Figura 4. 31 Deformación permanente en los primeros 3000 ciclos para 50% de humedad relativa

Posteriormente se aplicó saturación por aproximadamente 40 minutos, donde se puede observar durante este tiempo se comportó como se ve en la figura 4. 32.

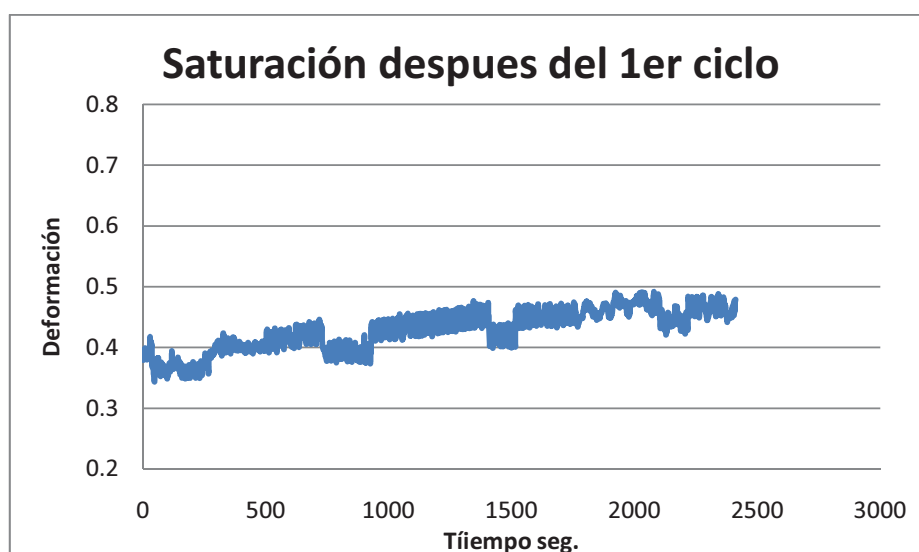


Figura 4. 32 Gráfico de saturación

Como se puede observar en la gráfica hay unos cortes de carga, estos son debido al efecto que se produce en el espécimen debido al encendido del compresor que abastece de aire al equipo, por lo cual para estudios posteriores se corregirá este detalle.

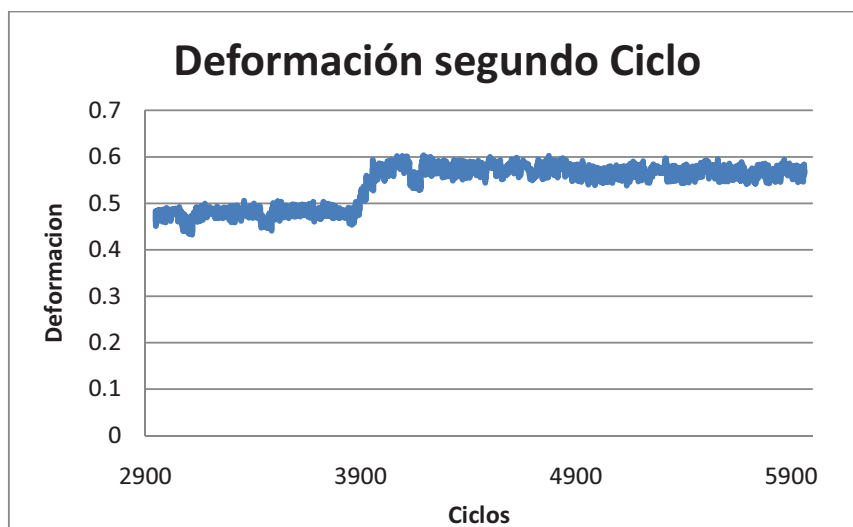


Figura 4. 33 deformación permanente del ciclo 3001 al 6000

En la figura 4. 33 se observa la segunda etapa de 3000 ciclos de carga, en los ciclos 3800 a 4000 hay un ajuste interior de las partículas dando un aumento en la deformación permanente en el espécimen.

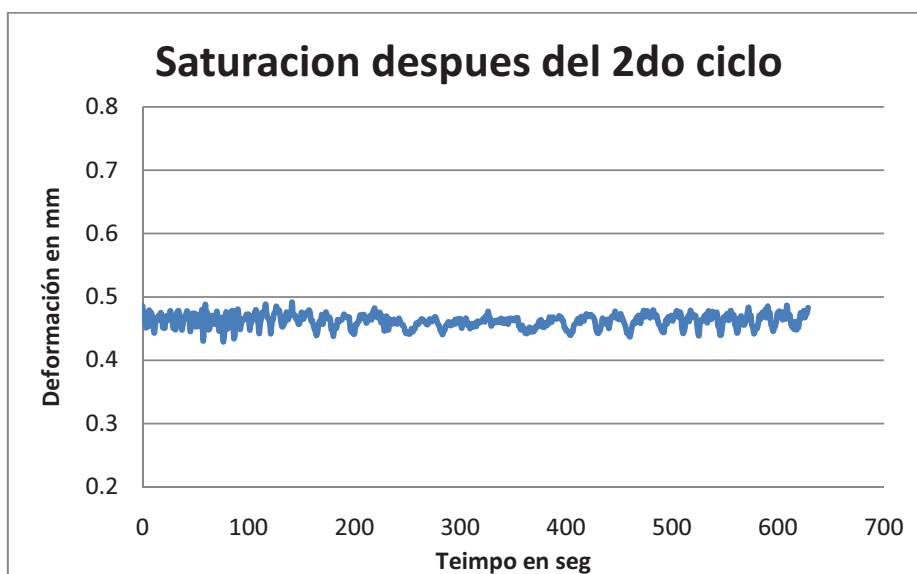


Figura 4. 34 Gráfico de saturación

En la figura 4. 34 se observa perfectamente la etapa de estabilización de la muestra aunque en ese momento se este saturando la muestra.

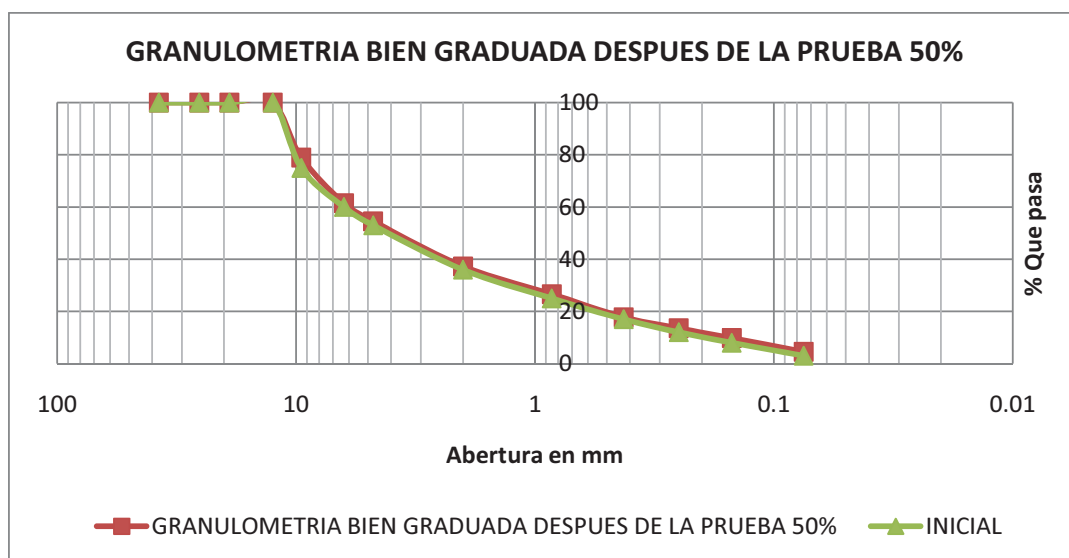


Figura 4. 35 Granulometría después de 2 ciclos de carga (6000 ciclos)

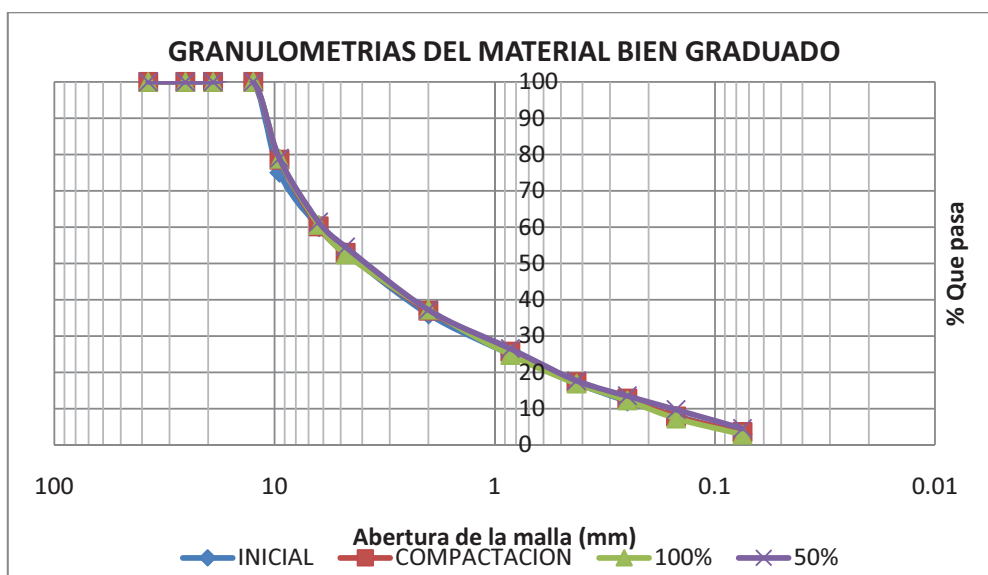


Figura 4. 36 Gráfico de granulometrías de la prueba de deformación permanente

Como se observa en la figura 4. 35 la granulometría sufre un quebramiento mínimo de partículas, por lo cual las granulometrías son similares.



Figura 4. 37 Proceso de saturación

4.5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la prueba Proctor fueron de importancia, ya que permitió remoldear los especímenes a una densidad y humedad controlada.

Mediante la realización de las pruebas pudimos dar una idea de la degradación de las partículas, producto de la aplicación del esfuerzo desviador. De donde fue una constante que el material mas degradado siempre fue aquel que tenia un 100% de humedad relativa, mientras que los que contenían 50% se mantenían apegados a su curva inicial, esto para la Granulometría Bien Graduada.

La Granulometría Uniforme desde el momento de su compactación presenta una degradación, pero con 50% de humedad relativa es mínimo la rotura de partículas, mientras que para 100% de humedad es notable la rotura de partículas por lo cual el 100% de humedad relativa es la condición mas crítica para los materiales sometidos a carga.

De los resultados de los módulos de resiliencia podemos ver que para la Granulometría Bien Graduada, el espécimen con 50% de humedad relativa es más rígido que el material a 100% de humedad relativa, por lo cual nos indica que se tiene mayor módulo de resiliencia cuando se trabaja con porcentajes menores al 100% de humedad relativa.

Pero para la Granulometría Uniforme al 50% de humedad relativa, la rigidez es menor que la del 100% de humedad relativa. Es posible que el material tenga menor resistencia en estado seco ya que se desmorona.

En los análisis de deformación permanente la condición de 100% es la mas desfavorable, ya que solo se presentan 2 etapas (deformación rápida y gradual) de la deformación en el proceso de la prueba, la tercer etapa (proceso de estabilización) pudo haberse presentado si se hubiera seguido aplicando mas ciclos de carga.

En el espécimen al 50% de humedad relativa se presentan en los primeros 3000 ciclos las tres etapas antes mencionadas, como podemos observar en la figura 4. 29 durante la primera etapa de saturación se presenta un aumento en la deformación permanente, durante el proceso de secado la deformación permanente es una pendiente casi horizontal, mientras que al empezar el segundo ciclo de carga hay un ajuste interno de las partículas en el proceso, lo cual provoca un aumento en la deformación, pero después se estabiliza en los últimos 1500 ciclos de carga y en la segunda etapa de saturación.

Por lo cual todos los resultados descritos anteriormente nos dan una visión general de que contenidos altos de agua o humedad relativa en un material para un pavimento, repercute directamente en la resistencia y deformación de los materiales, lo cual a mejor resistencia mayor periodo de vida útil, mantenimiento y rehabilitación en un periodo de tiempo mas largo y por ende un transito mas confortable para los usuarios.



CAPITULO 5

CONCLUSIONES

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES

Durante el análisis de resultado se pudieron ver que el porcentaje de humedad de trabajo tiene un efecto directamente sobre las granulometrías, tanto en las pruebas de módulo de resiliencia y deformación permanente. El tipo de granulometría del material, a su vez ha tenido una influencia sobre los resultados del módulo de resiliencia.

En lo que respecta a la deformación permanente queda claro que este trabajo es solo la punta de lanza para seguir realizando pruebas de este tipo, ya que debido a tiempo que se tarda en cambiar de humedad de un estado saturado a uno seco, o viceversa no fue posible ensayar más muestras durante el desarrollo de este trabajo. Por lo cual después de analizados los resultados se ha llegado las siguientes conclusiones:

- En lo referente a la granulometría después de las pruebas de módulo de resiliencia, podemos observar que, para la Granulometría Bien Graduada, se presenta una rotura de partículas mínima o imperceptible respecto a la inicial. Pero al analizar a detalle se observa que, cuando se trabajo el material al 100% de humedad relativa, existe mayor rotura de partículas, este fenómeno se presenta de igual manera en la Granulometría Uniforme, solo que para este caso la degradación de la curva es más notable a simple vista.
- Como se puede apreciar en los materiales de Granulometría Bien Graduado, el valor del módulo de resiliencia en el material con humedad relativa al 100% es de menor, lo cual se aprecia perfectamente al momento de comparar las líneas de ajuste. Por otro lado, se observa una variación importante en la pendiente (parámetro b_2 de la ec. $y=a_1x^{b_2}$) cuando se cambia la humedad relativa de prueba, es mayor la pendiente cuanto más seco está el material (ver figura 4. 22).

En lo que respecta al material de Granulometría Uniforme la prueba con 50% de humedad relativa presenta menor rigidez que la que se probó con el 100% de humedad relativa. Al comparar las ecuaciones de ajuste de ambas la pendiente es casi igual y la intersección con el eje Y nos indica que el material con 50% de humedad relativa es de un módulo menor, esto puede estar relacionado con el tipo de material. Ya que al ser material de granulometría uniforme, al estar a un nivel de 50% de humedad este se desmorona, lo que provoca una disminución del módulo de resiliencia (para verificar la hipótesis anterior se necesitan realizar más pruebas al respecto).

- En lo referente a la prueba de deformación permanente, la granulometría varía fuertemente después de la prueba con 100% de humedad relativa, mientras que la deformación que se presenta al principio es rápida, y posteriormente existe una etapa de deformación gradual; dejando la etapa de estabilización (última etapa) para un periodo largo de tiempo. En el caso de prueba del 50% de humedad relativa se nota perfectamente que se cumplen las tres etapas de deformación mencionadas: deformación rápida, deformación gradual y estabilización. Al comparar ambos ensayos se nota claramente que el ensayo con humedad relativa del 100% tienen mayor deformación permanente (cuanto).
- Debido a lo anterior podemos concluir que a mayor número de ciclos de carga las deformaciones permanentes se estabilizan más rápido cuando tenemos contenidos menores de agua. Sin embargo las deformaciones permanentes después de una saturación en la etapa de estabilización podrían ser mayores. Lo que condujo a hacer un ensayo de este tipo.
- En el ensayo multi-etapas, se pudo observar que en la primera etapa (3000 ciclos y 50% humedad relativa) se tiene una deformación permanente rápida y transición hacia la estabilización gradual en un menor tiempo (es decir una curvatura alta, ver figura 4. 29); posteriormente se presenta la zona de estabilización que presenta una

deformación del 0.04%. La siguiente etapa es de saturación, en esta se presenta un aumento de la deformación permanente debida al reblandecimiento de las partículas en presencia de agua. Posteriormente en la tercera etapa de secado hasta una humedad relativa de 50% no se presentó deformación permanente adicional. En la cuarta etapa se aplicaron 3000 ciclos a una humedad de 50%, resultó que en el ciclo 1000 se presenta un pequeño colapso, lo cual nos indica que el proceso de humedecimiento y secado afectó la estructura de las partículas. Durante la última etapa el material se saturó sin aplicación de carga y no se observó cambio en la deformación.

El estudio anterior nos deja como conclusiones que el cambio del contenido de humedad durante la prueba, afecta el comportamiento del suelo; aumenta las deformaciones permanentes, disminuye los módulos de resiliencia y aumenta la rotura de partículas. Lo anterior se debe de tomar en cuenta a la hora del diseño de un pavimento, ya que una estructura con mala granulometría y con variaciones de contenidos de humedad durante su vida de servicio, darán como resultado el deterioro acelerado del pavimento.



CAPITULO 6

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

Garnica P., Gómez J.A., Pérez A., Martínez G.E.I. y Chávez J.A., 2004 “*Módulos de Resiliencia de agregados provenientes de rocas altamente intemperizadas*” Publicación Técnica No 256. Sanfandila, Qro.

Rico A. y Del Castillo H., 1996 “*La Ingeniería de suelos en las vías terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas*” Volumen 2. Editorial LIMUSA, S.A. de C.V. México, D.F.

Garnica P., Pérez N. y Gómez J.A., 2000 “*Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*” Publicación Técnica No 142. Sanfandila, Qro.

Brown S.F. “*Soil mechanics in pavement engineering*” Géotechnique 46, No 3, pp. 383 – 426.

Garnica P., Gómez J.A., Sesma J.A., 2002 “*Mecánica de Materiales par Pavimentos*” Publicación Técnica No 165. Sanfandila, Qro.

Li J., and Qubain B. S., 2003 “*Resilient Modulus Variation whit Water Content*” Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM STP 1437. ASTM International, West Conshohocken.

Khogali, W.E.I. and Mohamed, E.H.H. “*Novel approach for characterization of unbound materials*” Transportation Research Record, No. 1847, pp. 38 – 46.

Zeghal, M., 2009 “*The Impact of Grain Crushing on Road Performance*” Geotech Geol Eng No. 27, pp. 549 – 558.

ASTM International, 2000 “*D 698 – 00 – 03, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m³))*”, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

AASHTO, 1999 “*T 307 – 99 Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*”

Huang, Yang H, 1993 “*Pavement Analysis and Design*” University of Kentucky. Prentice Hall, Inc.

Secretaria de Comunicaciones y Transporte 2004 “*N – CMT – 4 – 02 – 002 – 04, Norma Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para Base y Subbase*”



ANEXO A

ANEXO A

A.1. TABLAS DE GRANULOMETRIA

A.1.1. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 100% DE HUMEDAD RELATIVA DESPUES DE LA PRUEBA

Granulometría después de la prueba 100%					
Malla No.		Peso retenido gr	% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa
37.5	1 1/2"	0	0	0	100
25.4	1"	0	0	0	100
19	3/4"	0	0	0	100
12.5	1/2"	0	0	0	100
9.5	3/8"	187	19	18.6	81
6.3	1/4"	219	22	40.4	60
4.75	4	46	5	45.0	55
2	10	184.1	18	63.4	37
0.85	20	108.8	11	74.2	26
0.425	40	91.8	9	83.3	17
0.25	60	39.9	4	87.3	13
0.15	100	43.9	4	91.7	8
0.075	200	46.9	5	96.3	4
Pasa malla 200		36.7	4	100.0	0
SUMA		1004.1	100		

Granulometría obtenida después de la prueba al 100% de humedad

A.1.2. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA DESPUES DE LA PRUEBA

Granulometría después de la prueba 50%					
Malla No.		peso retenido gr	% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa
37.5	1 1/2"	0	0	0	100
25.4	1"	0	0	0	100
19	3/4"	0	0	0	100
12.5	1/2"	0	0	0	100
9.5	3/8"	107.6	21	21.4	79
6.3	1/4"	86.5	17	38.6	61
4.75	4	37.2	7	46.0	54
2	10	84.5	17	62.8	37
0.85	20	56.4	11	74.0	26
0.425	40	44.8	9	82.9	17
0.25	60	20.7	4	87.0	13
0.15	100	21.7	4	91.3	9
0.075	200	25.3	5	96.3	4
Pasa malla No. 200		18.5	4	100.0	0
SUMA		503.2	100		

Granulometría obtenida después de la prueba al 50% de humedad

A.1.3. GRANULOMETRIA UNIFORME 100% DE HUMEDAD RELATIVA DESPUES DE LA PRUEBA

Malla No.		peso retenido gr	% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa
37.5	1 1/2"	0	0	0	100
25.4	1"	0	0	0	100
19	3/4"	0	0	0	100
12.5	1/2"	0	0	0	100
9.5	3/8"	0	0	0.0	100
6.3	1/4"	315.89	48	48.2	52
4.75	4	105.37	16	64.3	36
2	10	107.37	16	80.7	19
0.85	20	31.04	5	85.4	15
0.425	40	26.02	4	89.4	11
0.25	60	17.35	3	92.1	8
0.15	100	13	2	94.1	6
0.075	200	21.98	3	97.4	3
Pasa malla No. 200		16.98	3	100.0	0
SUMA		655	100		

Granulometría obtenida después de la prueba al 100% de humedad

A.1.4. GRANULOMETRIA UNIFORME 50% DE HUMEDAD RELATIVA DESPUES DE LA PRUEBA

Granulometría después de la prueba 50%					
Malla No.		peso retenido gr	% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa
37.5	1 1/2"	0	0	0	100
25.4	1"	0	0	0	100
19	3/4"	0	0	0	100
12.5	1/2"	0	0	0	100
9.5	3/8"	0	0	0.0	100
6.3	1/4"	325.95	44	43.9	56
4.75	4	114.43	15	59.4	41
2	10	117.45	16	75.2	25
0.85	20	40.12	5	80.6	19
0.425	40	36.06	5	85.5	15
0.25	60	26.4	4	89.0	11
0.15	100	23.13	3	92.2	8
0.075	200	31.2	4	96.4	4
Pasa malla No. 200		26.9	4	100.0	0
SUMA		741.64	100		

Granulometría obtenida después de la prueba al 50% de humedad

A.2. TABLAS DE LA PRUEBA PROCTOR D-698

A.2.1. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA

Diámetro (cm)	15.22	PRUEBA PROCTOR ESTANDAR					
Altura (cm)	11.662						
Volumen (cm ³)	2121.740						
Prueba No	1	2	3	4	5	6	7
Cantidad agua (ml)	400	420	450	480	500	560	640
Peso Molde + Suelo (gr)	10120	10180	10200	10240	10250	10265	10290
Peso Molde (gr)	6380	6380	6380	6380	6380	6380	6380
Peso Suelo húmedo (gr)	3740	3800	3820	3860	3870	3885	3910
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	1.763	1.791	1.800	1.819	1.824	1.831	1.843
Suelo Húmedo (gr)	498.7	501.8	400				
Peso Seco (gr)	455.8	456.2	362.2				
Contenido de agua (%)	9.412	9.996	10.436	11.412	11.996	13.412	15.412
Peso específico Seco	1.611	1.628	1.630	1.633	1.629	1.615	1.597
Contenido de agua (%)	10.95						
Peso específico Seco	1.629						

Tabla de resultados de la prueba proctor estándar GBG D-698

A.2.2. GRANULOMETRIA UNIFORME

Diámetro (cm)	15.22	PRUEBA PROCTOR ESTANDAR			
Altura (cm)	11.662				
Volumen (cm ³)	2121.740				
Prueba No	1	2	3	4	
Cantidad agua (ml)	200	280	360	440	
Peso Molde + Suelo (gr)	8465	8535	8585	8545	
Peso Molde (gr)	5895	5895	5895	5895	
Peso Suelo húmedo (gr)	2570	2640	2690	2650	
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	1.211	1.244	1.268	1.249	
Suelo Húmedo (gr)	400.1	399.9	400.7	400.4	
Peso Seco (gr)	384	378.5	375.5	374.7	
Contenido de agua (%)	4.193	5.654	6.711	6.859	
Peso específico Seco	1.163	1.178	1.188	1.169	
Contenido de agua (%)	6.671				
Peso específico Seco	1.187				

Resultados de la prueba proctor estándar GU D-698

A.3. GRAFICOS DE CARGA

A.3.1. GRAFICOS DE CARGA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 100% DE HUMEDA RELATIVA

Secuencia 1. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa).

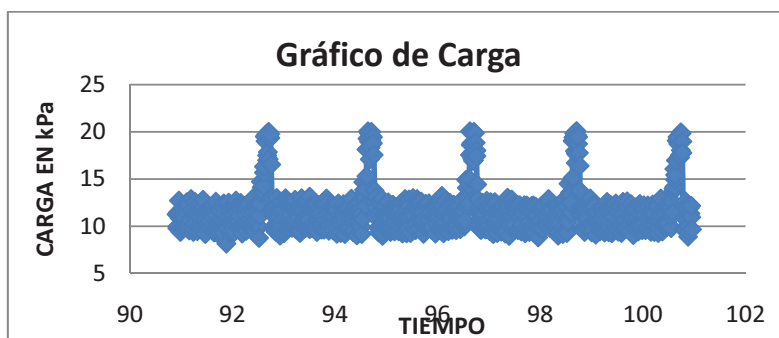


Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20 kPa.

Secuencia 2. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa).

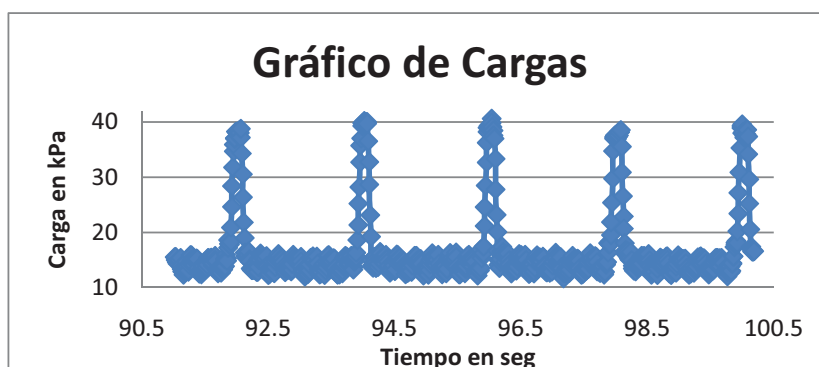


Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa.

Secuencia 3. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa).

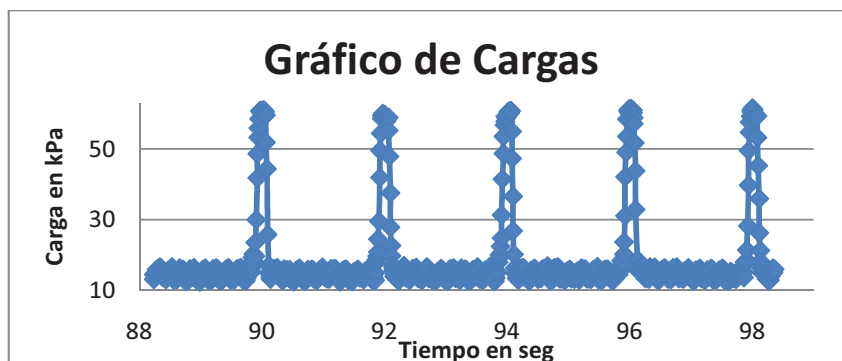


Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa.

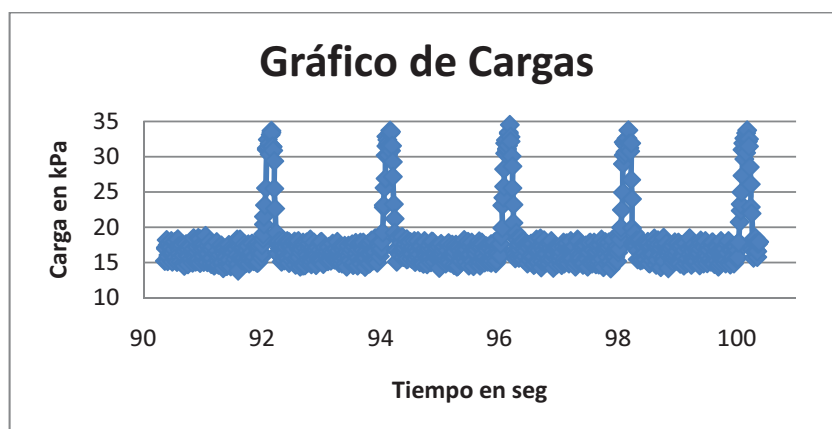
Secuencia 4. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa.

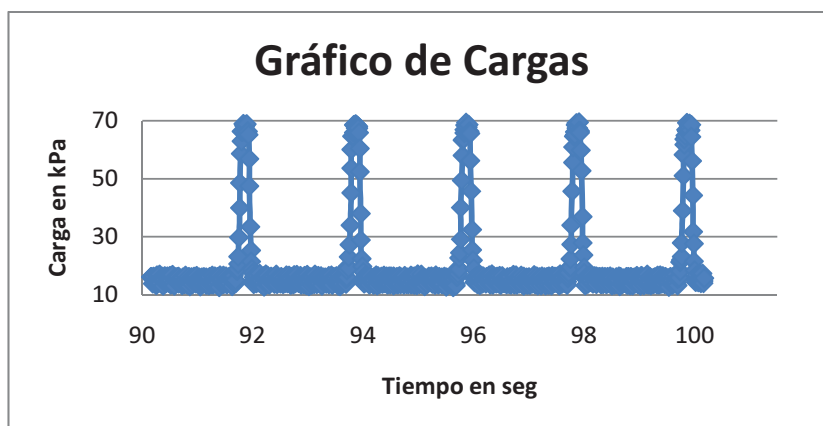
Secuencia 5. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa.

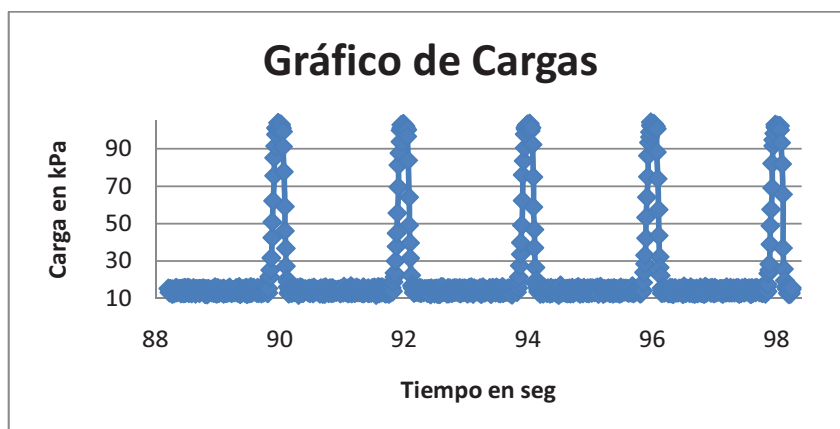
Secuencia 6. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa.

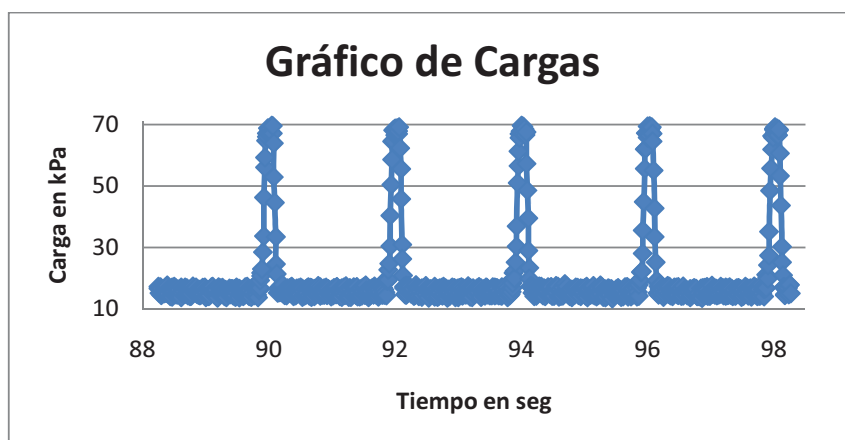
Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa.

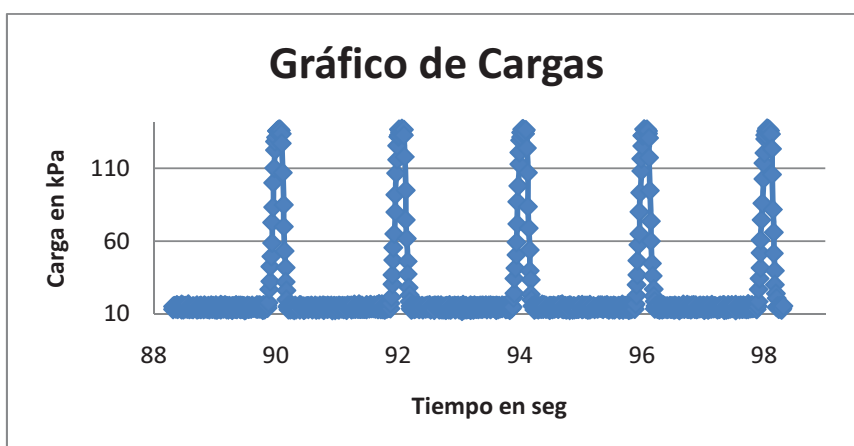
Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa.

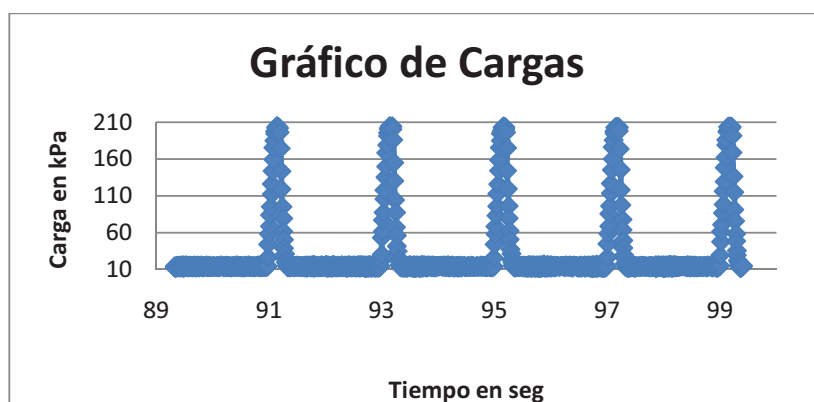
Secuencia 9. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa.

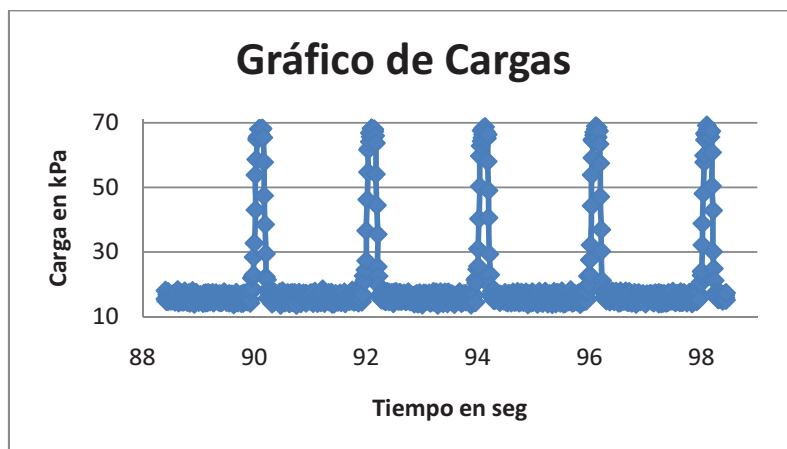
Secuencia 10. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa.

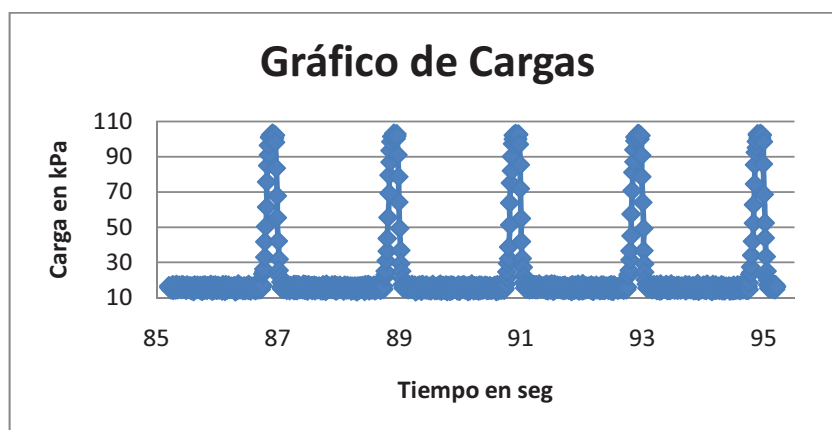
Secuencia 11. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa.

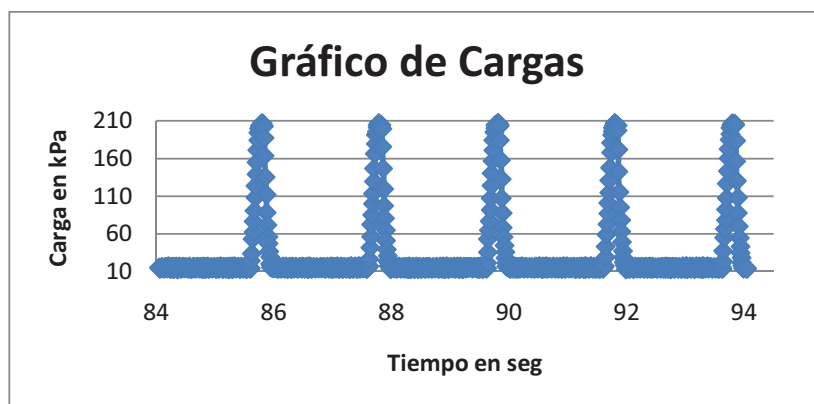
Secuencia 12. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa.

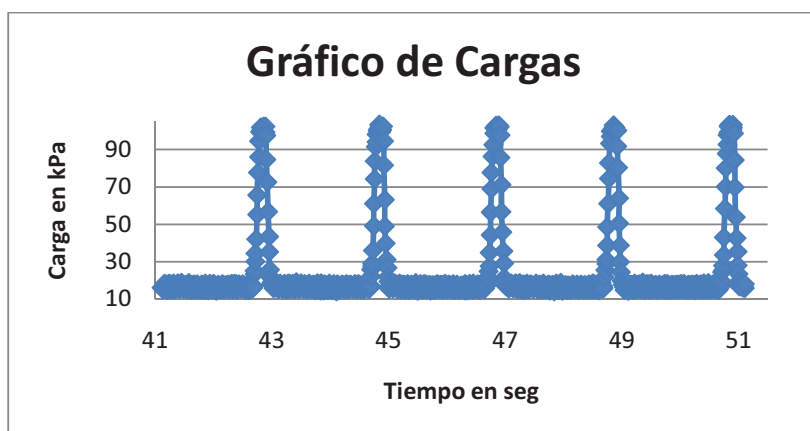
Secuencia 13. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa.

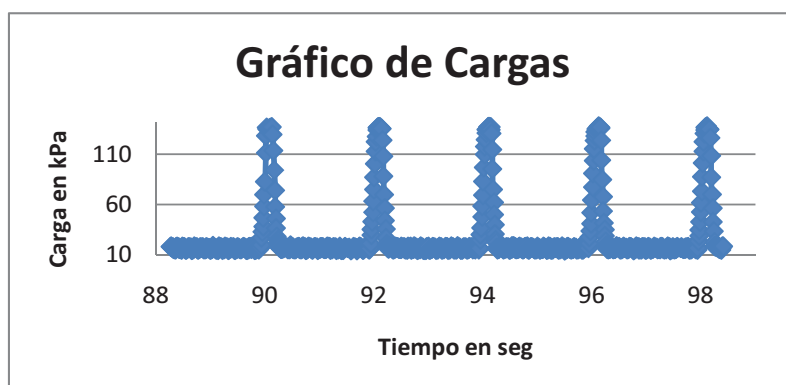
Secuencia 14. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa.

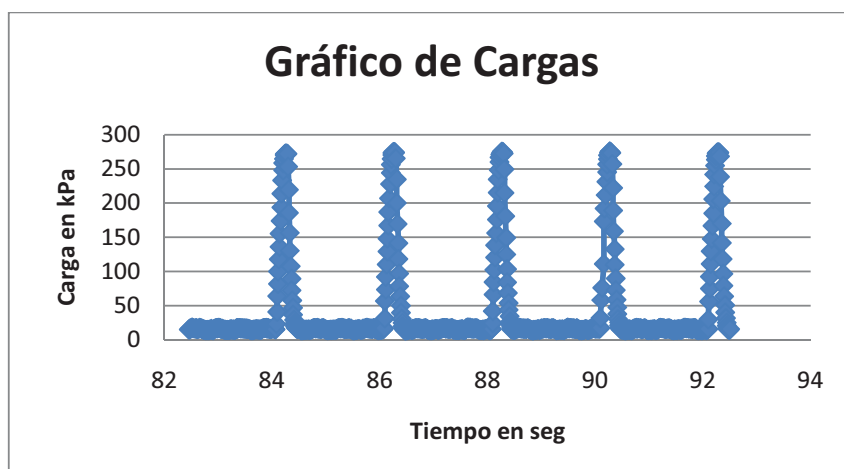
Secuencia 15. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa).

Gráfico de Cargas contra tiempo; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa.

A.3.2. GRAFICOS DE CARGA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA

Secuencia 1. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa).

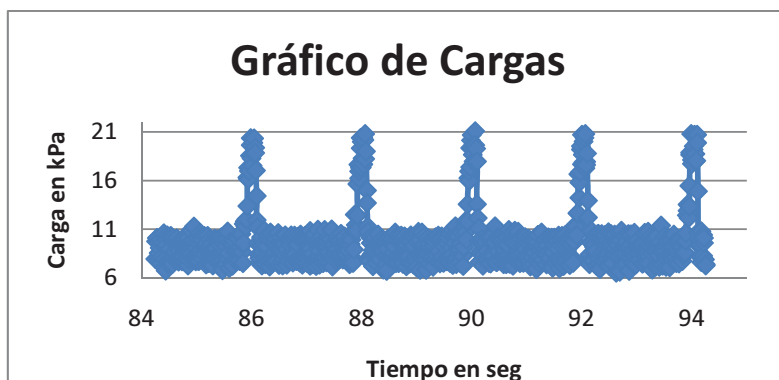


Gráfico de carga; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa

Secuencia 2. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa).

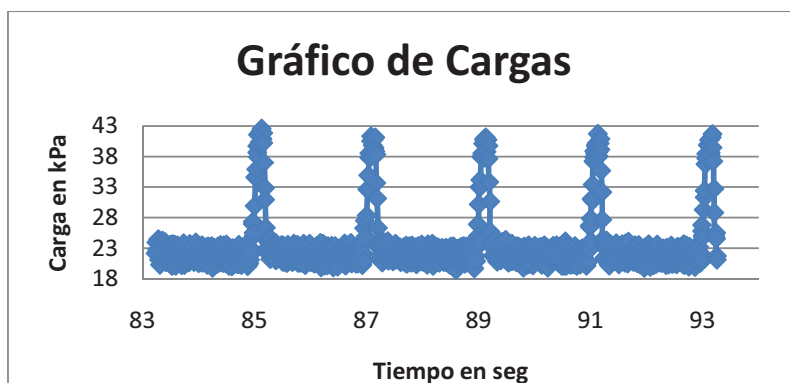


Gráfico de carga; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa

Secuencia 3. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa).

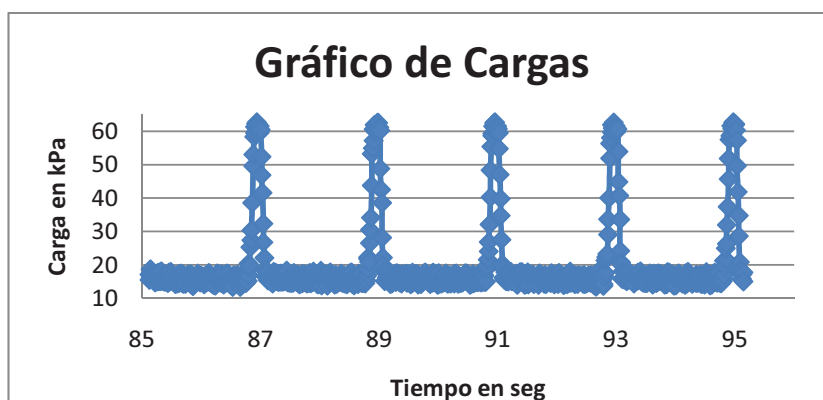


Gráfico de carga; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa

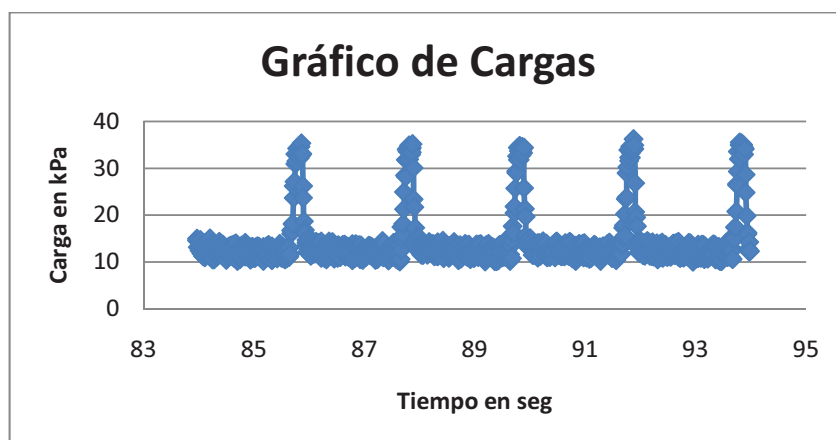
Secuencia 4. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa

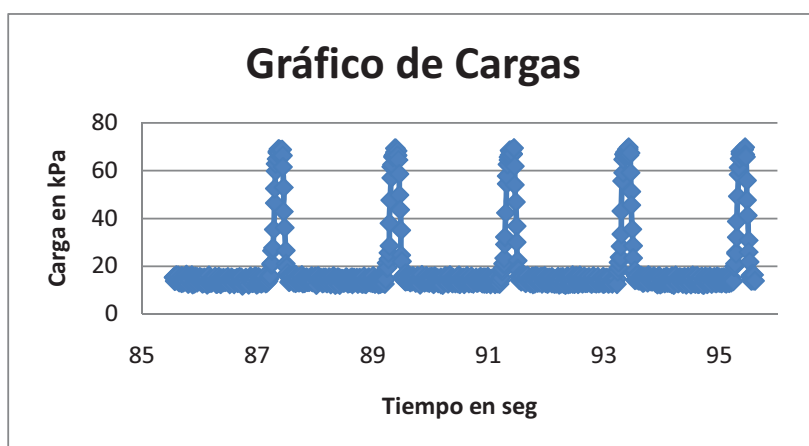
Secuencia 5. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

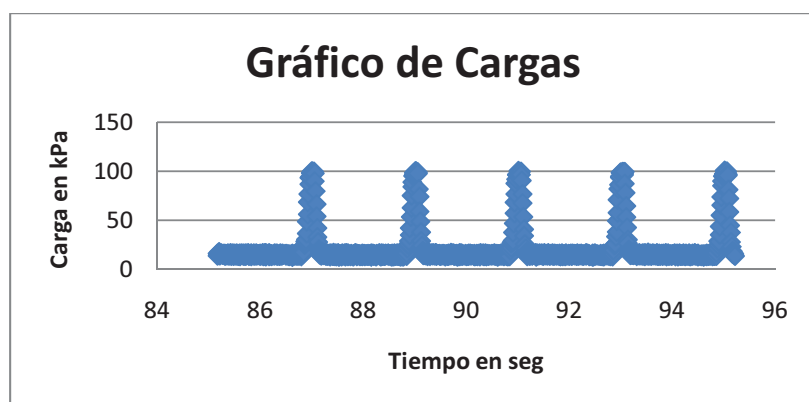
Secuencia 6. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

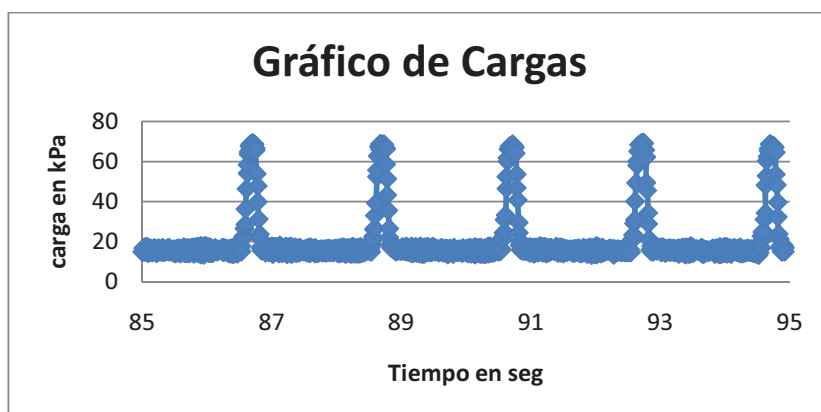
Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

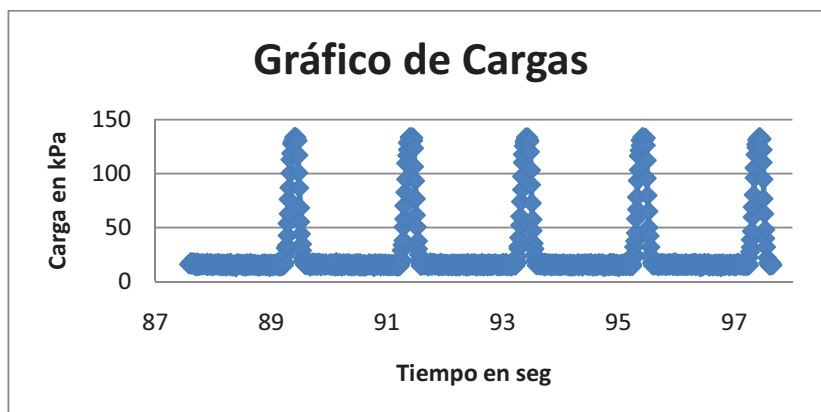
Secuencia 8. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa)

Gráfico de carga; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

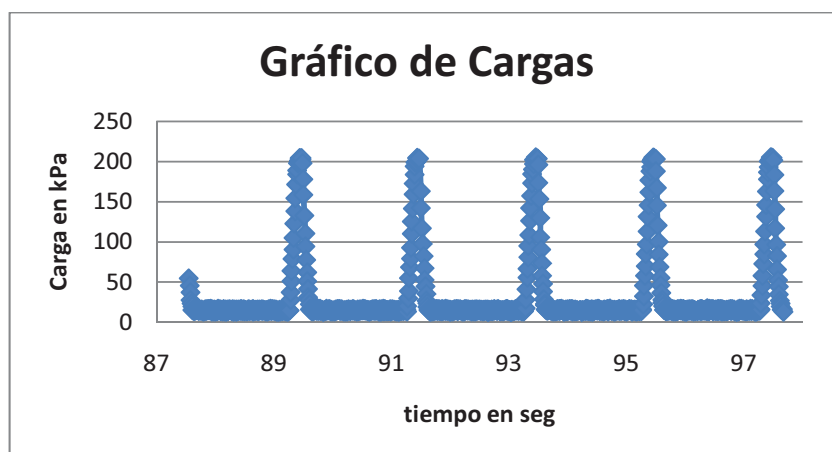
Secuencia 9. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa

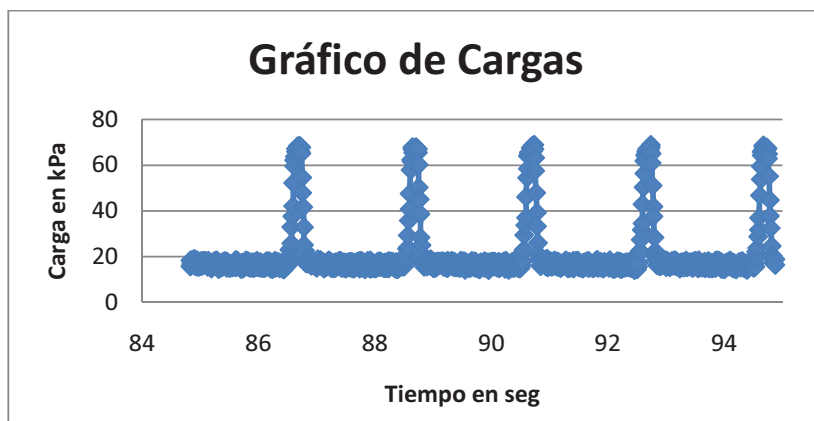
Secuencia 10. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

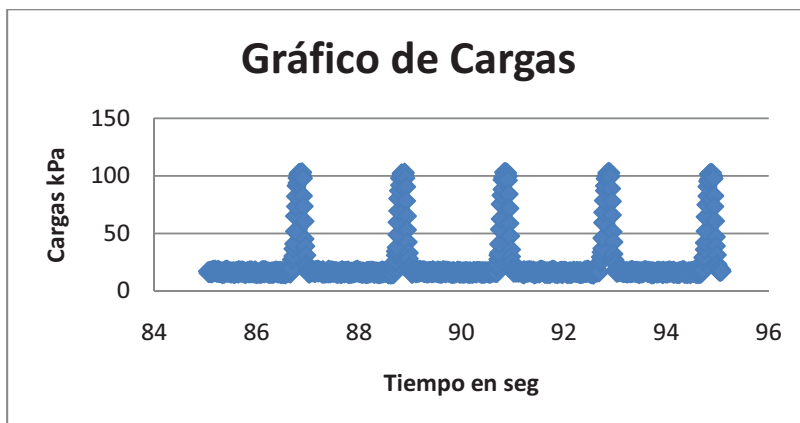
Secuencia 11. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

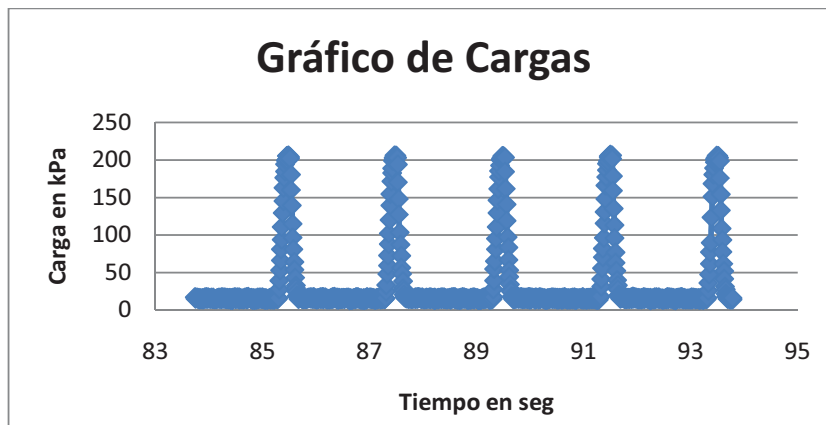
Secuencia 12. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa

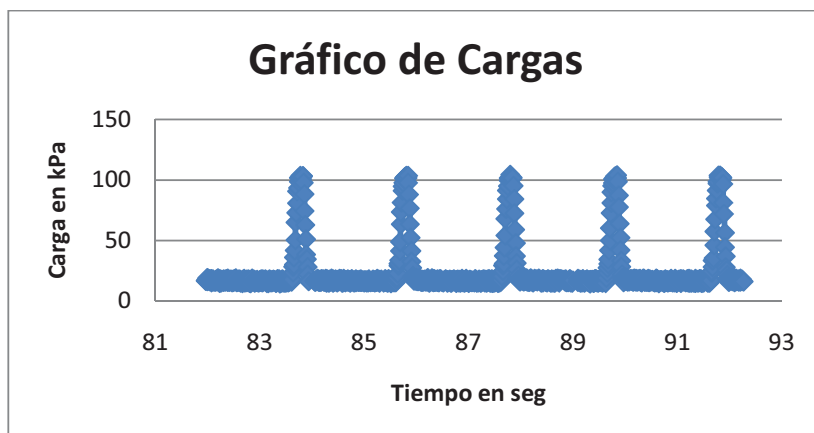
Secuencia 13. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

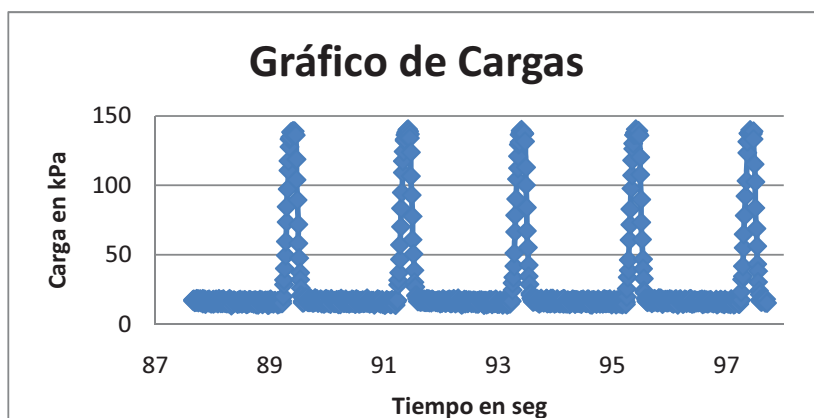
Secuencia 14. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

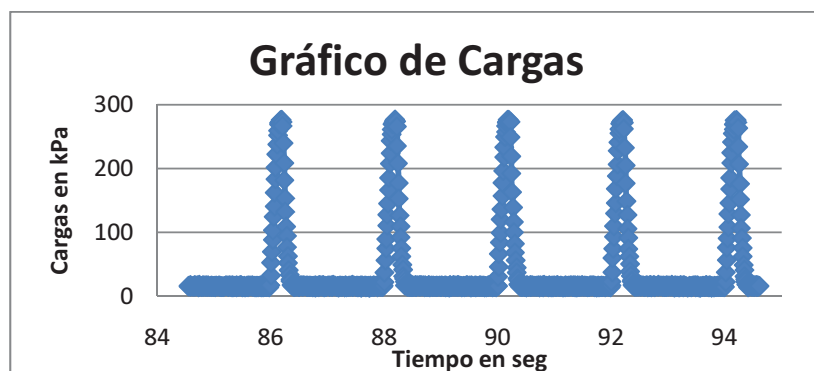
Secuencia 15. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa

A.3.3. GRAFICOS DE CARGA GRANULOMETRIA UNIFORME 100% DE HUMEDAD RELATIVA

Secuencia 1. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa).

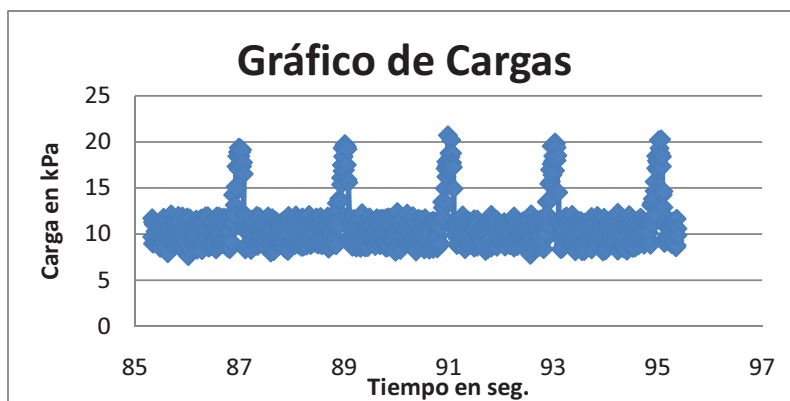


Gráfico de carga; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa

Secuencia 2. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa).

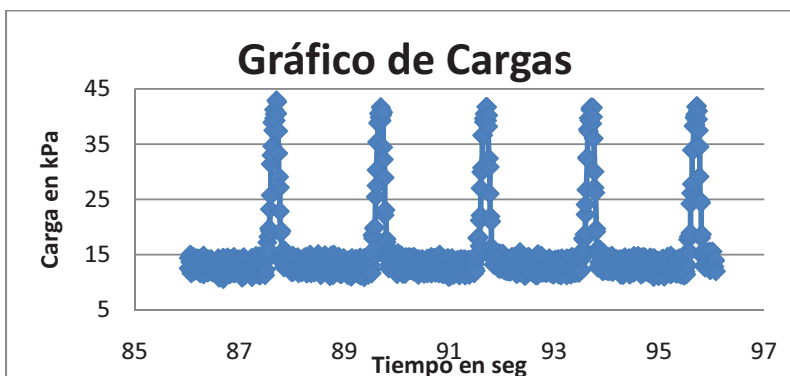


Gráfico de carga; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa

Secuencia 3. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa).

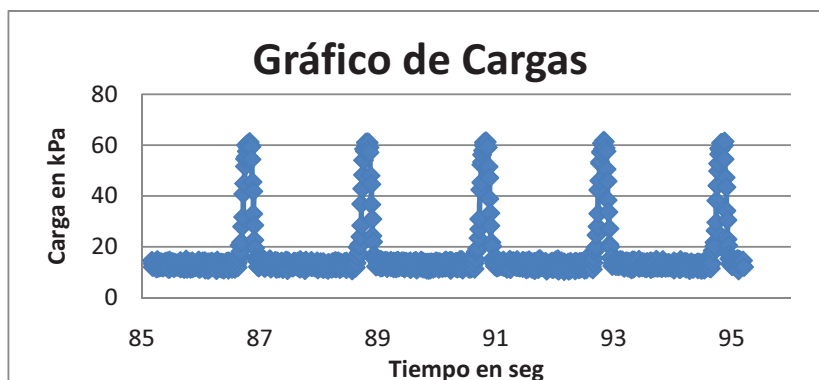


Gráfico de carga; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa

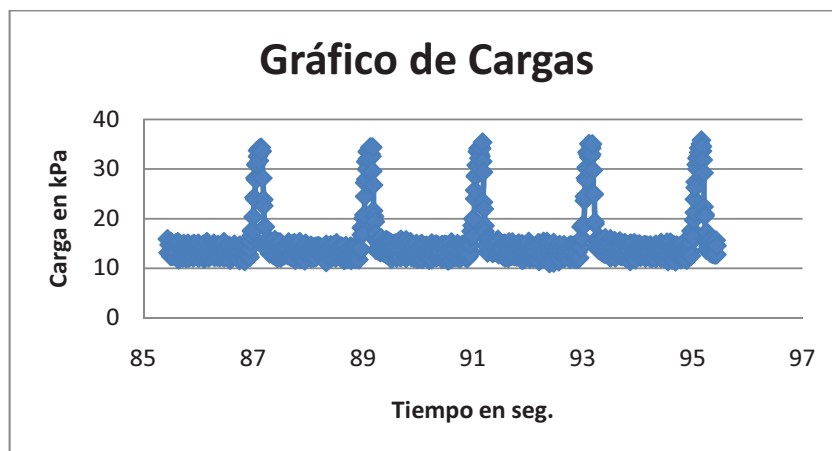
Secuencia 4. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa

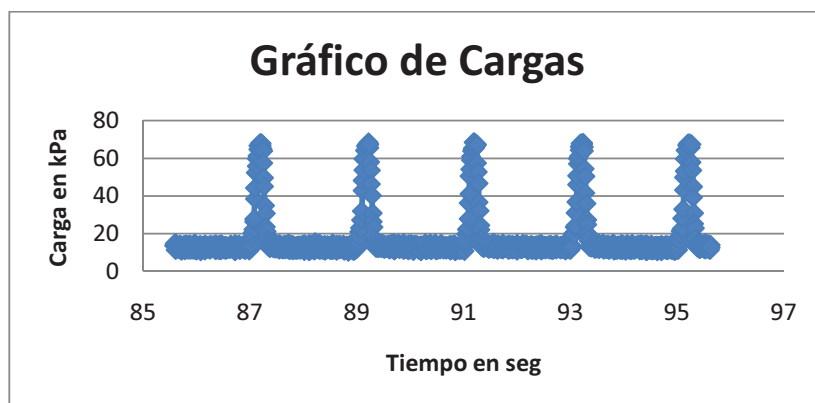
Secuencia 5. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

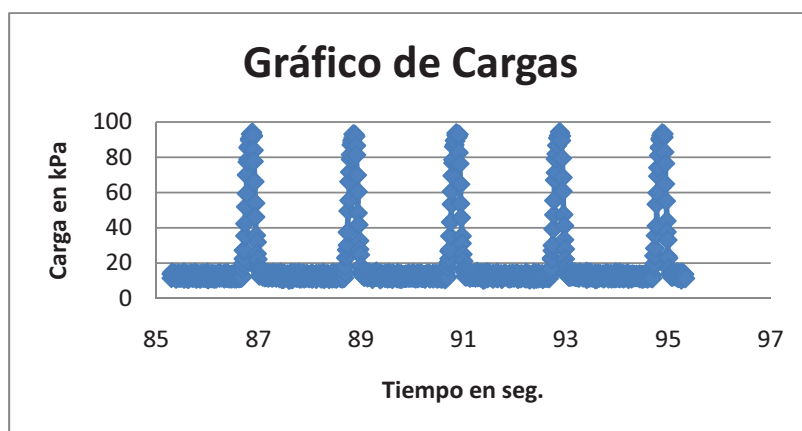
Secuencia 6. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

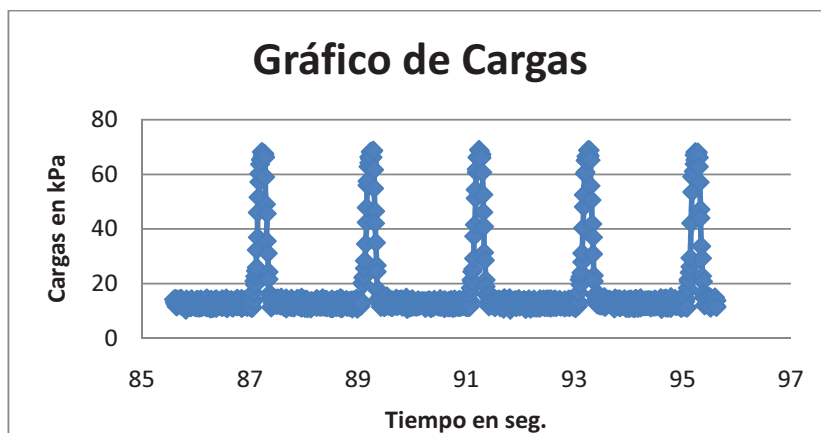
Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

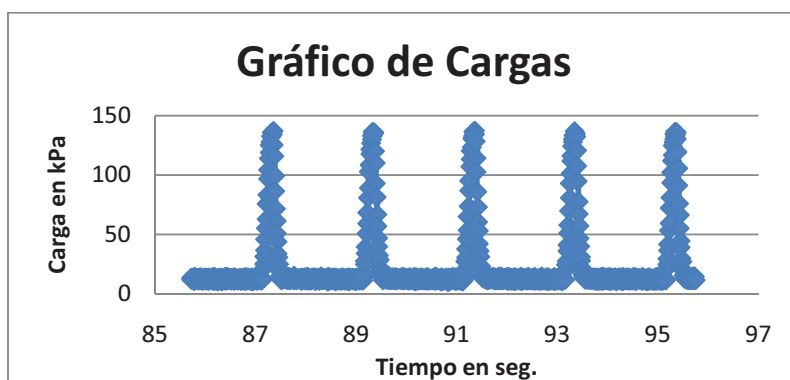
Secuencia 8. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa)

Gráfico de carga; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

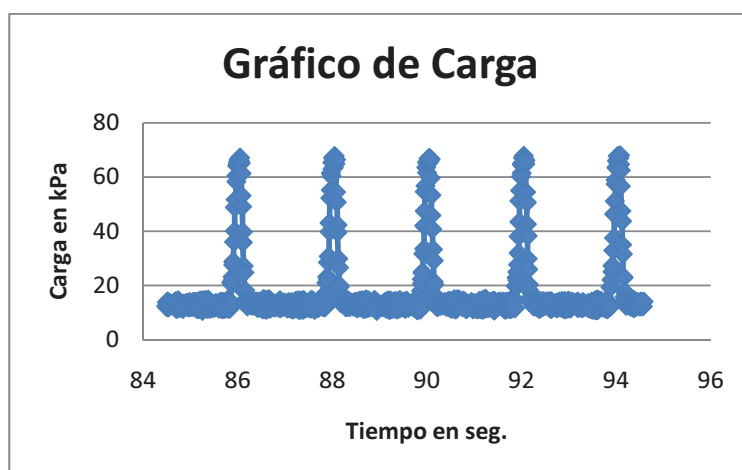
Secuencia 10. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

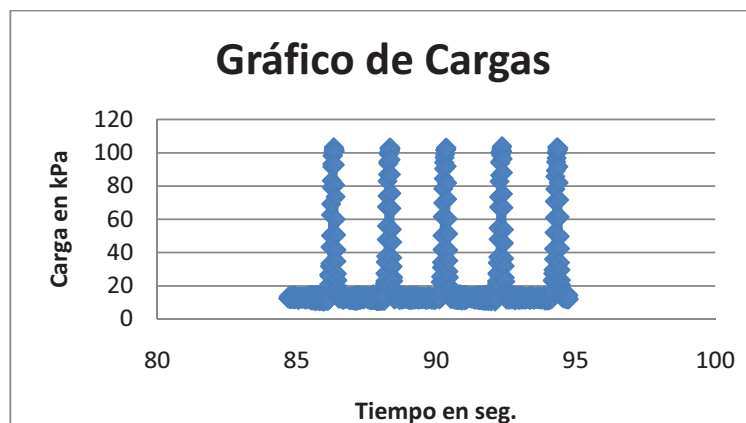
Secuencia 11. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

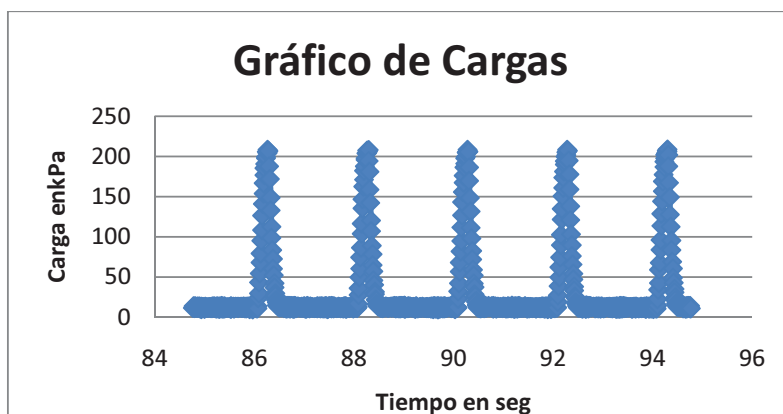
Secuencia 12. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa

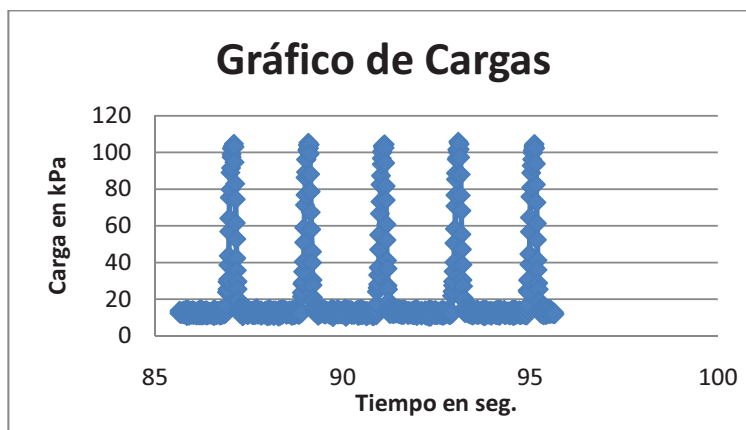
Secuencia 13. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

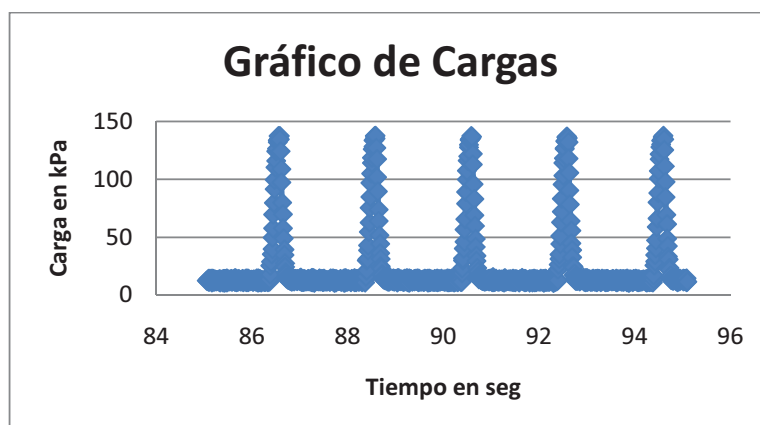
Secuencia 14. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

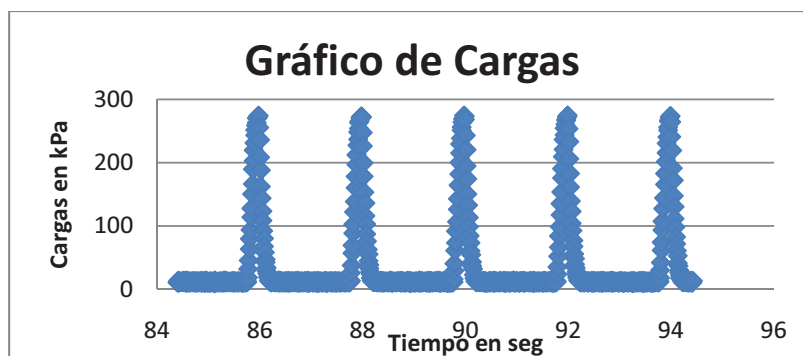
Secuencia 15. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa

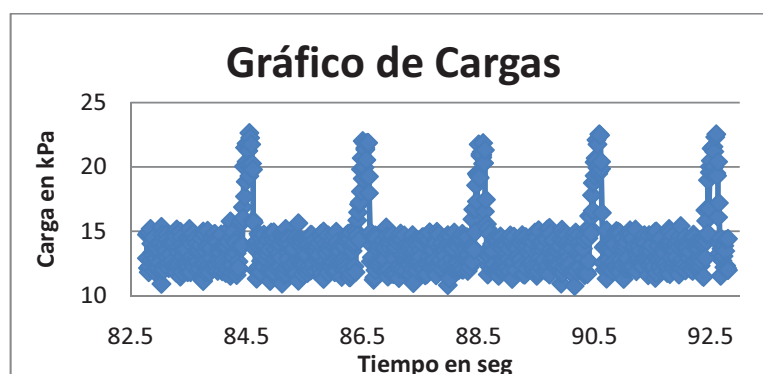
A.3.4. GRAFICOS DE CARGA GRANULOMETRIA UNIFORME AL 50% DE HUMEDAD RELATIVA***Secuencia 1. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa).***

Gráfico de carga; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa

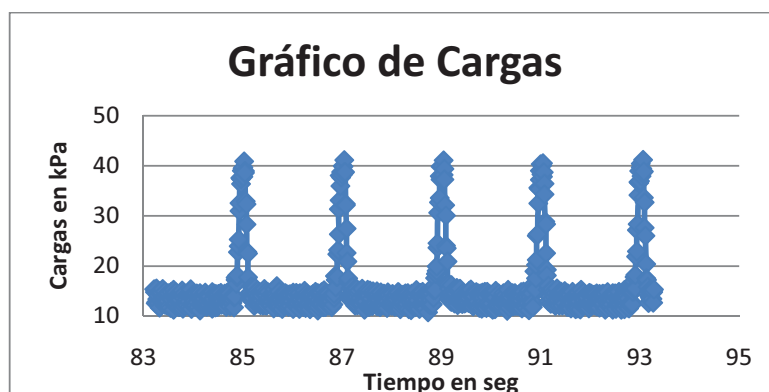
Secuencia 2. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa

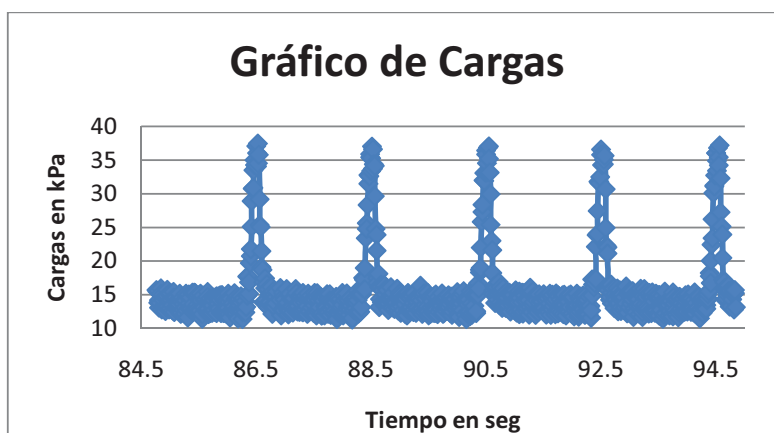
Secuencia 4. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa

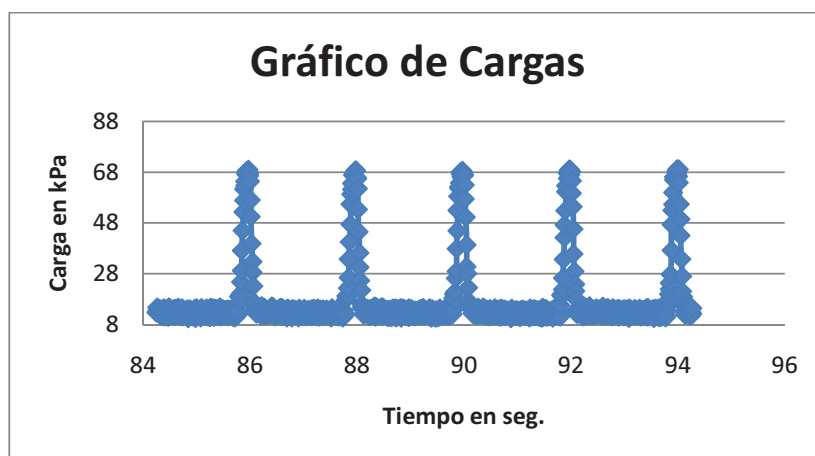
Secuencia 5. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

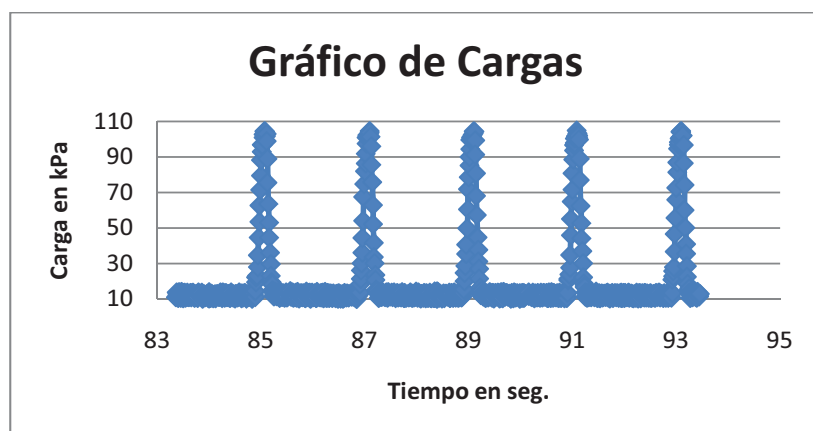
Secuencia 6. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

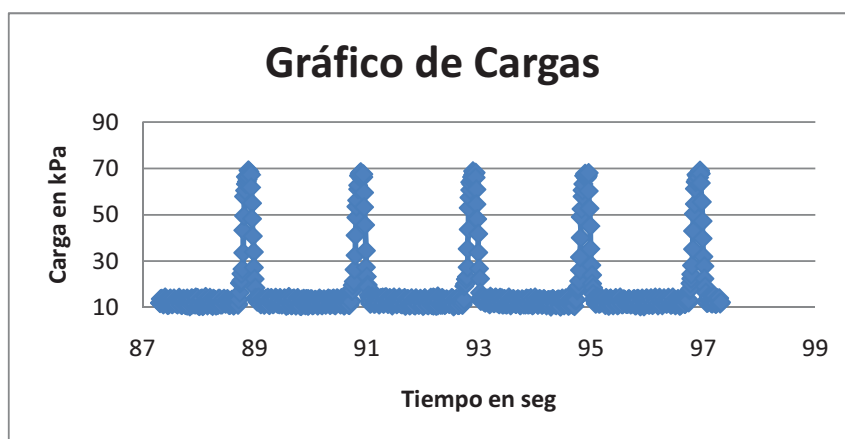
Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

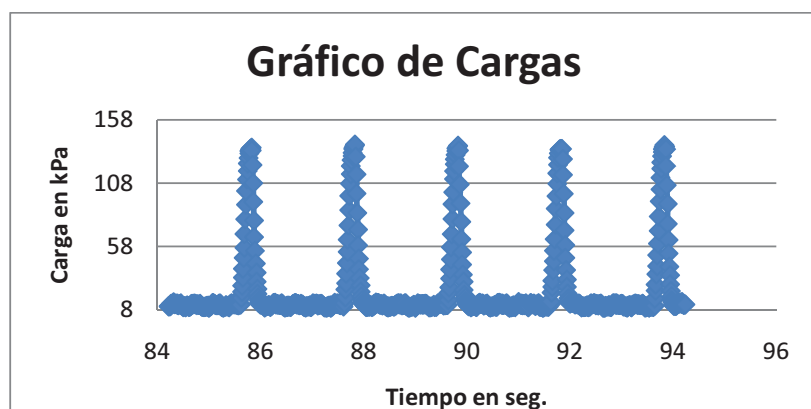
Secuencia 8. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa)

Gráfico de carga; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

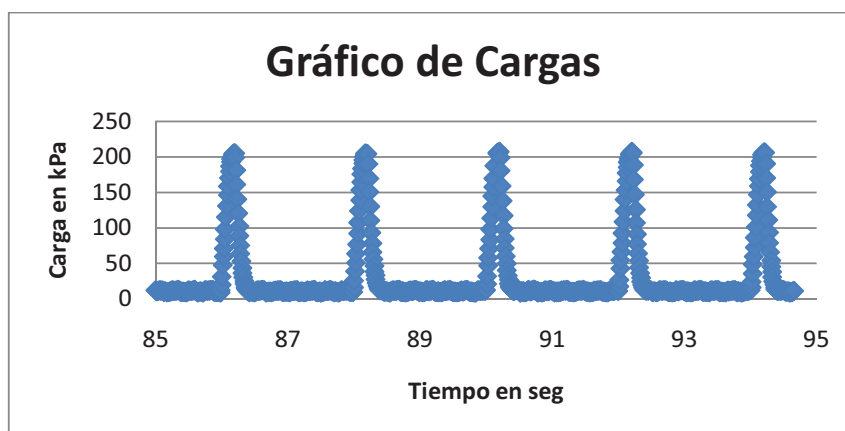
Secuencia 9. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa

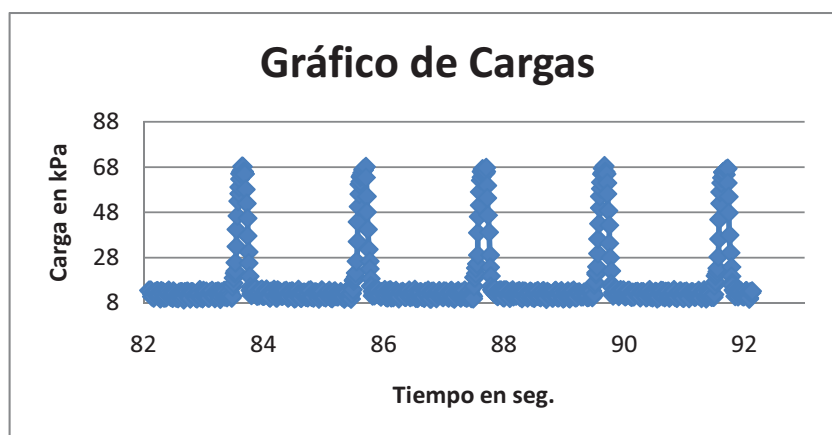
Secuencia 10. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

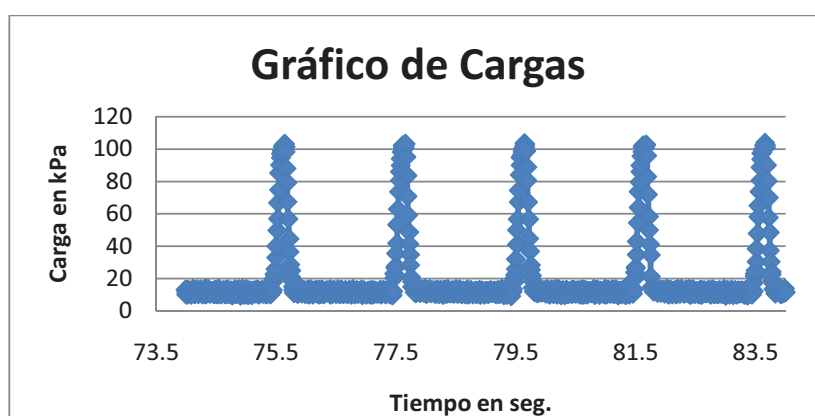
Secuencia 11. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

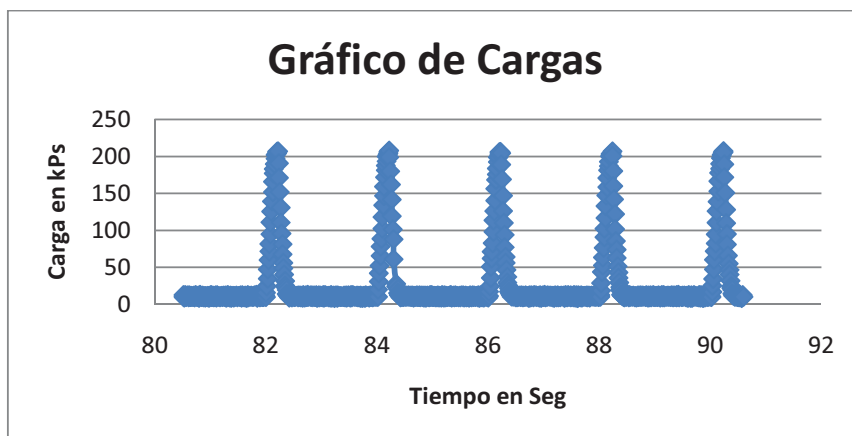
Secuencia 12. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa

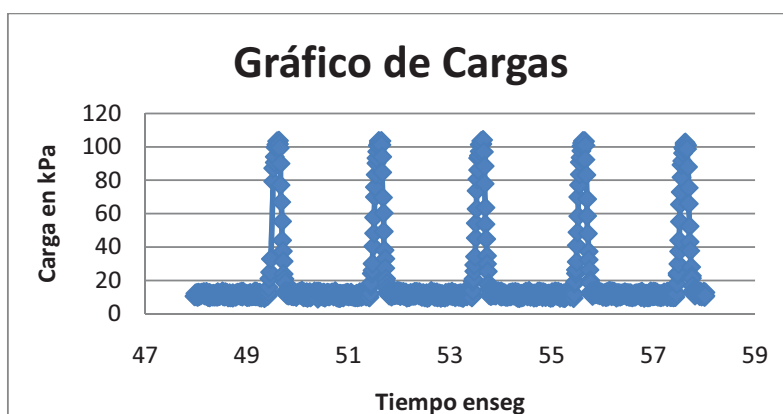
Secuencia 13. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

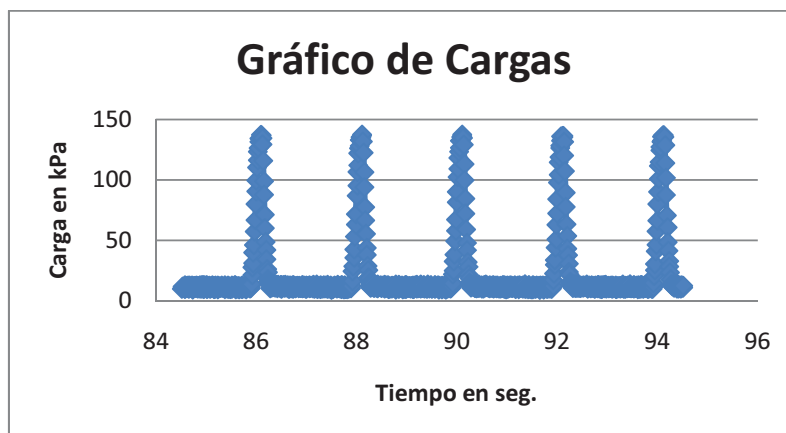
Secuencia 14. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

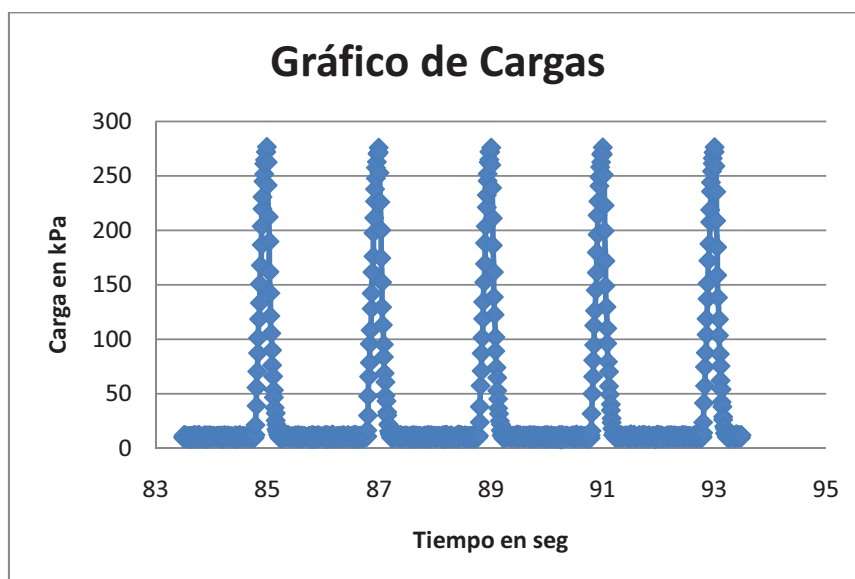
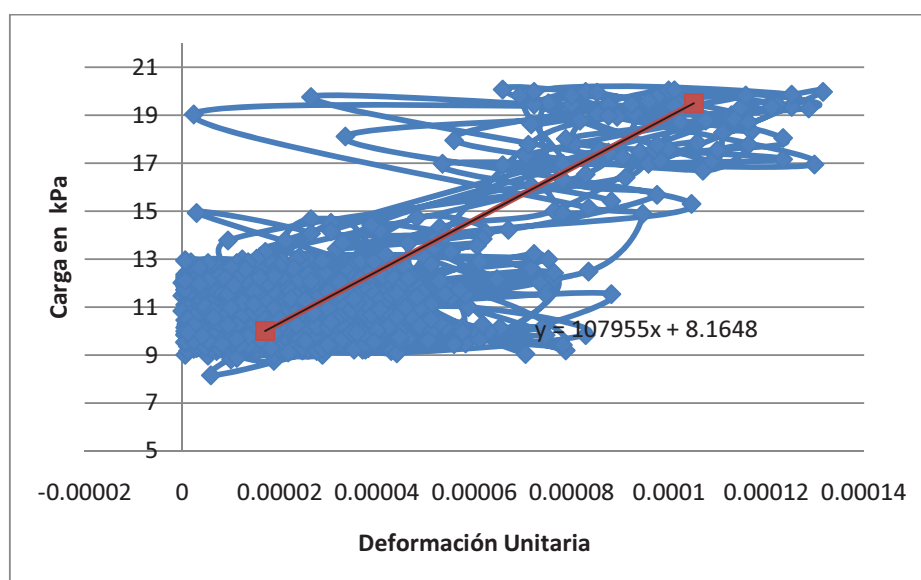
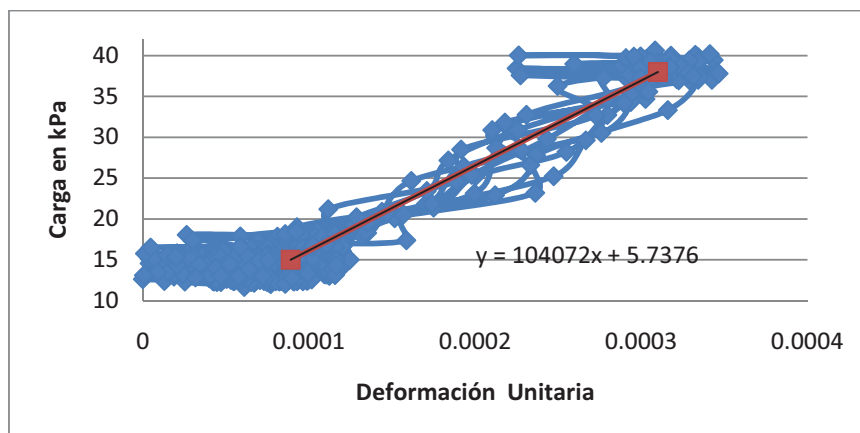
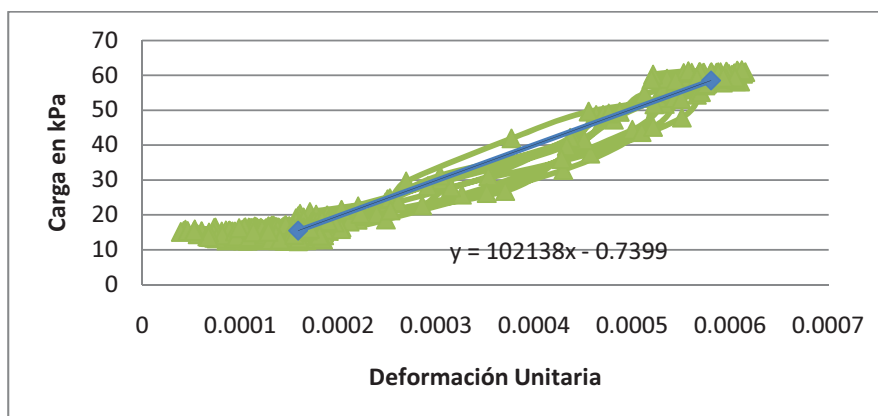
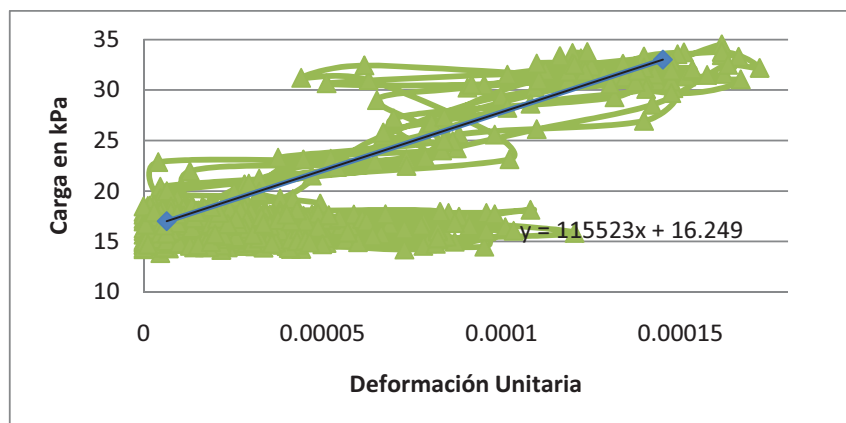
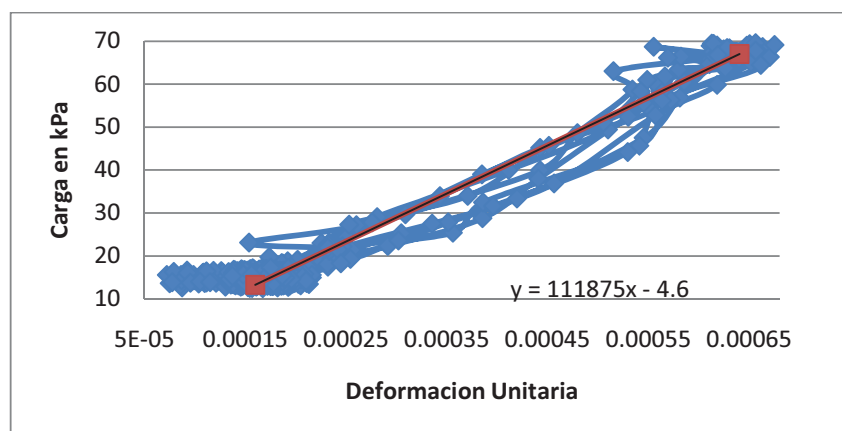
Secuencia 15. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa).

Gráfico de carga; Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa

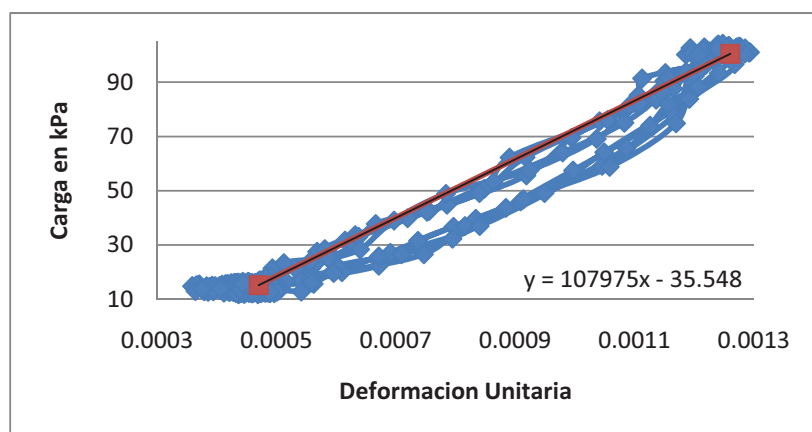
A.4. GRAFICOS DE MODULO DE RESILIENCIA**A.4.1. GRAFICO DE MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA CON 100% DE HUMEDAD RELATIVA*****Secuencia 1. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa).***

Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa

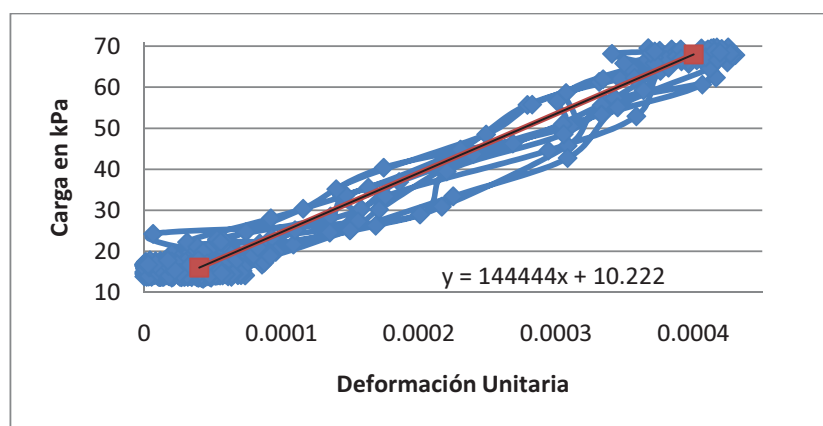
Secuencia 2. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa).**Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa*****Secuencia 3. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa).*****Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa*****Secuencia 4. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa).*****Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa**

Secuencia 5. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

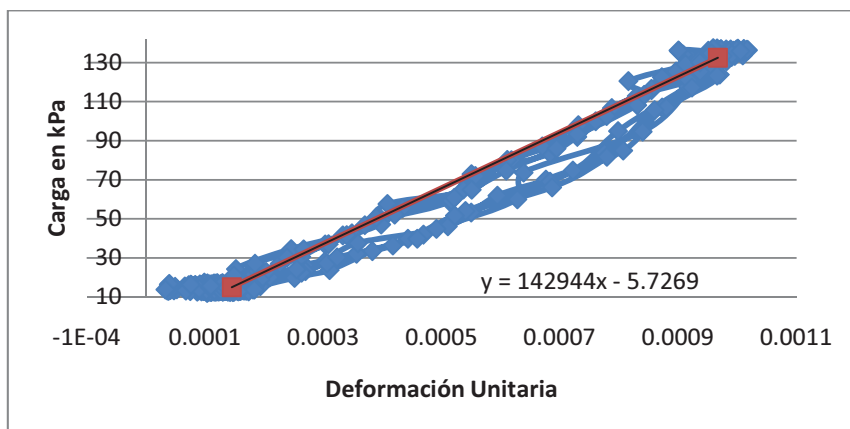
Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 6. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

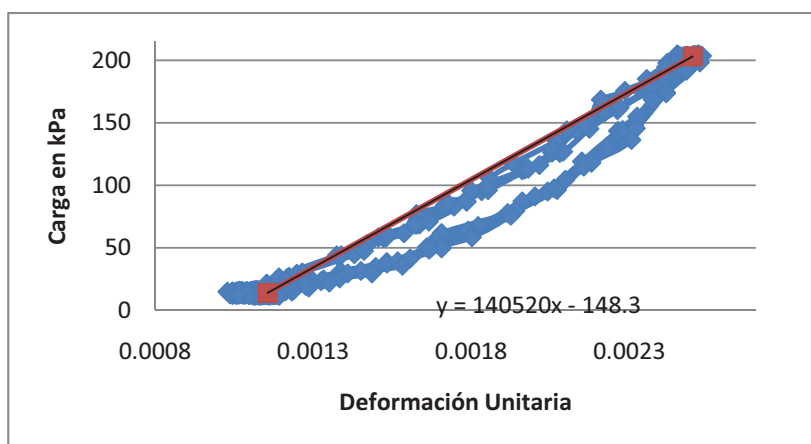
Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

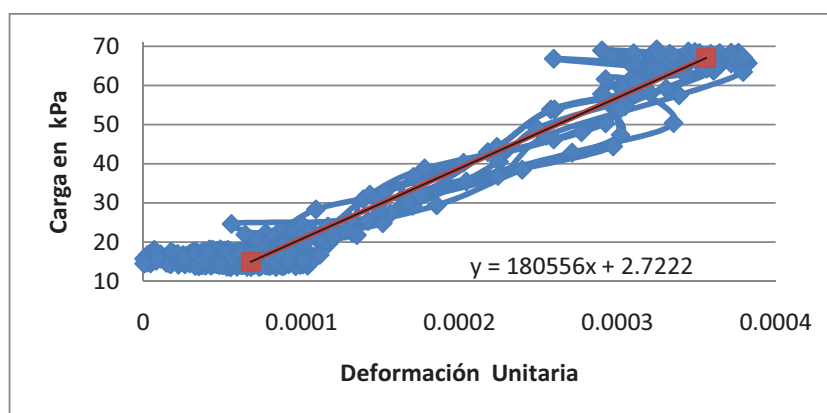
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 8. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

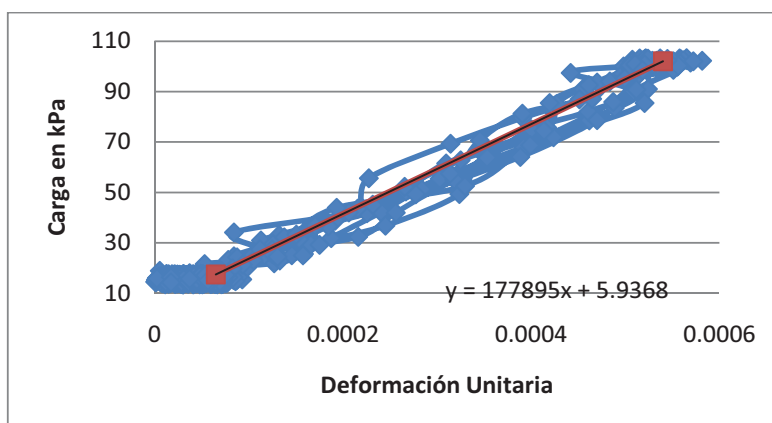
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 9. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa).

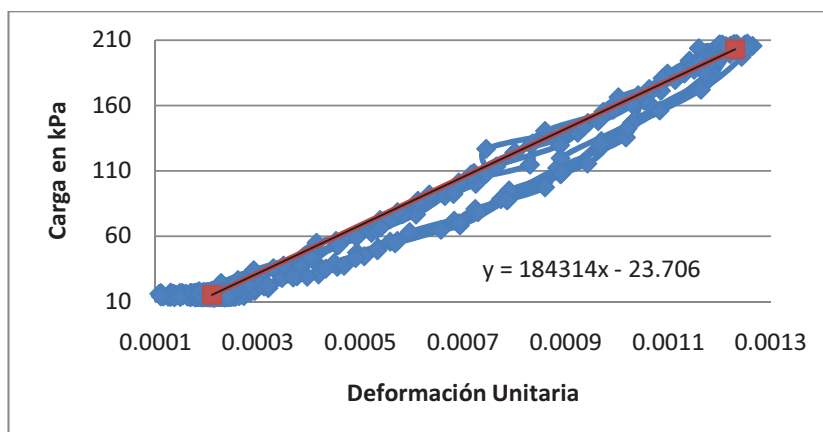
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa

Secuencia 10. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

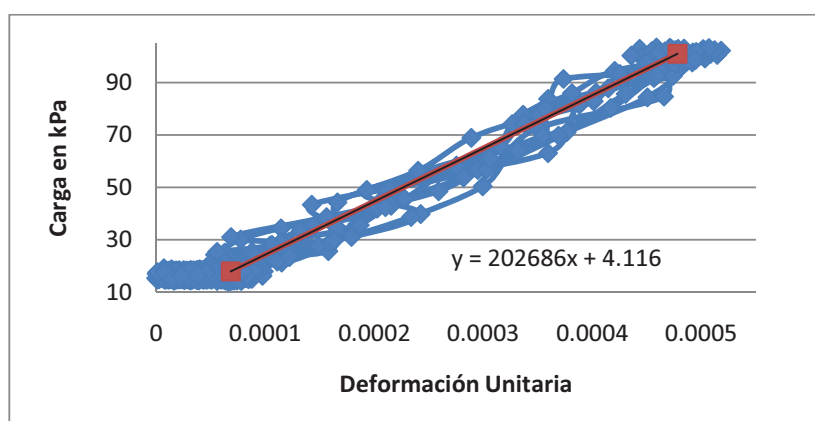
Módulo de resiliencia Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 11. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

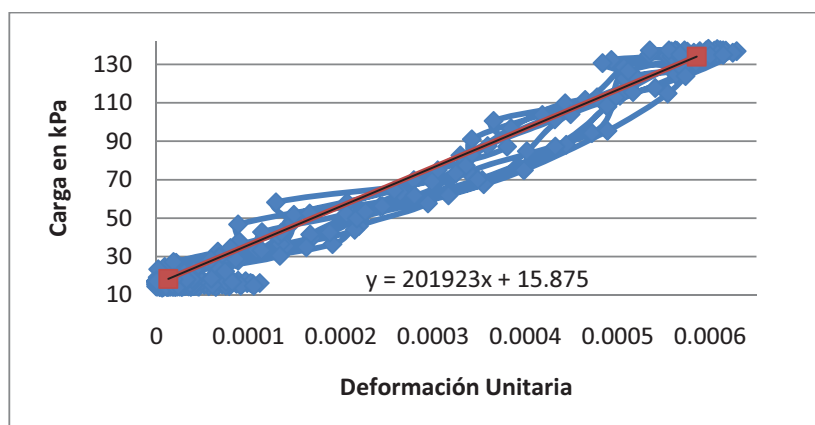
Módulo de resiliencia; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

Secuencia 12. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa).

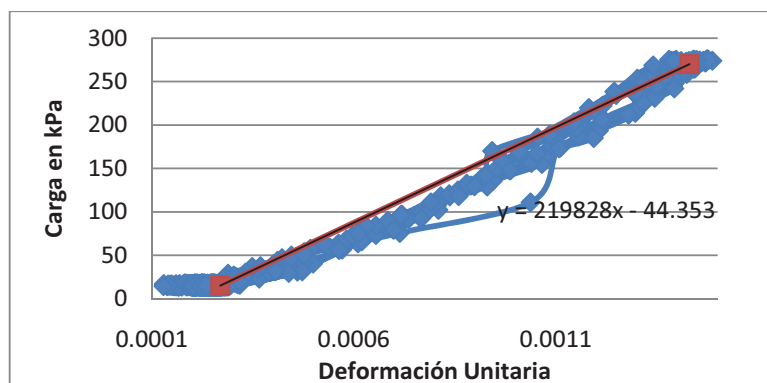
Módulo de resiliencia Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa

Secuencia 13. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

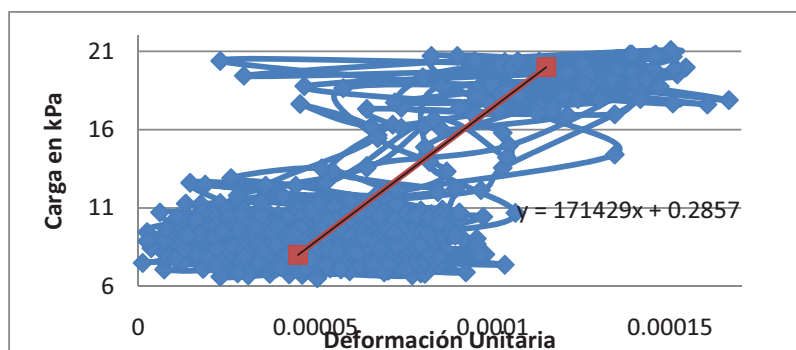
Secuencia 14. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

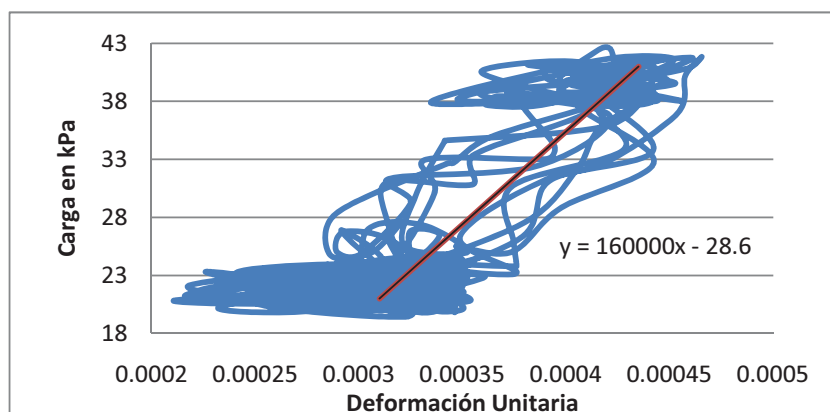
Secuencia 15. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa

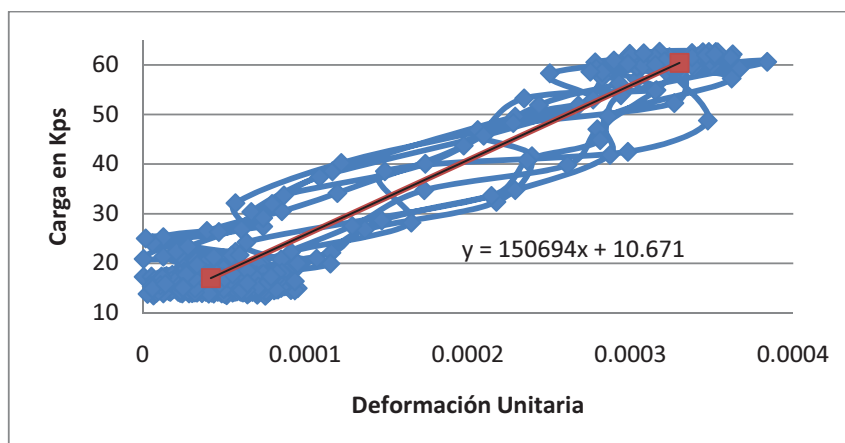
A.4.2. GRAFICOS DE MODULO DE RESILIENCIA EN GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA 50% DE HUMEDAD RELATIVA

Secuencia 1. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa).

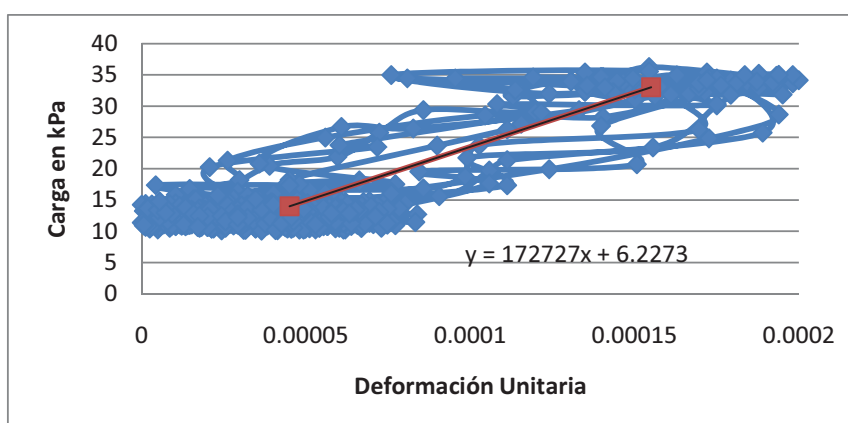
Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa

Secuencia 2. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa).

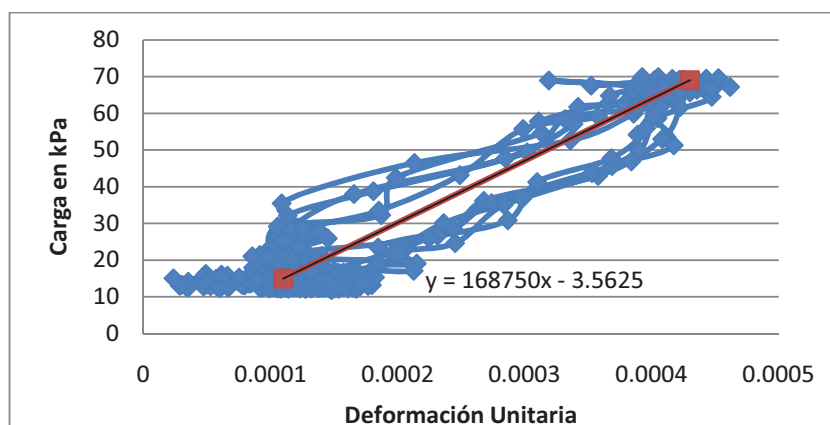
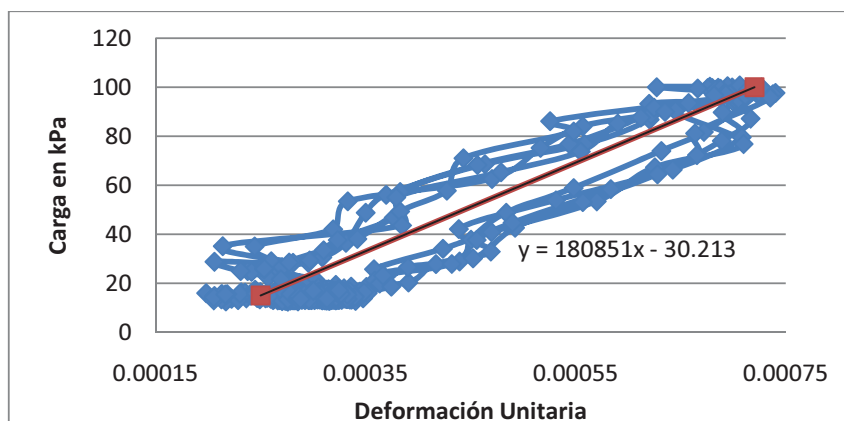
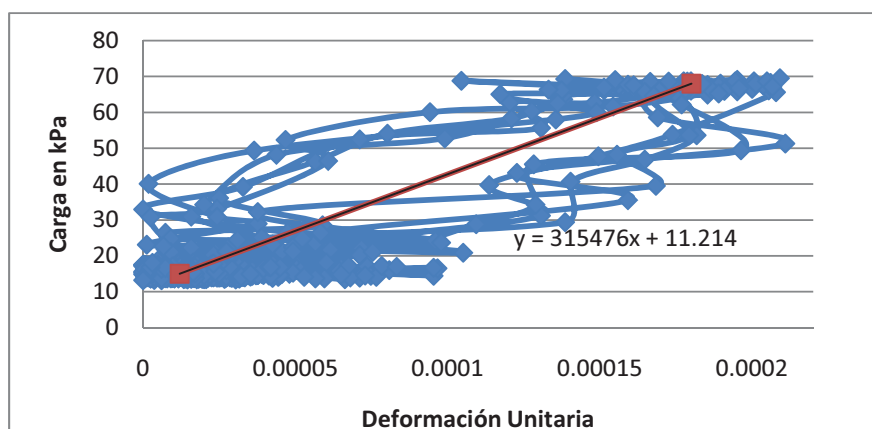
Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa

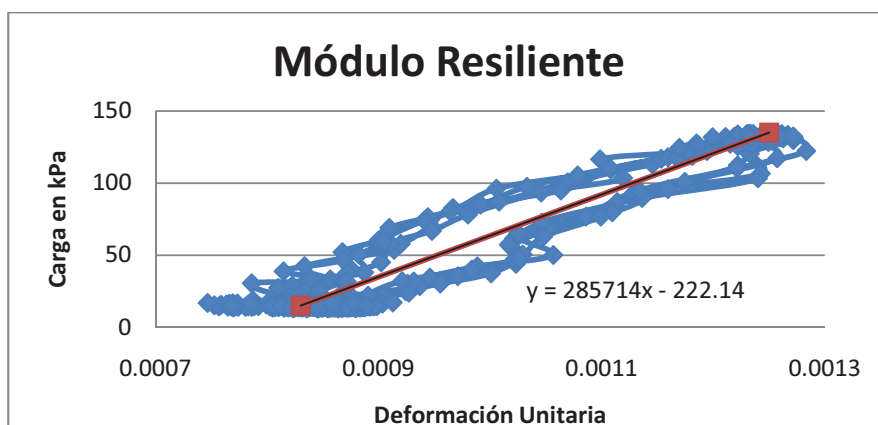
Secuencia 3. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa

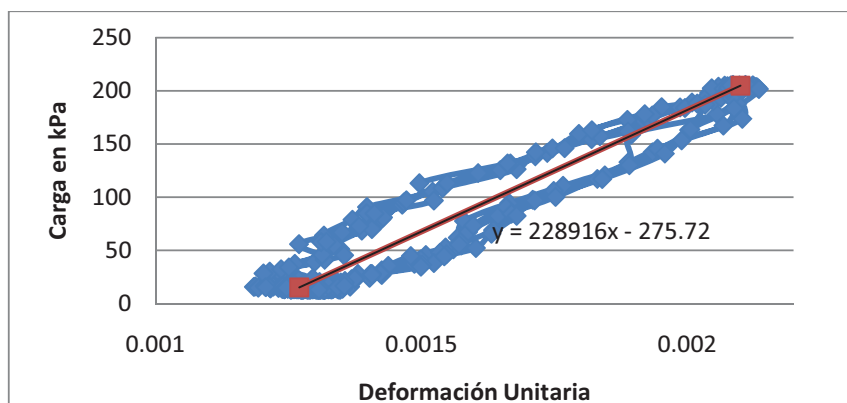
Secuencia 4. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa

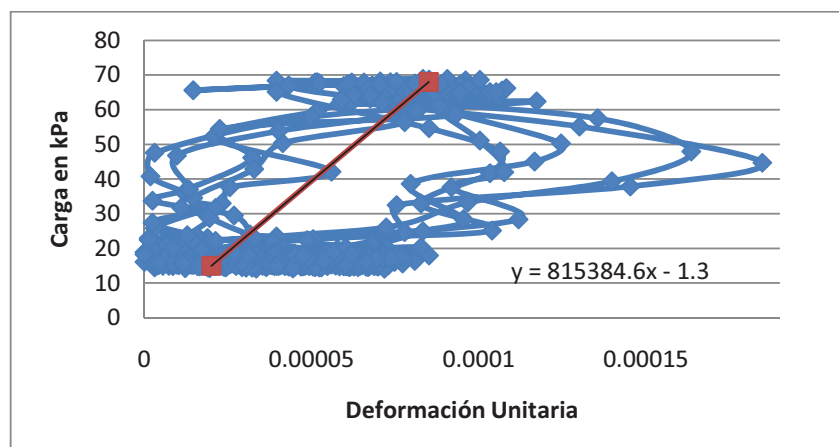
Secuencia 5. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).**Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa*****Secuencia 6. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).*****Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa*****Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).*****Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa**

Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

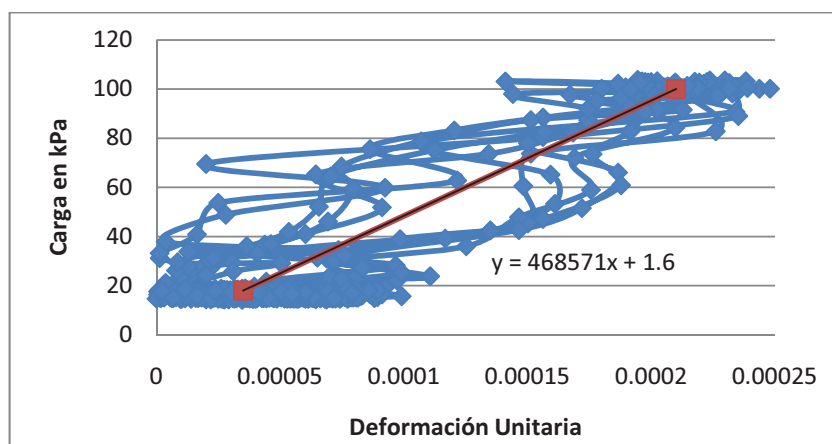
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

Secuencia 9. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa).

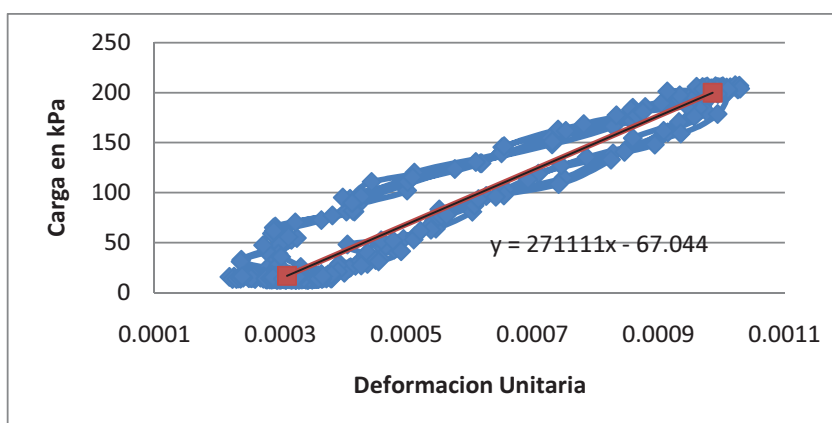
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa

Secuencia 10. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

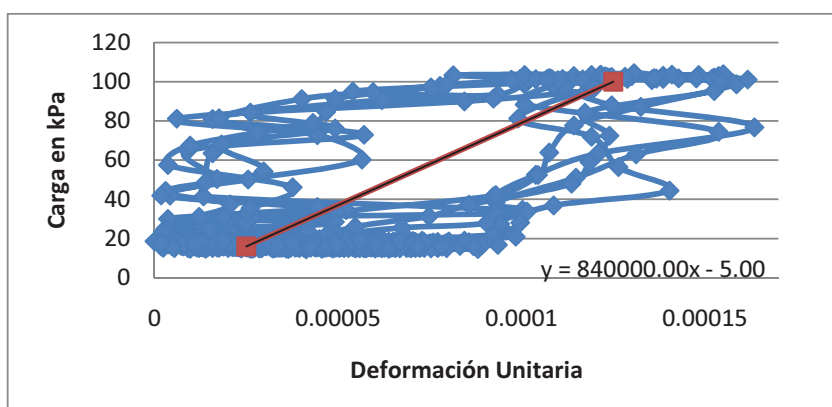
Módulo de resiliencia Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 11. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

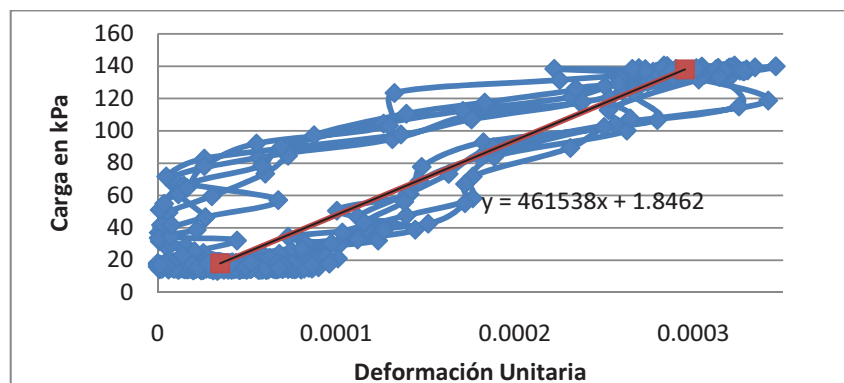
Módulo de resiliencia; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

Secuencia 12. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa).

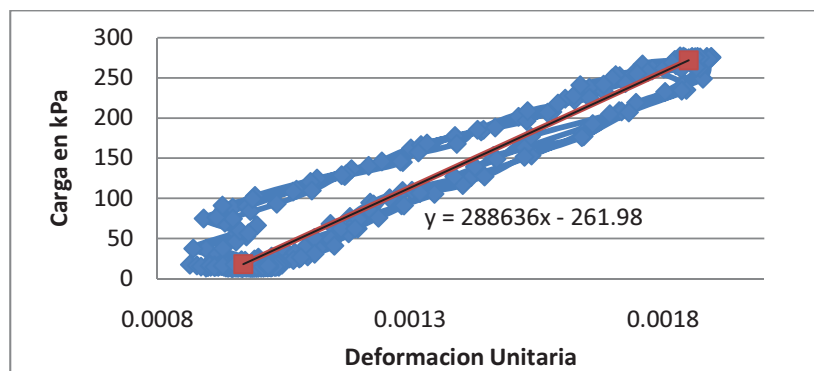
Módulo de resiliencia Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa

Secuencia 13. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

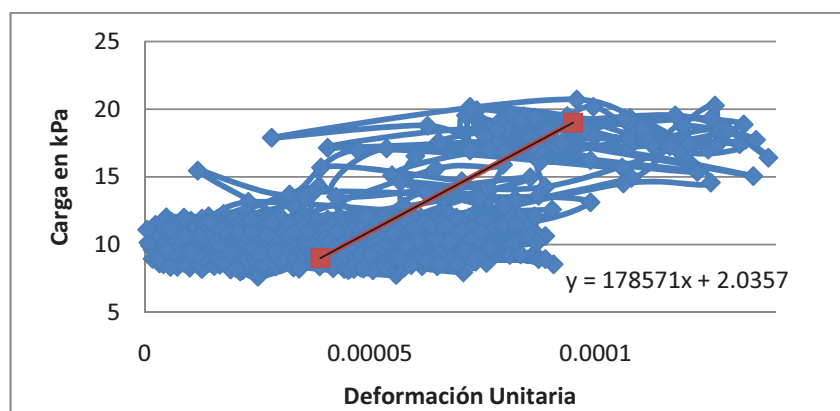
Secuencia 14. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

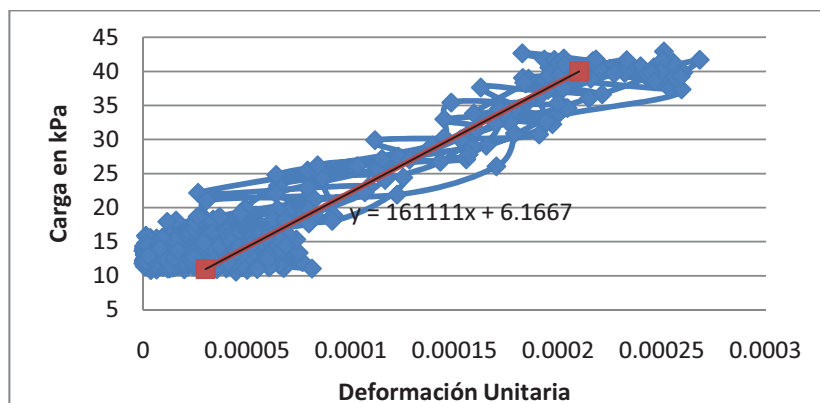
Secuencia 15. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa

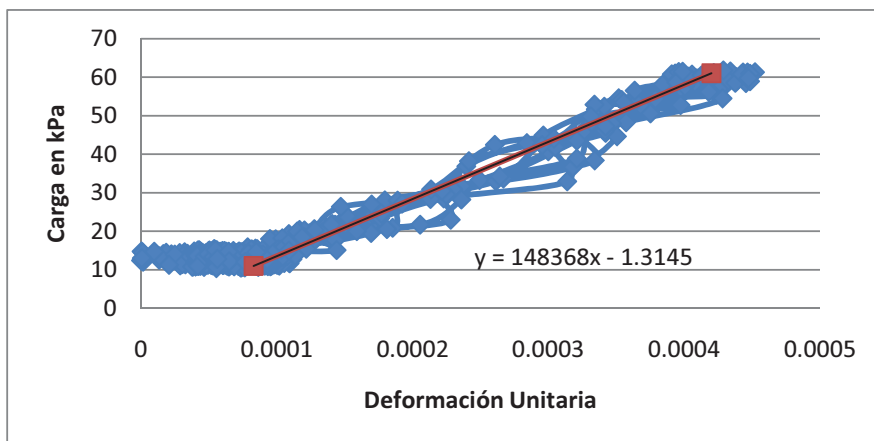
A.4.3. GRAFICOS DE MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA UNIFORME 100% DE HUMEDAD RELATIVA

Secuencia 1. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa).

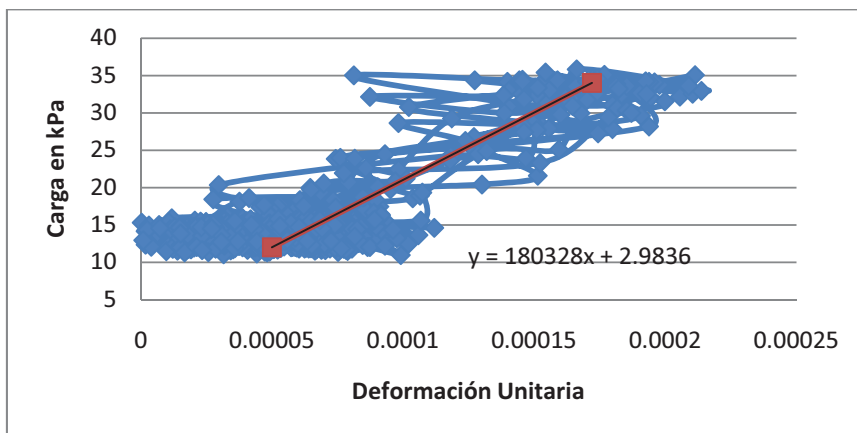
Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa

Secuencia 2. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa).

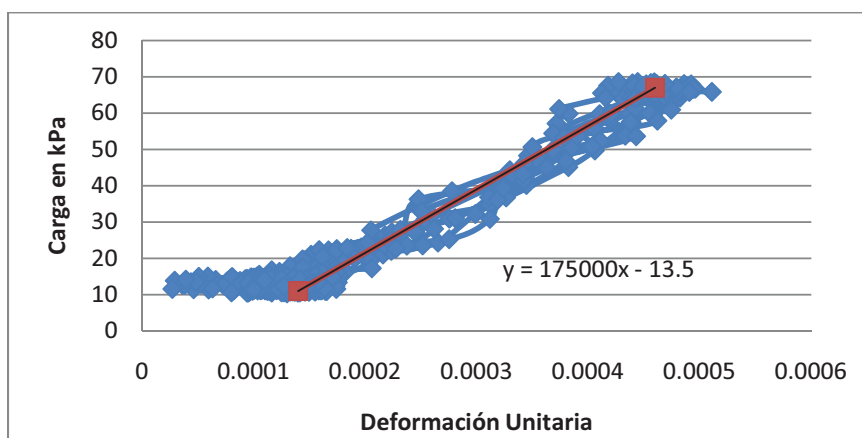
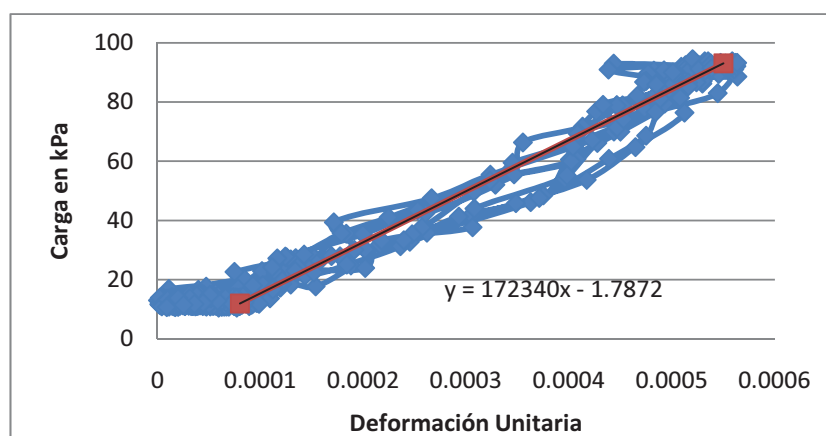
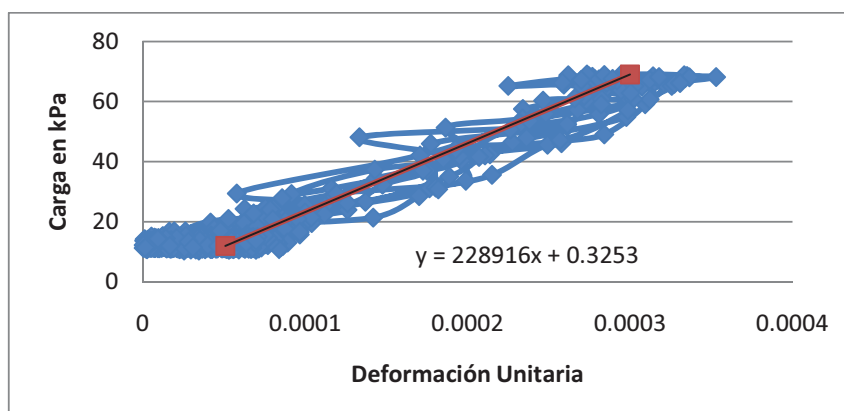
Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa

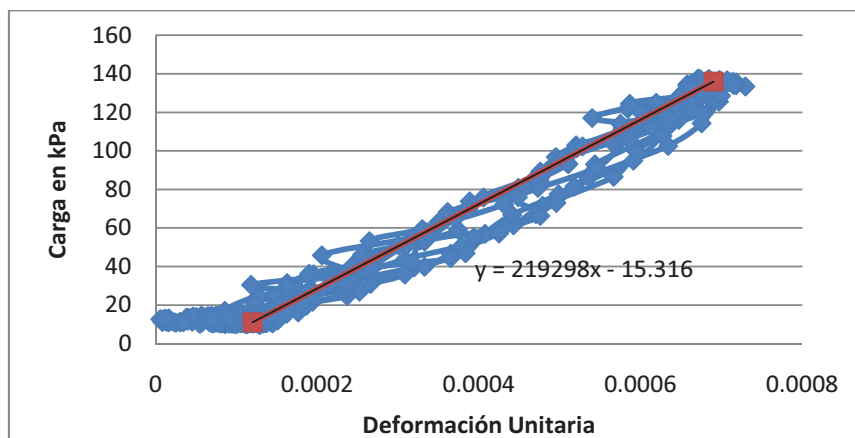
Secuencia 3. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 62.1 kPa

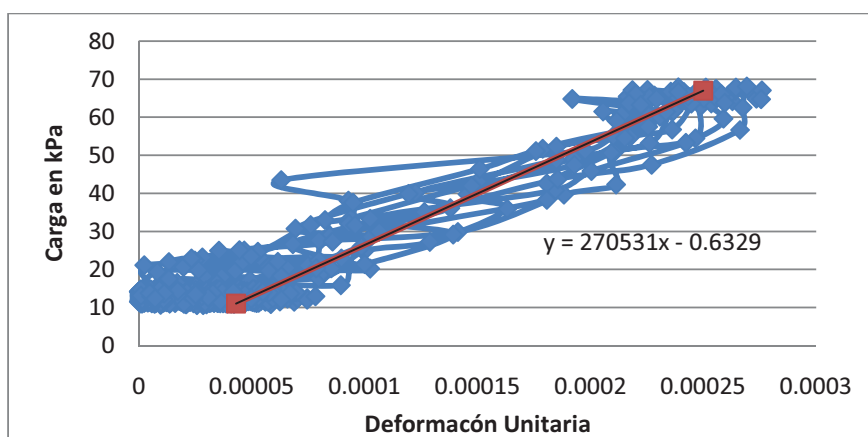
Secuencia 4. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa

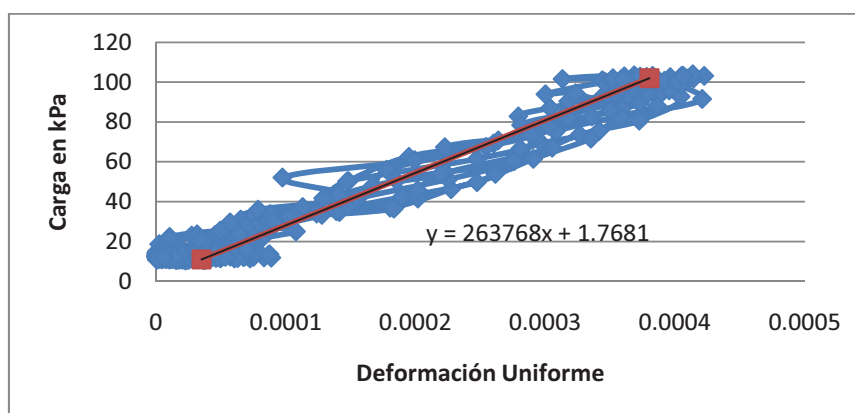
Secuencia 5. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).**Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa*****Secuencia 6. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).*****Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa*****Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).*****Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa**

Secuencia 8. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

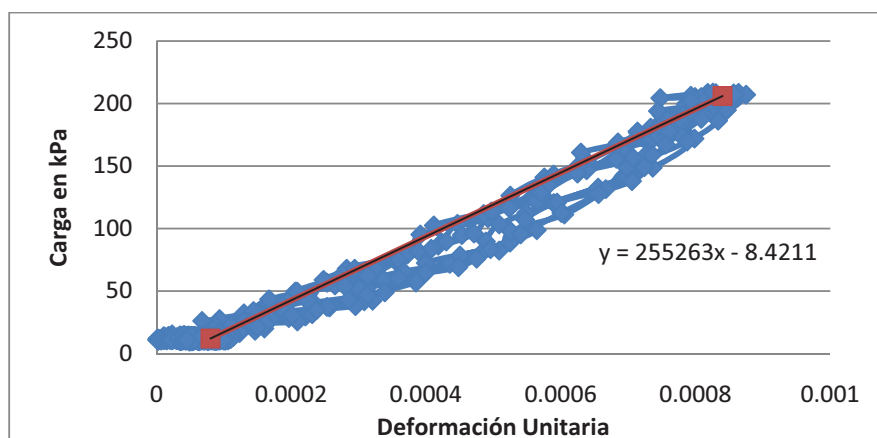
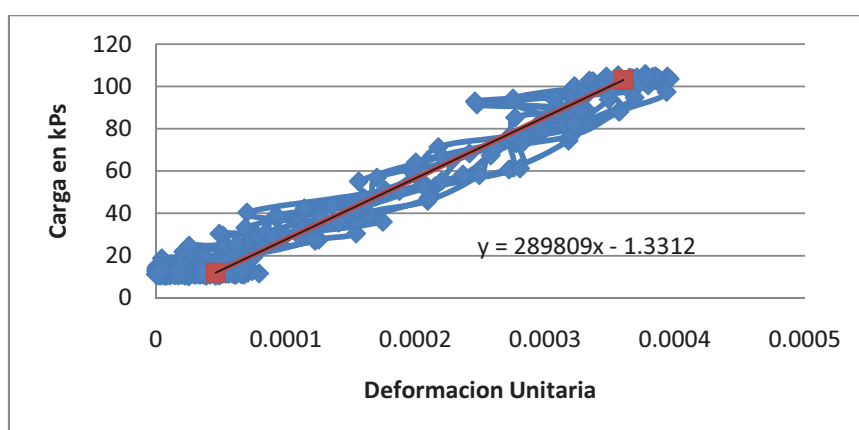
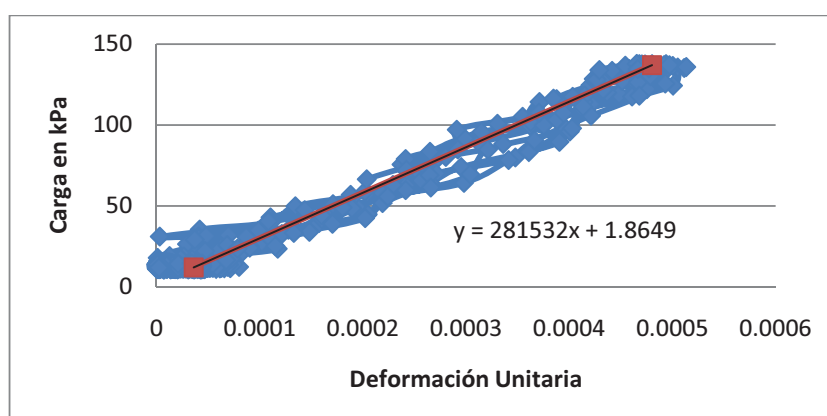
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

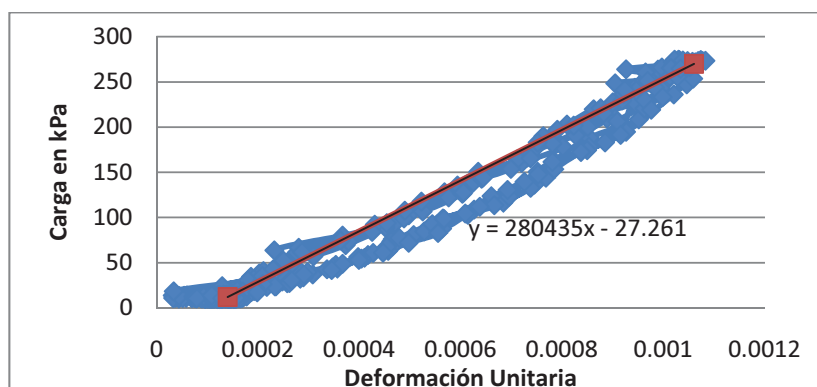
Secuencia 10. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 11. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

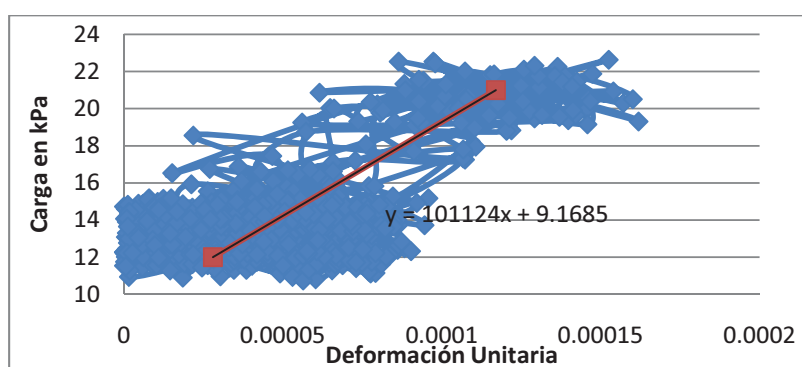
Módulo de resiliencia; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

Secuencia 12. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa).**Módulo de resiliencia Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa*****Secuencia 13. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).*****Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa*****Secuencia 14. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).*****Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa**

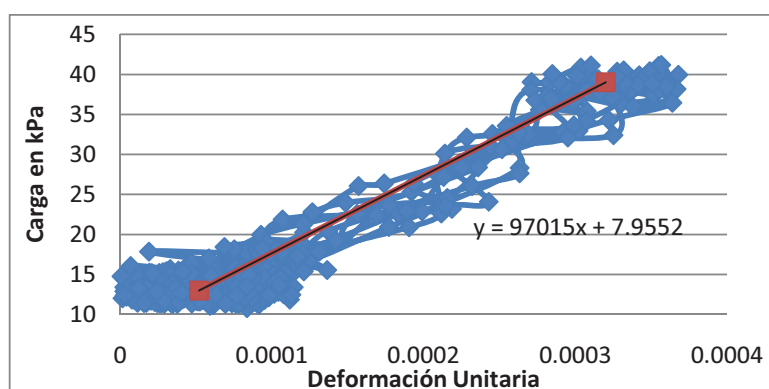
Secuencia 15. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa

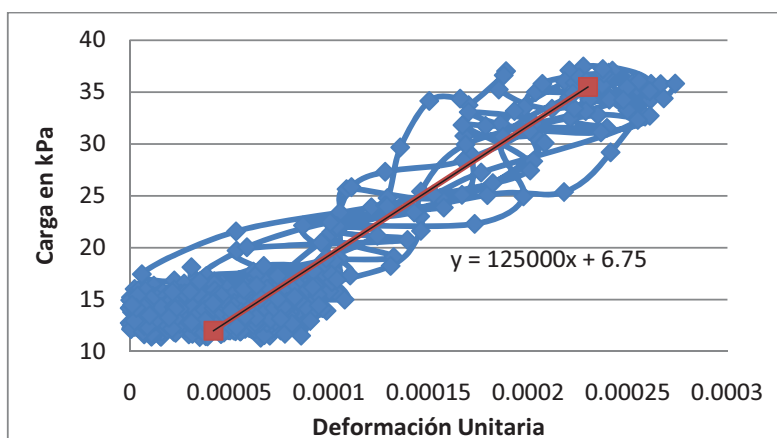
A.4.4. GRAFICOS DE MODULO DE RESILIENCIA GRANULOMETRIA UNIFORME 50% DE HUMEDAD RELATIVA

Secuencia 1. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa).

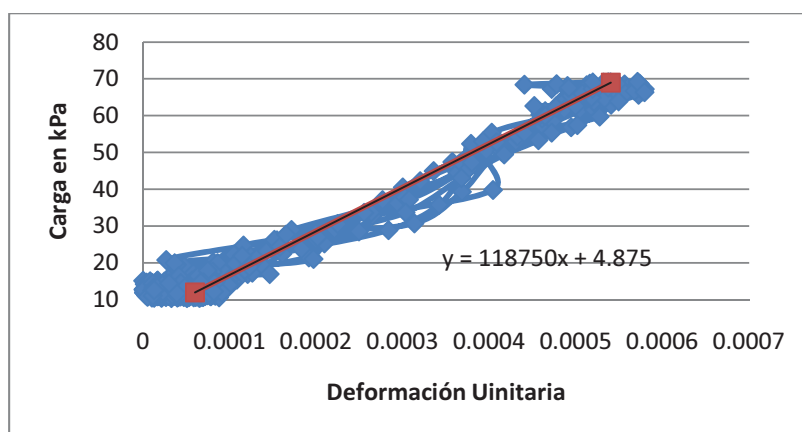
Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 20.7 kPa

Secuencia 2. (Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa).

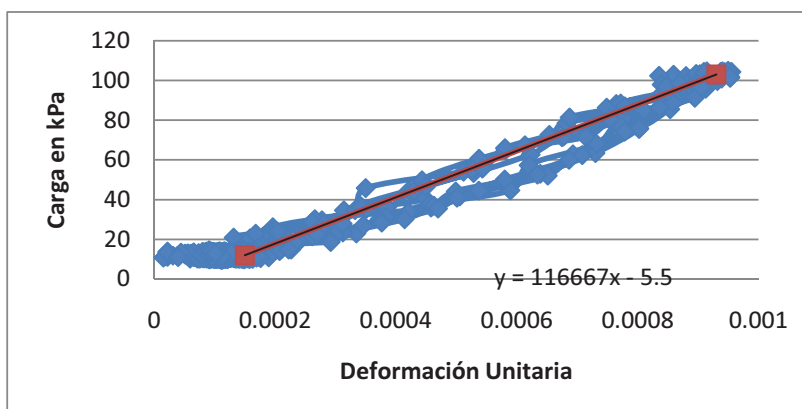
Módulo de resiliencia Confinamiento 3 psi, Esfuerzo desviador 41.4 kPa

Secuencia 4. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa).

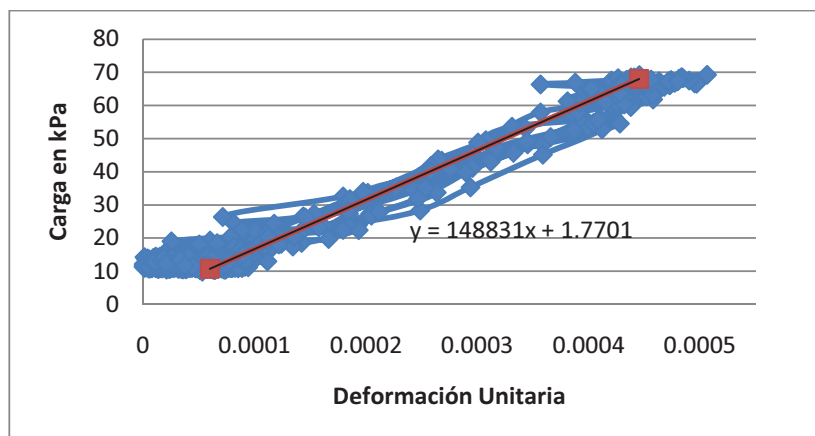
Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 34.5 kPa

Secuencia 5. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

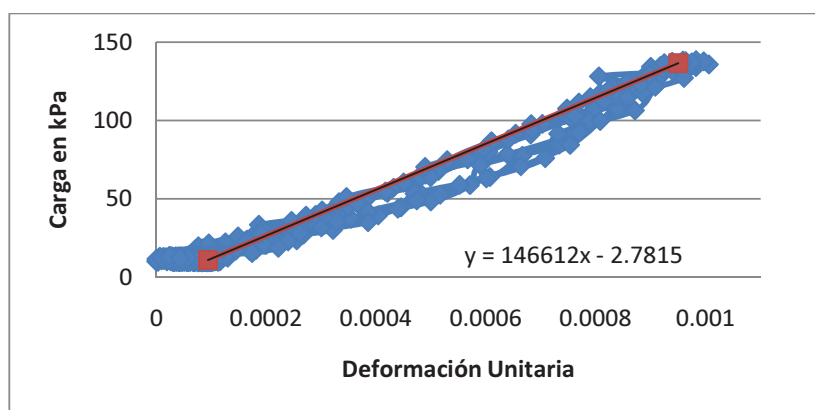
Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 6. (Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

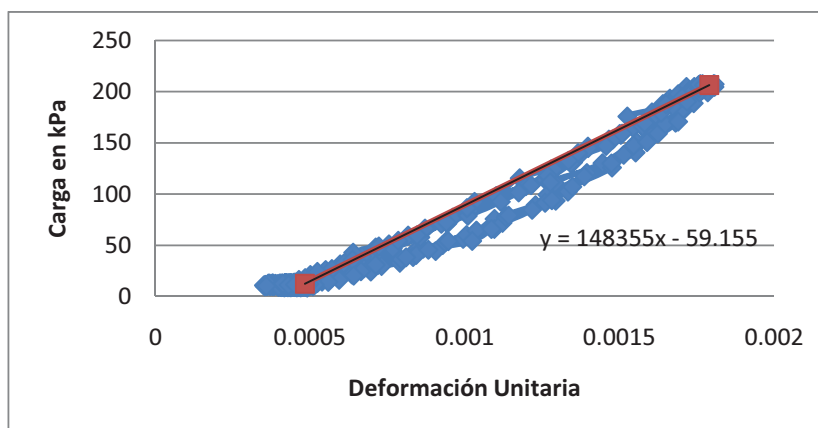
Módulo de resiliencia Confinamiento 5 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

Secuencia 7. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

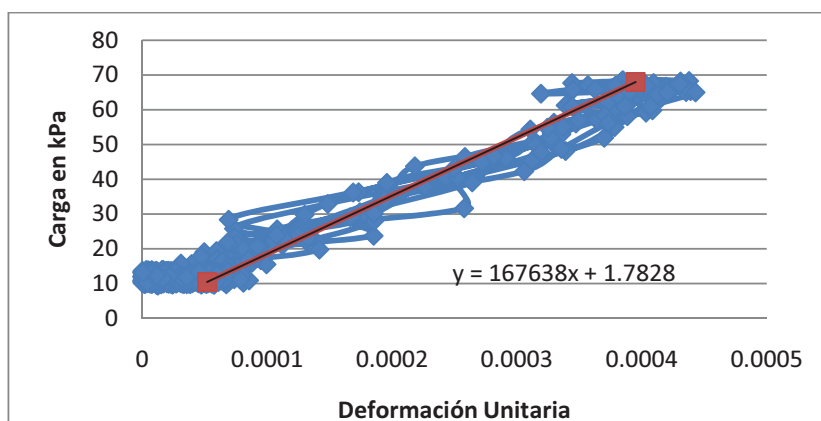
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 8. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

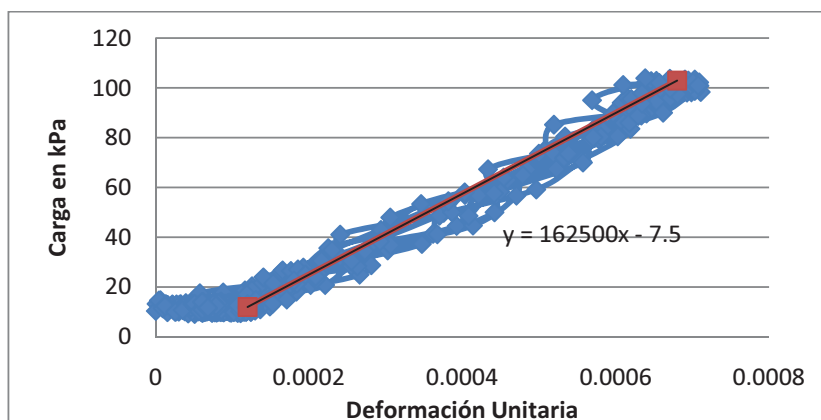
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

Secuencia 9. (Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa).

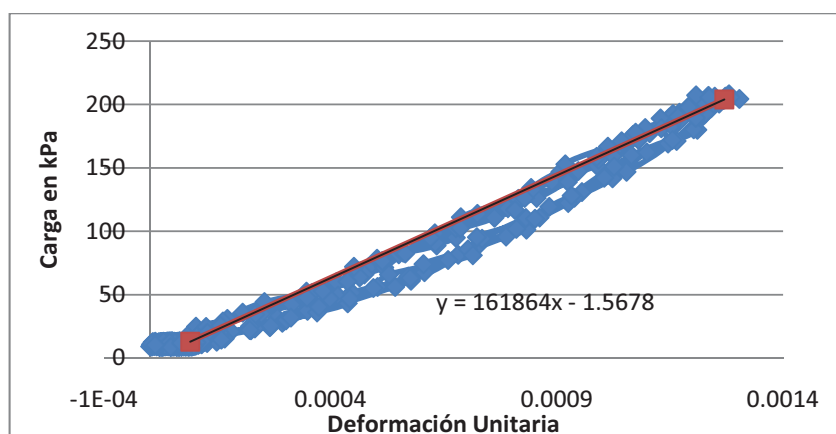
Módulo de resiliencia Confinamiento 10 psi, Esfuerzo desviador 206.8 kPa

Secuencia 10. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa).

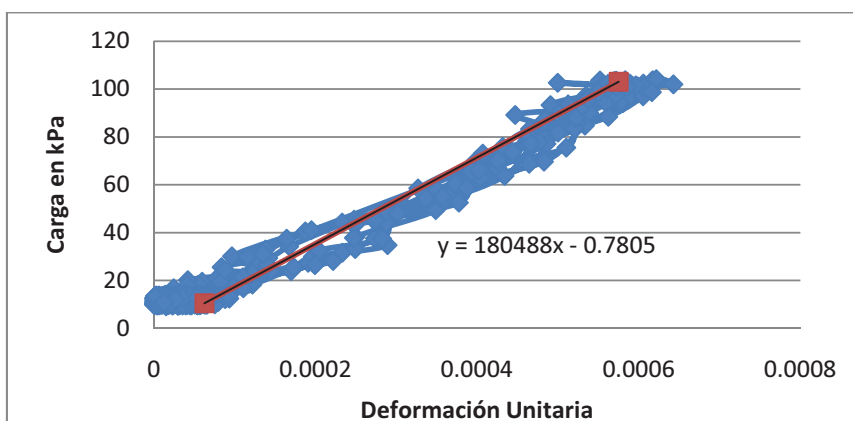
Módulo de resiliencia Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 68.9 kPa

Secuencia 11. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

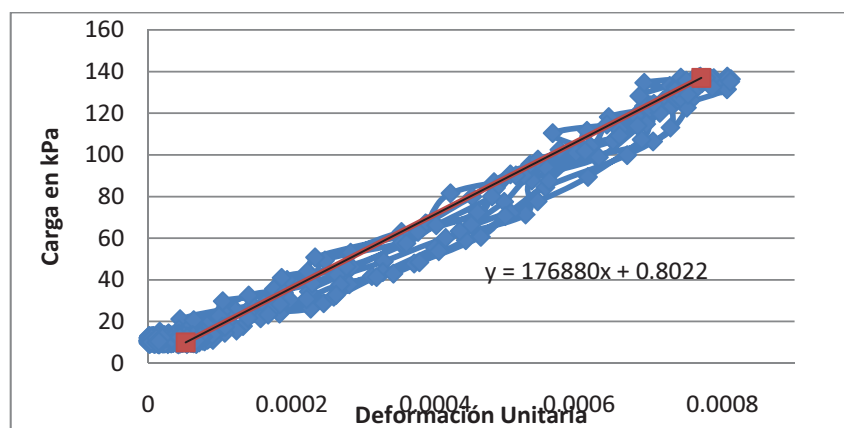
Módulo de resiliencia; Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

Secuencia 12. (Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa).

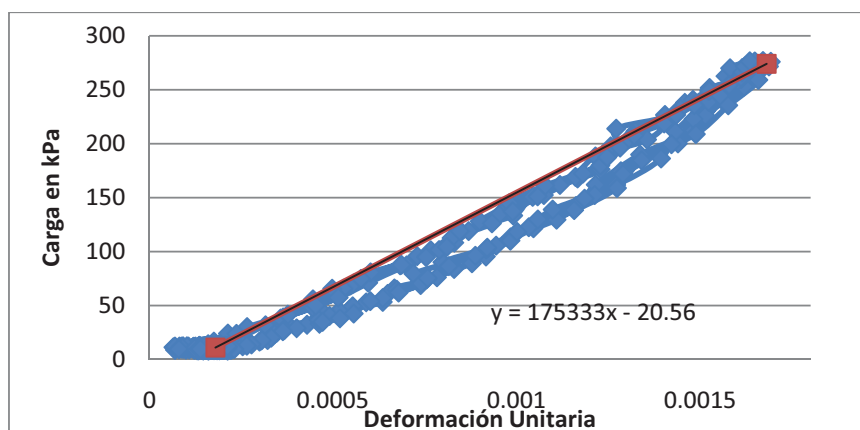
Módulo de resiliencia Confinamiento 15 psi, Esfuerzo desviador 208.6 kPa

Secuencia 13. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 103.4 kPa

Secuencia 14. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 137.9 kPa

Secuencia 15. (Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa).

Módulo de resiliencia Confinamiento 20 psi, Esfuerzo desviador 275.8 kPa

A.5. DEFORMACION PERMANENTE

A.5.1. GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA AL 100% DE HUMEDAD RELATIVA

Granulometría después de la prueba 100%					
Malla No.		peso retenido gr	% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa
37.5	1 1/2"	0	0	0	100
25.4	1"	0	0	0	100
19	3/4"	0	0	0	100
12.5	1/2"	0	0	0	100
9.5	3/8"	210.5	21	21.2	79
6.3	1/4"	181	18	39.4	61
4.75	4	80.9	8	47.5	53
2	10	151.9	15	62.8	37
0.85	20	123.9	12	75.2	25
0.425	40	78.7	8	83.1	17
0.25	60	46.1	5	87.7	12
0.15	100	49.4	5	92.7	7
0.075	200	44.2	4	97.2	3
Pasa malla No. 200		28.3	3	100.0	0
SUMA		994.9	100		

Granulometría después de la prueba de deformación permanente a 100% de humedad

Granulometría después de la prueba 50%					
Malla No.		peso retenido gr	% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa
37.5	1 1/2"	0	0	0	100
25.4	1"	0	0	0	100
19	3/4"	0	0	0	100
12.5	1/2"	0	0	0	100
9.5	3/8"	241.2	21	21.1	79
6.3	1/4"	200.6	18	38.6	61
4.75	4	79	7	45.5	55
2	10	198.1	17	62.8	37
0.85	20	122.2	11	73.4	27
0.425	40	101.3	9	82.3	18
0.25	60	48	4	86.5	14
0.15	100	43.4	4	90.2	10
0.075	200	59.5	5	95.4	5
Pasa malla No. 200		52.2	5	100.0	0
SUMA		1145.5	100		

Granulometría después de la prueba de deformación permanente a 50% de humedad