

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**



**“PUESTA A PUNTO DE UN EQUIPO TRIAXIAL
CÍCLICO PARA MÓDULO DE RESILIENCIA”**

TESIS

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

PRESENTA

ING. SELENE CITLALLIN PÉREZ LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. CARLOS CHÁVEZ NEGRETE

Morelia, Mich. Febrero de 2008

RESUMEN

El Valor Relativo de Soporte (V.R.S), era un parámetro esencial para la determinación de los espesores en el diseño de pavimentos, siendo esta una prueba estática y un parámetro empírico que no representa verdaderamente el paso de vehicular en campo. En México ha tenido mucho impacto, la mayoría sigue utilizando los métodos de diseño de pavimentos de la SOP y de la UNAM. En la actualidad éste parámetro de diseño a segundo orden en México y el mundo.

Desde los años 50's se define un nuevo parámetro que esta relacionado directamente con los esfuerzos y deformaciones a cargas repetidas, es el Módulo Resiliente. Para poder medirlo es necesario contar en laboratorio con un equipo triaxial cíclico. Los primeros equipos salieron en los mismos años que se definió el módulo resiliente. En la actualidad en México existe sólo un equipo para realizar este tipo de ensayos (en el IMT). Hecho que propicia el uso de correlaciones el parámetro durante el uso de los métodos de diseño; ya que son mecanicistas y piden el módulo resiliente como característica del material. Ejemplo de estos métodos diseño de pavimentos son el programa DISPAV de la UNAM y la Guía AASHTO.

Es por eso la importancia del desarrollo de estos equipos en México. Este trabajo consta de la puesta a punto del equipo triaxial cíclico que se diseñó y construyó de acuerdo a la norma AASHTO T 307 -99. Se describe cada una de sus unidades de trabajo tanto en instrumentación como su funcionamiento. Se describe también el como se realizó la calibración de la instrumentación de dicho equipo.

Se realizaron pruebas en diferentes materiales, en madera, Suelo granular y suelo fino. Donde el material en estudio es el suelo granular, se caracterizó y cumplió con los requisitos de las normas de la SCT para materiales de subbase. Se describe la prueba de Módulo resiliente. Se hace una discusión y presentación de los resultados que se obtuvieron.

Todo esto nos llevó a alcanzar la meta de nuestro objetivo planteado que era la Puesta a punto del equipo triaxial cíclico de la U.M.S.N.H.

ÍNDICE

Agradecimientos	Pág. ii
Resumen	iv
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	ix
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVO	12
JUSTIFICACIÓN	13
CAPITULO 1 ANTECEDENTES	14
1.1. Definición del V.R.S.	15
1.2 Historia del V.R.S.	17
1.3 Impacto del V:R:S en el mundo	18
1.4 Impacto del V:R:S en México	20
1.5 Primeros equipos dinámico	21
1.6 Fundamento para la utilización de equipos triaxiales cíclicos	28
1.6.1 Definición del Módulo Resiliente	29
1.6.2 Utilización del módulo resiliente	31
1.6.3 Análisis de esfuerzos y deformaciones multicapa	31
1.7. Situación actual en México	33
1.7.1 Métodos de diseño	33
1.7.2 Equipos existentes	33
CAPITULO 2 PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DESARROLLADO EN LA U.M.S.N.H.	35
2.1 Antecedentes del diseño del equipo	35
2.2. Normativa AASHTO para equipos dinámicos para la obtención del módulo	48
2.2.1 Carga y equipamiento para medición de respuesta del espécimen	51
2.3 Calibración de los instrumentos	54
2.3.1 Calibración de los transductores lineales	54
2.3.2 Calibración de la celda de carga	58
CAPITULO 3 CARACTERIZACION DEL MATERIAL	63
3.1 Caracterización del material	62
3.1.1 Ubicación del banco	62
3.1.2 Pruebas para determinar la clasificación y calidad del material	63
CAPITULO 4 MODULOS DE RESILIENCIA EN TEZONTLE	72
4.1 Descripción de la prueba	72
4.2 Ensayos realizados	79
4.3. Resultados	89

CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	91
5.1 Sugerencias	94
BIBLIOGRAFIA	95
ANEXO 1	99

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
CAPITULO 1	
Figura 1.1. Prueba V.R.S. (C.B.R.). (Porter, 1938)	15
Figura.1.2 Mecanismo asumido de falla del suelo de bajo del vástago. (Black, 1961)	16
Figura. 1.3 Primer equipo triaxial cíclico (Whiffin, 1955)	23
Figura. 1.4. Equipo para pruebas triaxiales de caga repartida en suelos (Brown et al., 1989).	24
Figura.1.5. Equipo triaxial para pruebas en materiales granulares con carga repartida (Brown, et al., 1989).	24
Figura 1.6. Sistema triaxial simplificada de carga repetida para suelos (Cheung, 1994)	25
Figura. 1.7. Actuales equipos triaxiales cíclicos (GDS, GCTS, 2004)	27
Figura. 1.8. Condiciones de esfuerzos bajo el movimiento de la rueda cargada (Brown, 1996)	29
Figura 1.9. Mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando (Huang., 2004)	30
Figura 1.10 Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador	31
Figura 1.11. Sección típica de un pavimento flexible (Garnica et al., 2001)	32
Figura 1.12 Equipo triaxial cíclico de Instituto Mexicano del Transporte	34
CAPITULO 2	
Figura 2.1 Equipo triaxial ciclico.	36
Figura 2.2 Panel de Conexión y acondicionamiento de señal	37
Figura 2.3 (a) Modulo de conexión, (b) Acondicionador de señal, (c) Fuente de poder	37
Figura 2.4 Tarjeta de Adquisición de datos NI	38
Figura 2.5 Transductor lineal	38
Figura 2.6 Instrumentación del equipo.	39
Figura 2.7 Pantalla del programa en LabVIEW	42
Figura 2.8. Panel de control por fuera y por dentro	43
Figura 2.9 Diagrama de flujo del panel de control	44
Figura 2.10 Actuador neumático.	45
Figura 2.11 Unidad de aplicación de carga	46
Figura 2.12 Molde y membranas de látex	47
Figura 2.13. Matillo neumático.	48
Figura 2.14 Cámara triaxial típica con LVDTs externos y Celda de Carga	49
Figura 2.15 Forma de la curva haversine	50
Figura 2.16 (a) Forma de onda triangular; (b) Forma de onda rectangular	51
Figura 2.17 Calibración de los transductores.	55
Figura 2.18 Curva de calibración del LVDT 1	57

Figura 2.19 Curva de calibración del LVDT 2	58
Figura 2.20 Curva de calibración de la celda de carga y embolo.	61

CAPITULO 3

Figura 3.1 Localización del Banco del Banco de Materiales Fuente: SCT	63
Figura 3.2 Material A y material B respectivamente	64
Figura 3.3. Curva Granulométrica del material A	65
Figura 3.4 Curva Granulométrica del material B	66
Figura 3.5 Curva Granulométrica de la mezcla dentro de las zonas granulométricas recomendables de los materiales para sub-bases (SCT)	67
Figura.3.6 Localización relativa de los límites de contracción, plástico y líquido Sobre la escala de contenido de humedad (Bowles, 1980)	68

CAPITULO 4

Figura 4.1. Aparato típico para compactación vibratoria	74
Figura 4.2 Montado de la cámara triaxial	75
Figura 4.3. Prueba en la madera.	79
Figura 4.4. Gráfica deformación unitaria contra tiempo Sec 5.de la prueba en madera	79
Figura 4.5. Gráfica Esfuerzo contra tiempo Sec 5.de la prueba en la madera	80
Figura 4.6. Gráfica Módulo resiliente de todos los datos de la Sec 5 de la prueba en la madera	80
Figura 4.7. Prueba en el material.	81
Figura 4.8. Gráfica deformación unitaria contra tiempo Sec 4 del espécimen de material.	81
Figura 4.9. Gráfica Esfuerzo contra tiempo Sec 4 del espécimen de material,	82
Figura 4.10. Gráfica Módulo resiliente de todos los datos de la Sec 4 en el espécimen de material.	82
Figura 4.11. Probeta de material fino.	84
Figura 4.12. Gráfica deformación unitaria contra tiempo del suelo fino	84
Figura 4.14. Gráfica Esfuerzo contra tiempo, suelo fino.	85
Figura 4.14. Gráfica Módulo resiliente de todos los datos de la probeta de suelo fino	85
Figura 4.15. Gráfica Módulo resiliente de la Sec 5 de la madera	86
Figura 4.16. Gráfica Módulo resiliente y esfuerzo invariante de la Sec 5 de la madera	87
Figura 4.17. Gráfica Modulo resiliente de la Sec 4 del material.	88
Figura 4.18. Gráfica Modulo resiliente y esfuerzo invariante de la Sec 4 del material.	89
Figura 4.19. Gráfica Módulo resiliente del suelo fino.	89
Figura 4.20. Gráfica Modulo resiliente contra el esfuerzo invariante del suelo fino.	90

ANEXO 1 **99**

INDICE DE TABLAS

	Pág.
CAPITULO 2	
Tabla 2.1 Resultados del LVDT 1	56
Tabla 2.2 Resultados del LVDT 2	59
Tabla 2.3 Lecturas tomadas para la calibración de la celda de carga.	60
Tabla 2.4 Lecturas tomadas para la calibración del embolo del actuador.	60
CAPITULO 3	
Tabla 3.1 Granulometría del material A	65
Tabla 3.2. Granulometría del material B	65
Tabla 3.3 Granulometría de la mezcla	66
Tabla 3.4 Resultados de la caracterización del material-	70
Tabla 3.5 Requisitos de calidad de los materiales para subbases (N-CMT-4-02-001/04)	71
CAPITULO 4	
Tabla 4.1 Secuencias de prueba para especímenes de suelos granulares de Base y Sub Base	77
Tabla 4.2 Secuencia de prueba para suelos finos	83

INTRODUCCION

Con la aparición del automóvil en el año del 1906, los caminos existentes en ese tiempo tuvieron que mejorar de acuerdo a las nuevas condiciones. Es en ese entonces, donde se empiezan a realizar los primeros diseños de pavimentos.

La mecánica de suelos es ciencia de apoyo fundamental para el diseño de pavimentos; ya que el terreno natural donde se desplanta y en las capas del pavimento intervienen los suelos. Es por ello importante conocer el comportamiento de estos y así tener un pavimento donde el paso de vehículos sea seguro y económico.

Los presentes métodos de diseño son empíricos y basados generalmente en el uso de la prueba del Valor Relativo de Soporte (VRS, "California Bearing Ratio") desarrollada por Porter (1938). Esta prueba tiene muchos inconvenientes, entre los principales la poca representabilidad de las condiciones de carga a las que se ve sometido un pavimento.

Un Pavimento moderno se diseña para una vida útil de 20 años, durante los cuales puede ser sometido a una carga acumulativa de 50 millones de ejes equivalentes de 8.2 ton. Si se utiliza una deformación máxima permanente de 25 mm como criterio de falla, se deduce que cada aplicación de carga se produce una deformación menor de 10^{-6} mm. Por lo que se deduce que los esfuerzos y las deformaciones pueden ser estimados de una manera satisfactoria con la teoría de la elasticidad, ya que las deformaciones son casi nulas durante la aplicación de un ciclo de carga. La deformación recuperable después de una aplicación de carga sirve para definir un nuevo concepto "el módulo de resiliencia" que se desarrolló en los 50's por el Profesor Seed y sus compañeros a través de pruebas triaxiales con carga repetida.

En la actualidad, el módulo de resiliencia se ha popularizado como parámetro de diseño. El principal inconveniente para su aplicación, es el de contar con un Equipo triaxial que sea capaz de aplicar una carga cíclica. Éstos se empezaron a desarrollar en los años 50's, con diseño totalmente mecánicos, en la actualidad los equipos son muy sofisticados y los hay totalmente automatizados.

En este trabajo se describe cada uno de los componentes del equipo triaxial cíclico, que se diseñó y construyó dentro de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, así como el desarrollo de la puesta a punto de éste, ya que es muy importante el realizar este tipo de tecnología dentro del país, debido a que es de los primeros equipo en realizar pruebas para módulos de resiliencia y teniendo como consecuencia el diseño de pavimentos mas eficaces.

También se describe que son los “módulos de resiliencia” en materiales granulares la importancia que tienen en la actualidad para el diseño de pavimentos y el procedimiento de la prueba de los módulos de resiliencia.

OBJETIVO

En la actualidad son pocas instituciones que cuentan con la tecnología necesaria para la obtención de los módulos de resiliencia en México. Es por ello que el objetivo de este trabajo fue el de **realizar la puesta a punto del equipo triaxial cíclico**. Que se diseñó y construyó dentro de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Para ello, se hizo la calibración de la instrumentación de dicho equipo así como la realización de pruebas de módulo resiliente en éste.

El objetivo anterior tuvo como meta principal contar con un equipo triaxial cíclico para la realización de pruebas de módulo de resiliencia.

JUSTIFICACION

Los pavimentos son estructuras ingenieriles que deben dar seguridad al paso vehicular. Para ello es necesario el buen diseño y tomar en cuenta el comportamiento de los materiales que componen un pavimento.

En la actualidad el diseño de los pavimentos está basado en métodos empíricos, los cuales no están muy apegados al comportamiento real de los suelos bajo cargas repetidas. Los módulos resilientes son un parámetro más adecuado, el cual, refleja el comportamiento bajo cargas cíclicas del paso vehicular y tomando en cuenta las diferentes magnitudes esfuerzos que actúan.

En el laboratorio para reproducir este comportamiento del paso vehicular en los suelos, se hace a través del equipo triaxial dinámico cíclico en el cual se somete al suelo a esfuerzos desviadores.

En el país no se cuenta con muchos equipos de este tipo por los costos tan elevados de estos. Es por ello que el generar este tipo de tecnología, en lugares donde no se tiene, traerá como consecuencia la realización de diseños de pavimentos eficientes dentro del país y el de realizar más investigación dentro de la Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo.

CAPITULO 1.

ANTECEDENTES

El nacimiento de la Ingeniería de Pavimentos surgió con el desarrollo de los vehículos automotores hacia comienzos del Siglo XX. Con el transcurso del tiempo, las nuevas exigencias de seguridad planteadas por las velocidades de circulación y las mayores exigencias estructurales impuestas por las mayores cargas, llevaron a los profesionales e investigadores a proponer soluciones adecuadas para éstas. Los pavimentos son estructuras ingenieriles para un solo propósito: el paso vehicular, que este sea seguro y económico.

Este campo es muy amplio y un elemento esencial es la mecánica de suelos ya que las estructuras están en contacto con el suelo y con materiales granulares que son primordiales en las capas de los pavimentos.

En el desarrollo de un método para el diseño de pavimentos flexibles es necesario saber, para cada capa, cual es la magnitud de los esfuerzos que llegan a estar asociados con las cargas de la rueda pertenecientes al paso vehicular para así prever cual será el comportamiento de los materiales del pavimento.

Los primeros métodos de diseño de pavimentos estuvieron fuertemente influenciados por los trabajos realizados por California Division of Highways. Porter (1938) presentó recomendaciones para las capas de los pavimentos de materiales gruesos, basados en la experiencia y usando el valor relativo de soporte así como pruebas de expansión. Lo anterior fue desarrollado en 1929, este ensayo mide la resistencia a la deformación que ofrece un suelo frente a las cargas de tránsito y el posterior incremento de volumen con el aumento de su humedad (Brown, 1996). El ensayo del valor relativo de soporte se convirtió en la prueba California Bearing

Ratio (C.B.R.), que es aun utilizada universalmente para pruebas de suelos y materiales granulares por los laboratorios para el diseño de pavimentos.

1.1 DEFINICIÓN DEL V.R.S. (C.B.R.)

La prueba de V.R.S. (C.B.R.) es la relación de la fuerza requerida para penetrar un pistón circular de 1935 mm^2 (3 in^2) de sección transversal en un suelo, en un contenedor especial a una tasa de 1 mm/min (0.05 in/min), que se requiere para una penetración similar en una muestra estándar de roca triturada compactada (figura 1.1). La tasa se determina con las penetraciones de 2.5 y 5.0 mm (0.1 y 0.2 in) y se usa el valor mas alto.

El valor del V.R.S. (C.B.R.) puede ser observado como una medida indirecta del esfuerzo cortante del suelo, pero no puede ser relacionado directamente con los parámetros del esfuerzo cortante. En la figura 1.2 se muestra un mecanismo asumido de falla del suelo de bajo del vástago. (Black, 1961) La resistencia de los suelos al esfuerzo cortante depende de muchos factores, ninguno de los cuales se controla en una prueba V.R.S. En tales condiciones no es posible medir valores de resistencia o variaciones de la misma.

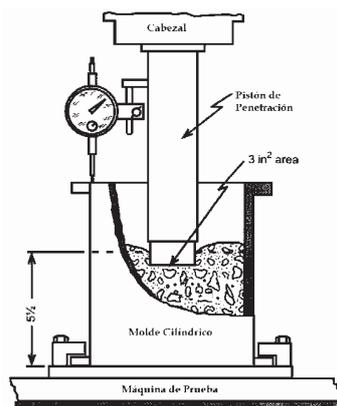


Figura 1.1. Prueba V.R.S. (C.B.R.). (Porter, 1938)

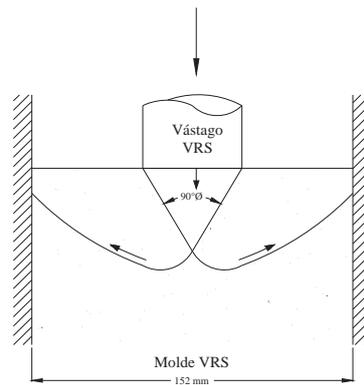


Figura. 1.2 Mecanismo asumido de falla del suelo de bajo del vástago. (Black, 1961)

La prueba consiste en que el espécimen de suelo con el que se realiza la prueba está confinado en un molde de 15.2 cm. (6 plg.) de diámetro y de 20.3 cm. (8 plg.) de altura. En el método de prueba original utilizado en California, el espécimen se preparaba en tres capas varilladas que llenasen el molde; después el material se presionaba con 140 Kg. /cm², aplicados uniformemente en su superficie superior. En estas condiciones eran preparados especimenes con humedades diferentes, hasta encontrar una en la que los 140 Kg. /cm² provocara la exudación del agua en la parte inferior del molde; este espécimen, tras un periodo de saturación de 4 días, se suponía representativo de las condiciones mas desfavorables que pudieran llegar a prevalecer en el futuro pavimento.

En épocas mas recientes el U.S. Army Corps of Engineers (The Asphalt Institute, 1963) ha desarrollado un método de prueba que difiere a la tradicional en los procedimientos de preparación del espécimen. Se emplea un método dinámico de compactación de los especimenes, para lo que se usan las pruebas AASHO estándar y modificadas y otra con energía de compactación intermedia. El objetivo es de reproducir razonablemente las condiciones de compactación logradas con el equipo de campo.

Al probar el material, se coloca sobre él una placa que represente el peso de la sobrecarga que va a tener una determinada capa en el pavimento real. La placa

está provista de una perforación en el centro para permitir el paso del pistón que efectuara la penetración.

Los factores que más afectan a los valores obtenidos en la prueba del V.R.S. son la textura del material, su contenido de agua y su condición de compactación. Las dispersiones de los resultados de la prueba son tan grandes cuando se hace variar el contenido de agua en el suelo o sus condiciones de compactación que prácticamente puede obtenerse cualquier valor deseado para el V.R.S. Tomando en cuenta que todas las consideraciones anteriores el método de diseño fundado en la prueba del V.R.S. tiene que ser considerado como un método empírico, carente de universalidad científica (Rico y Del castillo, 2000)

1.2 Historia del V.R.S. (C.B.R.).

Head, (1994) señala que la prueba de “California Bearing Ratio o Valor Relativo de Soporte” (C.B.R. o V.R.S.), se desarrolló durante los años 30’s en el Laboratorio de Investigación de Materiales en el Departamento de California Division of Highways, USA, y fue divulgado por O. J. Porter (1938).

Anteriormente, la calidad de los materiales utilizados para bases y sub-bases en autopistas dependía directamente de métodos como por ejemplo, la identificación del suelo y en el análisis de la fracción fina solamente. Con el incremento del peso y volumen del tráfico, a principios de los 30’s los procedimientos utilizados ya no eran adecuados a largo tiempo. Porter demostró que existía una correlación favorable entre los resultados de sus pruebas y el comportamiento de los caminos observados bajo la acción del tráfico, y el valor de su procedimiento fue reconocido muy pronto.

La prueba de C.B.R. fue recomendada a la *American Society for Testing and Materials* como una prueba estándar por Stanton (1944), y ahora es designada como ASTM D 1883. Porter (1949) desarrollo más a fondo el procedimiento de la

prueba para la construcción de aeropistas. Davis (1949) demostró que el procedimiento era aplicable al diseño de pavimentos en caminos y aeropistas en Gran Bretaña, y se adoptó un procedimiento estándar para utilizar en Gran Bretaña por el *Road Research Laboratory* en 1952. La prueba apareció primero en las normas Británicas en 1953 cuando fue denominado “Prueba de Penetración de Cilindro”, y fue utilizado para estabilizar suelos. Fue llamado *Prueba California Bearing Ratio* en 1967. El principio de la prueba es aun reconocido y utilizado en muchas partes del mundo como un criterio importante para el diseño de pavimentos.

1.3. Impacto del V.R.S. (C.B.R.) en el mundo.

Como se mencionó anteriormente el descubrimiento de la prueba del V.R.S. por Porter fue un importante aporte para el diseño de pavimentos, y se fue adoptando en diversos lugares hasta la actualidad. (Brown, 1996)

Entre 1944 y 1947 el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de USA decidieron adoptar el método del C.B.R. de diseño durante la Segunda Guerra Mundial para poder resolver los nuevos requisitos que se presentaron para los pavimentos de aeropistas. Necesitaban algo práctico, así que extendieron las curvas de diseño de autopistas para hacer frente a las cargas mas pesadas de los neumáticos, aplicadas por los aviones.

Turnbull (1950) comentó en la prueba de C.B.R.:

“ ...Es esencialmente una simple prueba de esfuerzos y el C.B.R. es un índice de esfuerzo cortante”.

El notó que las curvas de diseño del C.B.R. daban un espesor total del pavimento para prevenir la deformación por cortante en el suelo.

El método C.B.R. se fue adaptando gradualmente en el Reino Unido y en las demás partes. Formó el método básico en de diseño de pavimentos en la práctica, y aunque se mejoró a través de los años aun es muy usado. En el Reino Unido el espesor original de las curvas han sido reemplazadas pero la prueba de C.B.R. se mantiene como el método recomendado para caracterizar subsuelos.

Más allá de las críticas realizadas, la sencillez del método de diseño y del propio ensayo de C.B.R. favoreció su rápida popularización y extensión en todo el mundo. Algunos países adoptaron directamente estos métodos de diseño, y hasta la actualidad persisten.

Huang, (2004) menciona que AASHTO está desarrollando una guía para diseños nuevos y rehabilitaciones en estructuras de pavimentos; denominada guía AASHTO 2002. La cual consta de una revisión de los diseños de pavimentos y el análisis del procedimiento que comúnmente se utilizan en todo el mundo.

En la guía se cuenta con cuatro categorías como entradas para ser discutidas que son: Tráfico, caracterización del material, clima y la fiabilidad de su funcionamiento.

Dentro de caracterización del material hay tres niveles de entrada en diseño de pavimentos, para determinar el Módulo resiliente (M_R) de materiales sueltos, estos son:

1. Utilizando el siguiente modelo no lineal que es usado para caracterizar el módulo resiliente de materiales para bases, sub-bases y rasantes de (autopistas y caminos de altas especificaciones).

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3}$$

Donde:

M_R = Módulo resiliente.

K_1, k_2, k_3 = Constantes de la regresión que son en función del tipo de material.

P_a = Presión atmosférica para regular los esfuerzos.

Θ = Esfuerzo invariante

τ_{oct} = Esfuerzo cortante octahedral, en función de los esfuerzos principales.

2. Correlacionando el M_R con el valor del VRS, o con los valores de plasticidad (Caminos secundarios).
3. Correlacionando el M_R con las clasificaciones del suelo (Caminos vecinales).

Lo anterior nos indica que el VRS ha sido desplazado a segundo término y sólo se utilizan los módulos de resiliencia en autopistas y caminos de altas especificaciones.

1.4. Impacto del V.R.S. (C.B.R.) en México.

En México la práctica actual se basa en métodos básicamente empíricos, en donde el diseño se respalda en propiedades físicas de los materiales, y algún índice de resistencia como lo es el Valor Relativo de Soporte, VRS.

Algunos de los métodos de diseño para pavimentos que aun en la actualidad se siguen usando en México son: El método propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los E.U.A., el principio de este método es obtener el espesor del

pavimento con unas graficas. Dichas graficas proporcionan los espesores para diferentes valores de VRS y distintas cargas de rueda de los vehículos.

En México se utiliza también predominantemente el VRS como método de diseño de los pavimentos carreteros. La secretaria de Obras Publicas cuenta con unas graficas que están en función del VRS para el diseño.

Por ultimo existe otro método desarrollado por un grupo de trabajo del Instituto de Ingeniería de la Universidad de México (U.N.A.M.). Este método se basa graficas que tienen como función el transito acumulado y el VRS, con esto se obtiene el espesor de la estructura del pavimento. Para cada capa es necesario conocer su VRS se maneja de manera independiente para cada una, en la estructura del pavimento. La reacción entre el espesor y el VRS es un curva típica de esfuerzos normales según la teoría de Boussinesq. (Rico y Del Castillo, 2000)

Por supuesto que ya se manejan conceptos mecanicistas como el Módulo de Resiliencia, pero sólo como parámetro de cálculo que se correlaciona con el VRS, y no como una propiedad fundamental del material. (Garnica et al, 2004)

1.5. Primeros equipos dinámicos

Los materiales no tienen comportamiento elástico exclusivamente, esto es indicado por el desarrollo de la deformación permanente (plástica) en estructuras del camino. Es por ello necesario estimar la magnitud de dicha deformación en pruebas con cargas repetidas, a través de una maquina en la cual los materiales estén sujetos a esfuerzos axiales y laterales simultáneamente estimando así la magnitud del comportamiento elástico.

El primer equipo utilizado (figura 1.3) en Gran Bretaña en Road Resarch Laboratory en los 50's consistía esencialmente de 4 componentes: (Whiffin, 1955)

1. Un motor eléctrico con los engranajes de reducción capaces de dar una gama de velocidades de funcionamiento.
2. Un marco de carga, que consistió en un sistema de las palancas, resortes, y balanceo de componentes, todo operado por una leva.
3. Una cámara triaxial.
4. Instrumentos para medir esfuerzos, deformaciones y la presión de poro

Las características que debía tener el equipo son las siguientes:

El espécimen debe estar sujeto a compresión triaxial durante la prueba. El rango de los esfuerzos debe estar en: esfuerzo axial 1 – 16 lb. /pul²; esfuerzo lateral 0 – 8 lb. /pul² (estos esfuerzos cubren adecuadamente el rango que probablemente pueda ocurrir en caminos de tráfico pesado) la relación de esfuerzo axial y esfuerzo lateral debe de ser capaz de ser variado. La duración de los esfuerzos es causada por la rueda y debe ser medido (Whiffin, 1955) y esto depende de la velocidad del vehículo, la profundidad del punto que es medido, el tipo de construcción y el área de contacto del neumático. La duración del pulso puede variar entre 0.2 – 1.0 seg. El pulso producido por el equipo debe variar entre este rango. Las condiciones de drenaje deben de ser lo más apegadas a las de campo. El equipo debe ser capaz de trabajar durante periodo largo y capaz de dar aplicaciones de carga de 10⁶ continuamente sin interrupciones.

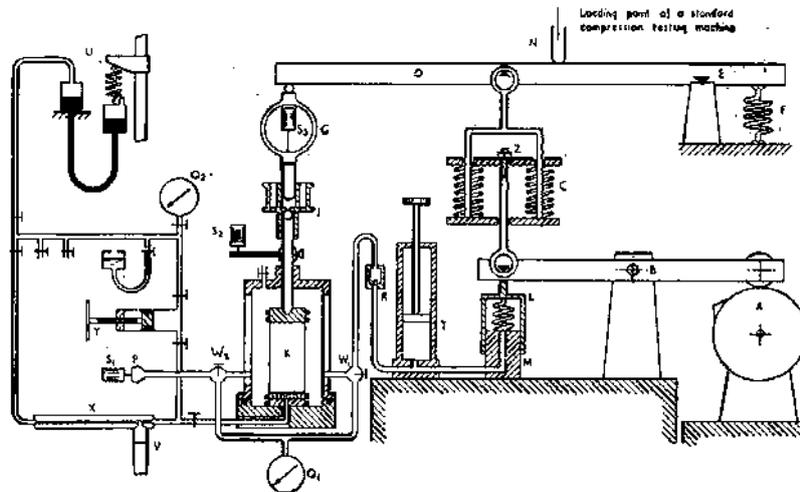


Figura. 1.3 Primer equipo triaxial cíclico (Whiffin, 1955)

En 1976 Boyce *et al.*, desarrollaron en Nottingham un equipo triaxial dinámico cíclico para probar especímenes de 75 mm de diámetro bajo carga cíclica. Sus características principales son:

- Uso de sistemas servo-hidráulicos para la aplicación de cargas cíclicas en ambos esfuerzos desviador y de confinamiento
- Medidas exactas de las deformaciones axiales y radiales debido a los LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) en el espécimen de prueba.
- Medidas de carga axial en el plato superior
- Medición de la presión de poro en el fondo y en el centro del espécimen
- Computadora de control

Este equipo es descrito completamente por Brown *et al*, 1980 y Raybould 1992.(figura 1.4)

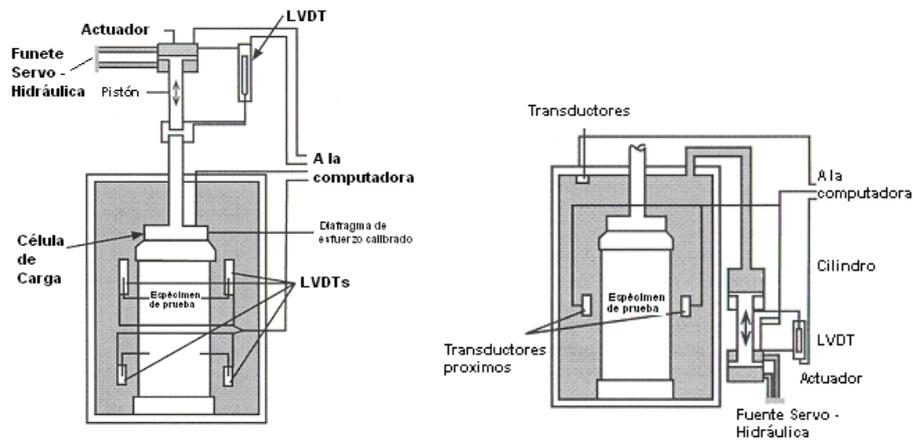


Figura. 1.4. Equipo para pruebas triaxiales de carga repartida en suelos (Brown et al., 1989).

Un equipo para probar materiales granulares con tamaño de partículas hasta de 40 mm, fue desarrollado en Nottingham (figura 1,5) para especímenes de 150 mm de diámetro. (Brown et al., 1989).

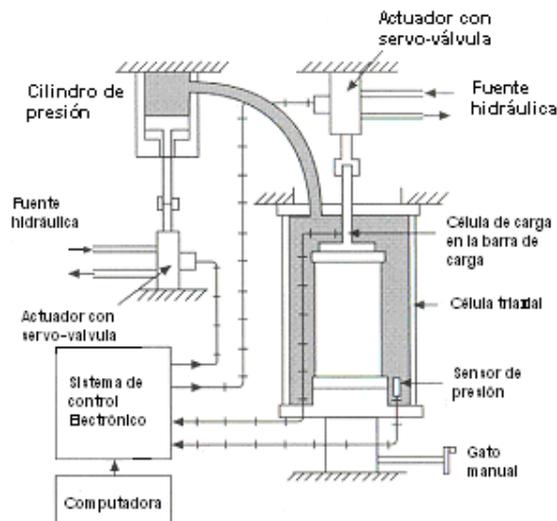


Figura.1.5. Equipo triaxial para pruebas en materiales granulares con carga repartida (Brown et al., 1989).

Un aparato similar fue usado en Francia (Paute *et al.*, 1993) Mientras que especímenes de de 400 mm de diámetro era adoptado en Duch; el equipo que fue desarrollado por Sweere (1990).

Porque las pruebas en suelos son mucho más difíciles para realizarse que las pruebas de asfalto, es por ello que se simplificaron las técnicas, pero a la vez presentaron mayor desafío. Uno de los principales problemas fue el preparar especímenes confiables y representativos. El trabajo más reciente de Nottingham en conjunto con Transport Research Laboratory de Gran Bretaña, fue el de desarrollar pruebas prácticas para suelos granulares las cuales fueron adoptadas para diseños propuestos.

Un sistema triaxial de cargas repetidas para pruebas en suelos, es operado neumáticamente como se muestra en la figura 1.6. Acomodando especímenes de 100mm de diámetro en una célula estándar en donde caben los traductores que miden la deformación del espécimen que son fáciles de ensamblar. (Cheung, 1994) La carga axial es medida por la célula de carga, el esfuerzo desviador hasta 200 kPa puede ser aplicado. La presión media de confinamiento es aire con un valor máximo de 200 kPa.

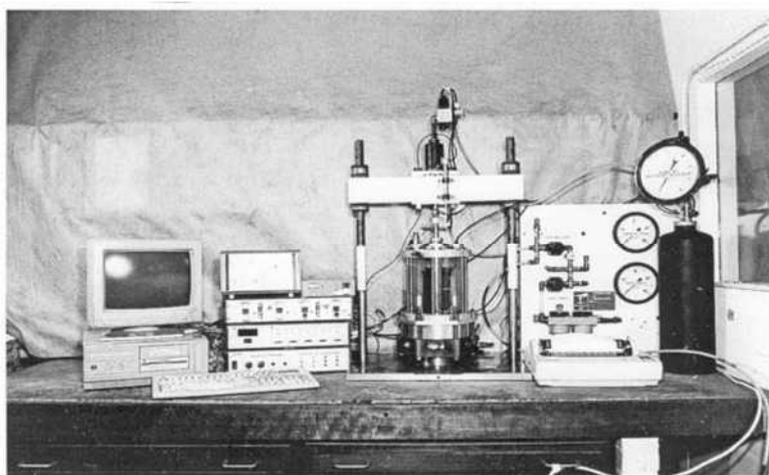


Figura 1.6. Sistema triaxial simplificado de carga repetida para suelos (Cheung, 1994)

En la actualidad al avanzar la tecnología los equipos han evolucionado junto con ella. Los nuevos equipos son capaces también de realizar otro tipo de pruebas cíclicas y estáticas como son la licuefacción así como las convencionales pruebas UU, CU y CD se muestran en la figura 1.7

Este tipo de aparatos esta compuesto por tres unidades comúnmente: (Garnica et al., 2002)

1. Unidad de registro de información
2. Unidad de regulación de presión.
3. Unidad de aplicación de carga

1. Unidad de registro de información

Esta unidad se basa principalmente en un sistema de control a través del cual se lleva a cabo el encendido del equipo para que opere. Además de tener un control las otras dos unidades como son las magnitudes de la presión de confinamiento, magnitudes de carga, deformaciones verticales permanentes como resilientes y así como el de reportar los resultados obtenidos.

También cuentan con una PC de alta velocidad que es utilizada para un total sistema de control de adquisición y presentación de resultados. Todo el sistema es controlado mediante un software que es utilizado para pruebas triaxiales (estáticas y dinámicas), pruebas de consolidación, entre otras.

2. Unidad de regulación de presión.

A través de una válvula se regula la presión de confinamiento que es aire comprimido en intervalos de tiempo.

3. Unidad de aplicación de carga.

Consta de un marco de carga, cámara triaxial para permitir grandes cargas con un actuador dinámico cíclico. También cuenta con unos transductores que su función es el de transmitir las deformaciones verticales medidas hacia la unidad de información así como también las deformaciones transversales.

Los equipos triaxiales cíclicos utilizan un marco tradicional de carga y una célula triaxial para permitir la alta carga de trabajo estático con un actuador dinámico de +/- 5 kN adicional para el trabajo cíclico dinámico y estos pueden ser servo- hidráulicos o servo- neumáticos que trabajan a una frecuencia no mayor de 70 hz.

En dichos equipos se pueden probar especímenes de 70 mm, 100 mm, 150 mm hasta 350 mm de diámetro.



Figura. 1.7. Actuales equipos triaxiales cíclicos (GDS, GCTS, 2004)

1.6. Fundamento para la utilización de equipos triaxiales cíclicos

Paralelamente al desarrollo de los métodos empíricos, basados fundamentalmente en el C.B.R., en la propia División de Carreteras de California se inician los primeros estudios sistemáticos de deformabilidad de pavimentos encabezados por Francis Hveem (Hveem & Carmany, 1948; Hveem, 1955).

El parámetro de “módulos resilientes” fue introducido en California durante los 50’s en el trabajo de Francis Hveem y el profesor Harry Seed y sus colegas en la Universidad de California, Berkeley. Hveem fue el primero en reconocer la importancia de los módulos resilientes en los pavimentos asociados con el índice de agrietamiento por fatiga en la carpeta bituminosa. Seed y sus colegas realizaron pruebas triaxiales con carga repartida en suelos compactados (Brown, 1996).

¿Pero qué son los módulos resilientes? O ¿a qué se deben estos módulos?

El estado de esfuerzos inducidos a una estructura de pavimento como consecuencia del tránsito de vehículos es muy variado y complejo. Un elemento del pavimento está sometido a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes. Los esfuerzos son transitorios y cambian conforme avanza la carga. (Brown, 1996)

En la figura 1.8 se muestra en general el régimen de esfuerzos experimentados en un elemento de material debajo de una estructura del pavimento, como resultado del movimiento de la rueda cargada. Hay pulsaciones de los esfuerzos verticales y horizontales que son acompañados por una doble pulsación del esfuerzo cortante con una señal contraria en el plano vertical y horizontal. También se muestra la variación de los esfuerzos con el tiempo.

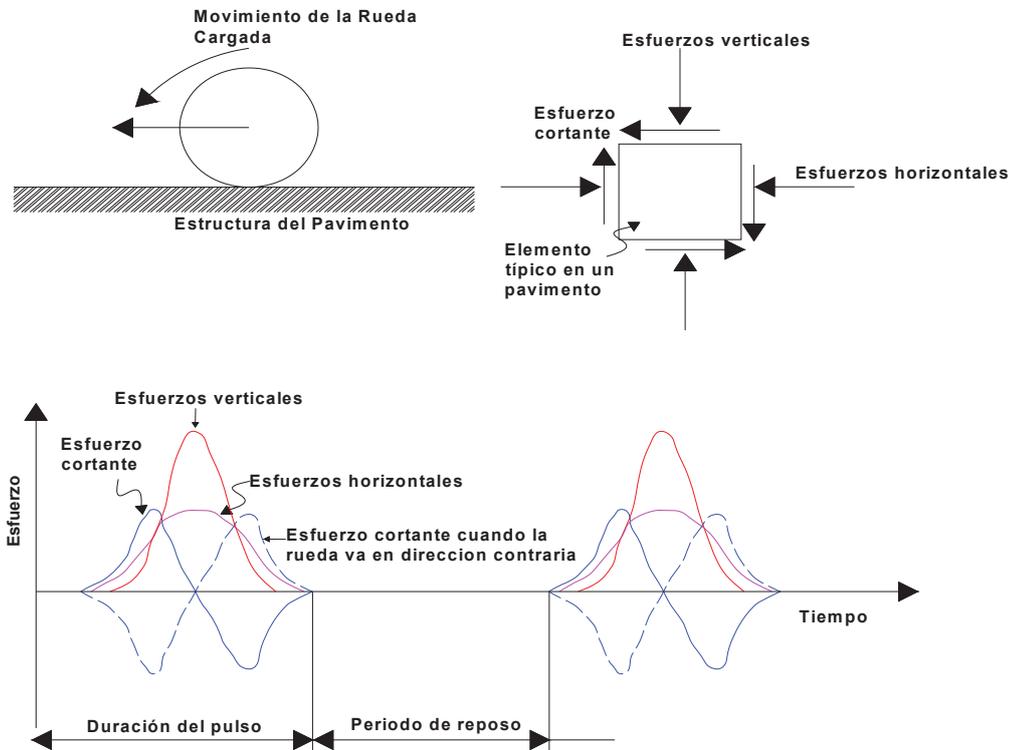


Figura. 1.8. Condiciones de esfuerzos bajo el movimiento de la rueda cargada (Brown, 1996)

Este estado de esfuerzos se presenta en forma repetida cuando el paso de los vehículos se hace constante. En este proceso depende en gran medida de la acumulación de los ejes equivalentes. (Garnica et al. 2002)

1.6.1 Definición del Módulo Resiliente.

El profesor Seed et al en 1962, definió el módulo resiliente como la magnitud del esfuerzo desviador repartido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable, siendo este equivalente al módulo de Young (módulo de elasticidad) y queda representado por:

$$M_R = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}}$$

Donde:

M_R = Módulo de resiliencia

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ_{axial} = Deformación recuperable.

Por lo tanto, el concepto de módulo de resiliencia esta ligado a un proceso de carga repetida.

Después de un cierto número de ciclos de cargas, el módulo llega a ser aproximadamente constante y por lo tanto la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. El módulo que permanece constante se le llama módulo de resiliencia como se observa en la figura 1.9. Esta definición es aplicable a materiales granulares así como a suelos finos.

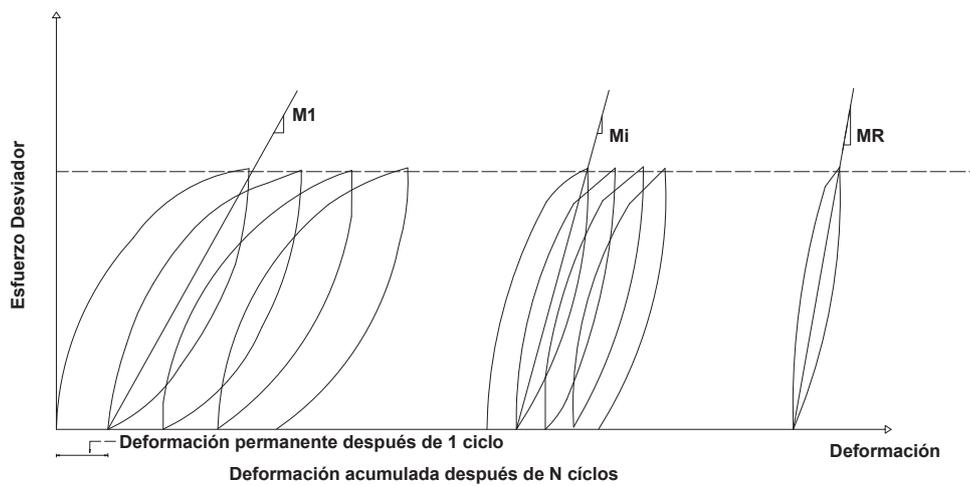


Figura 1.9. Mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando (Huang., 2004)

En la figura 1.10 se muestra la acumulación de las deformaciones total y plástica durante un cierto número de ciclos.

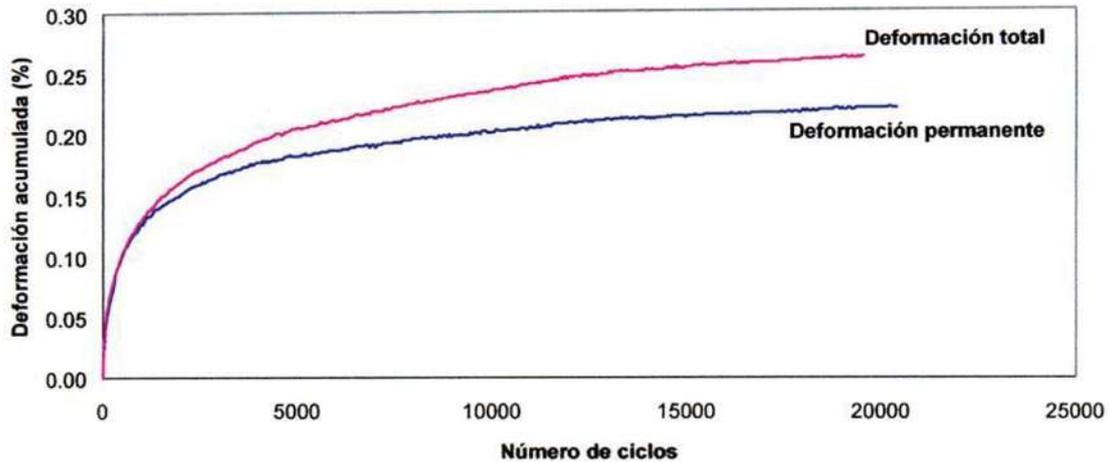


Figura 1.10 Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador (Garnica et al., 2002)

1.6.2. Utilización del Módulo Resiliente

Las metodologías para el diseño de pavimentos son varias las que toman el valor de módulo de resiliencia como base de la caracterización del comportamiento de los suelos y de los materiales granulares. Tomando en cuenta los factores que influyen en el módulo resiliente se debe de hacer una minuciosa selección de este.

1.6.3. Análisis de esfuerzos y deformaciones Multicapa (Garnica et al., 2001)

Un buen diseño de pavimentos depende en gran medida al comportamiento de los materiales ante cargas repetidas. Para caracterizar los materiales se deben tomarse en cuenta los dos aspectos siguientes; el patrón de comportamiento mecánico del material y las características de esfuerzo-deformación de cada uno de los materiales utilizados en la sección estructural (Garnica et al., 2001).

Los métodos mecanicistas están basados en la suposición de que un pavimento puede ser modelado como una estructura multicapa elástica en una cimentación elástica. Suponiendo de esta manera que los pavimentos pueden ser modelados es posible calcular los esfuerzos, deformaciones o flexiones debidas al tránsito vehicular.

En estos métodos se toma como propiedad básica el módulo de resiliencia que es una medida de las propiedades elásticas de los suelos. Pero tomando en cuenta la existencia de características no lineales en su comportamiento.

En la figura 1.11 se muestra una sección de pavimento donde cada una de las capas esta caracterizada por las propiedades del material que la forman (módulo de resiliencia, relación de Poisson y espesor de la capa).

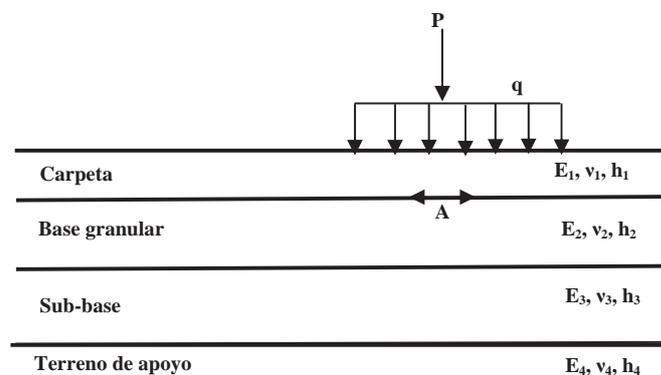


Figura 1.11. Sección típica de un pavimento flexible (Garnica et al., 2001)

1.7. Situación actual en México

1.7.1. Métodos de Diseño

En la actualidad éste parámetro es muy importante para el diseño de pavimentos, en México el primer método en tomar en cuenta el módulo resiliente es el DISPAV de la UNAM en el año de 1999.

1.7.2. Equipos existentes.

De acuerdo al artículo “*Los laboratorios de mecánica de suelos, a 50 años de apoyar la aplicación geotécnica en México*” publicado por Flores; 2007 en las Memorias Conmemorativas del 50 aniversario de La Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Menciona que dentro de la Republica Mexicana existen muy pocos de estos equipos en uso uno de ellos se encuentra en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) para materiales de base, sub-base y de subrasante, es un equipo automatizado y digitalizado. Con las siguientes características:

Sistema Triaxial Cíclico GCTS, el cual tiene las siguientes especificaciones Marco de carga con capacidad de 13 kN; con dos columnas con rosca para el ajuste del cabezal superior, pistón hidráulico de doble acción con capacidad de 13 kN y 50mm de carrera. Incluye también una servo válvula de 19 LPM para el control digital de la carga o la deformación con una frecuencia de 10 Hz. Transductores que se utilizan para la medición de las deformaciones axiales, carga axial, presión de confinamiento, esfuerzo efectivo y/o presión de poro y cambio de volumen; celda de carga con un rango de $\pm 5,000$ N; celda de carga con rango de ± 500 N; LVDT (Sensor de deformación) con rango de ± 25 mm; LVDT (Sensor de deformación) con rango de ± 1.27 mm; transductores diferenciales de presión con rango de 1,000 KPa. (figura 1.12).

El condicionamiento de la señal se lleva a cabo mediante una unidad modular para 10 canales e incluye los siguientes módulos: Módulo para sensores de carga

del tipo de micro-deformación; módulos para sensores de deformación LVDT; módulo para sensores de presión; control para detección de eventos.

Cuenta también con una unidad de servo-amplificación para el control de las servo válvulas con ajustes de ganancia, frecuencia y amplitud de vibración.

El Software es un programa modular de interfase gráfica y ambiente múltiple de ventanas para el servo control del sistema triaxial cíclico con transferencia de control automática.

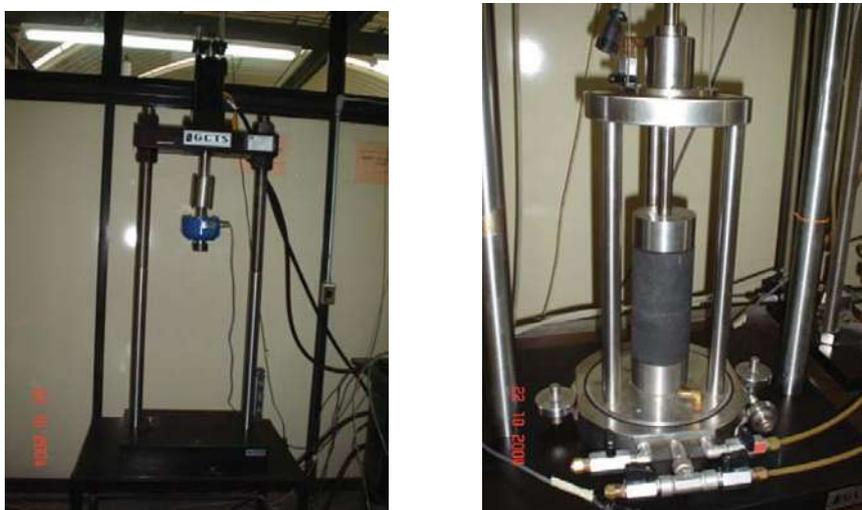


Figura 1.12 Equipo triaxial cíclico de Instituto Mexicano del Transporte

Otros laboratorios que cuentan con este equipo son: el Laboratorio del Doctor Raúl J. Marsal de la C.F.E. El laboratorio de Geotecnia del instituto de Ingeniería de la facultad de Ingeniería de la UNAM y el Laboratorio de Dinámica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de La Cd. Universitaria del D.F. Aunque estos equipos son utilizados para determinar las características dinámicas de los suelos.

La adquisición de este tipo de equipos se hace a través de empresas cuyas matrices están en el extranjero, ya que en el país no hay empresa que los construya o diseñe.

CAPITULO .2

PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DESARROLLADO EN LA U.M.S.N.H.

2.1. Antecedentes del diseño del equipo.

El equipo triaxial cíclico que se desarrolló dentro del Laboratorio “Ing. Luís Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil, de La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se diseño de acuerdo a la normativa AASHTO (T 307 – 99) tomando en cuenta las características de los equipos comerciales.

El equipo triaxial cíclico esta compuesto por varias unidades que se mencionan a continuación y se muestra en la figura 2.1:

1. Panel de conexión, alimentación y acondicionamiento de señal.
2. Instrumentación.
3. Programa de Adquisición de datos.
4. Sistema neumático de aplicación de carga.
5. Unidad de aplicación de carga (Marco y pistón).
6. Sistemas de preparación de la probeta.



Figura 2.1 Equipo triaxial ciclico.

1. Panel de conexión, alimentación y acondicionamiento de señal.

Esta unidad se basa en un Panel de Adquisición de Datos y una PC.

El funcionamiento de esta unidad consiste en recibir la señal de los LVDTs y Celda de carga, después de que la señal sea amplificada y acondicionada por los acondicionadores de señal del panel, para convertirla en voltios. Las salidas de los acondicionadores de los LVDTs y Celda de carga están concentradas dentro del modulo de conexión; de ahí la señal pasa a la tarjeta de adquisición de datos. De ahí es captada por un programa de adquisición de datos elaborado en LABVIEW y así posteriormente realizar el proceso de estos en Excel u otro programa similar. Para la alimentación del panel se requiere una fuente de poder. Se muestra en la figura 2.2 el conjunto del panel de adquisición de datos y la PC.



Figura 2.2 Panel de Conexión y acondicionamiento de señal

El panel de conexión está conformado por un módulo de conexión (a, ver figura 2.3), un acondicionador de señal modelo DLD – V LVDT con excitación de 3 volts RMS @ 5 KHZ, y un rango de voltaje de salida de \pm 5 volts o de 0 – 10 volts de corriente directa (b). Una fuente de poder de 24 volts (c). Se ilustran en la figura 2.3

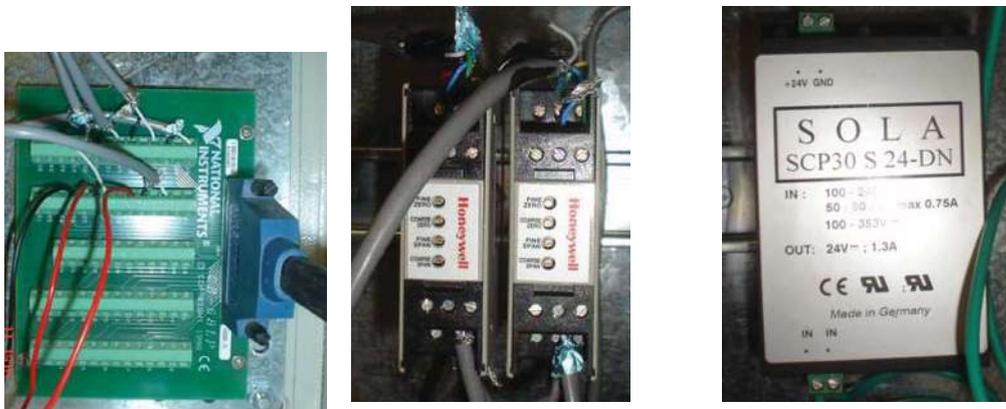


Figura 2.3 (a) Modulo de conexión, (b) Acondicionador de señal, (c) Fuente de poder

También con una tarjeta de Adquisición de datos PCI – 6221 de National Instruments como se muestra en la figura 2.4, con dos canales análogos de salida y 16 canales análogos de entrada con una velocidad de 16 bits (833 kS/s)



Figura 2.4 Tarjeta de Adquisición de datos NI

La PC se utiliza con el fin de apoyar a la adquisición de datos y la presentación de resultados a través del programa Labview en tiempo real.

2. Instrumentación

La instrumentación del equipo consta de dos Transductores Diferenciales Variables Lineales LVDTs (figura 2.5) sus siglas en inglés, que son un dispositivo de sensado de posición que provee un voltaje de salida de corriente alterna proporcional a su desplazamiento, las características de estos son: un rango de + / - 0.020 pulgadas, con una linealidad de 0.21%, excitación de 3.0 VAC @ 5 kHz y 5.4120 MV / V/ MIL factor de calibración. Su función es transmitir las deformaciones medidas a la tarjeta de adquisición de datos.



Figura 2.5 Transductor lineal

Dichos LVDTs están montados en unas abrazaderas especiales que se diseñaron para que estuvieran fijos a los lados del pistón y por fuera de la cámara triaxial (ver figura 2.6).

También esta la celda de carga de acero inoxidable de capacidad de 2000 Lbs con un factor de calibración de 9.999 volts. Montada entre el actuador y el vástago de la cámara. En la figura 2.6 se ilustra la instrumentación del equipo así como su montaje.

La instrumentación y las abrazaderas cumplen con los requisitos citados en la norma AASHTO T 307 – 99.

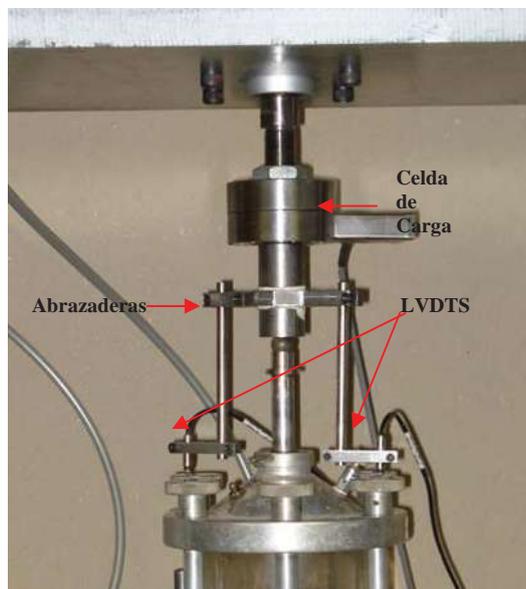


Figura 2.6 Instrumentación del equipo.

3. Programa de adquisición de datos.

Se utilizó el programa Labview para la presentación de la señal recibida de la instrumentación ya que éste, es compatible con la tarjeta de adquisición de datos. En el ambiente de programación de Labview se habla de instrumentos virtuales porque su apariencia y operación imita físicamente los instrumentos. Contiene un conjunto completo de herramientas para el análisis de adquisición y almacenamiento de datos.

Como se mencionó anteriormente la tarjeta recibe la señal y la manda a la computadora. Están conectados los dos LVDTs, la celda de carga y posteriormente se agregara un transductor de presión.

El programa está diseñado para recibir la señal y presentarlas en tiempo real en la pantalla. En pantalla del programa existen dos gráficas: la de la izquierda muestra la respuesta de los transductores en tiempo real y la de la derecha nos sirve para controlar una servo-válvula neumática por medio del envío de una señal en voltios. A continuación se describe con más detalle cada una:

En la primera se recibe la señal de la celda de carga y de los dos Transductores lineales, es por eso que cuenta con dos escalas diferentes, ya que los LVDTs tienen un rango menor de lectura. También existe en la parte inferior izquierda un indicador de velocidad para las lecturas con una precisión a la milésima de segundo y se puede manejar por medio gráfico o numérico con más precisión. De la velocidad de lecturas depende que tan rápido se grafique los datos en tiempo real.

Para distinguir los datos de los diferentes transductores se tienen diferentes colores de líneas, debidamente rotuladas al costado de la gráfica. En la parte superior derecha existen recuadros numéricos que despliegan las señales de los transductores, con el objetivo de tener más precisión en la lectura de la magnitud de la señal y los toma de acuerdo a la velocidad de lectura. Tiene unos interruptores en la parte derecha de los recuadros, con los cuales se activa o desactiva la presencia de la señal en la gráfica de datos.

La segunda gráfica es para mandar la señal a la válvula proporcional, que sirve para controlar dinámicamente la carga del pistón. El botón de generador de carga se prende, con diferentes tipos de curvas para la señal, tiene senoidal, cuadrada, triangular, Sawtooth. Tiene otros indicadores que son: No.

de ciclos por segundo, amplitud y frecuencia. Lo anterior está en función del tipo y frecuencia de la onda de carga que se quiera generar para un determinado ensayo.

El botón de grabado funciona cuando está corriendo el programa, sirve para ir guardando las lecturas. Da la opción de guardarlo en el subdirectorío que uno prefiera en el disco. Se le pone un nombre y lo graba como una hoja de Excel, así ya se pueden manejar las lecturas y los datos para sacar los resultados y darles una presentación dentro de la hoja de cálculo. También importa mucho la velocidad de las lecturas porque así los graba el programa.

Cuenta con un indicador donde marca la hora y fecha de la prueba.

Es obvio que como cualquier programa cuenta con botones de encendido y apagado, para correr el programa o para darlo por terminado.

En la figura 2.7 se presenta la pantalla principal con cada una de las partes mencionadas anteriormente.

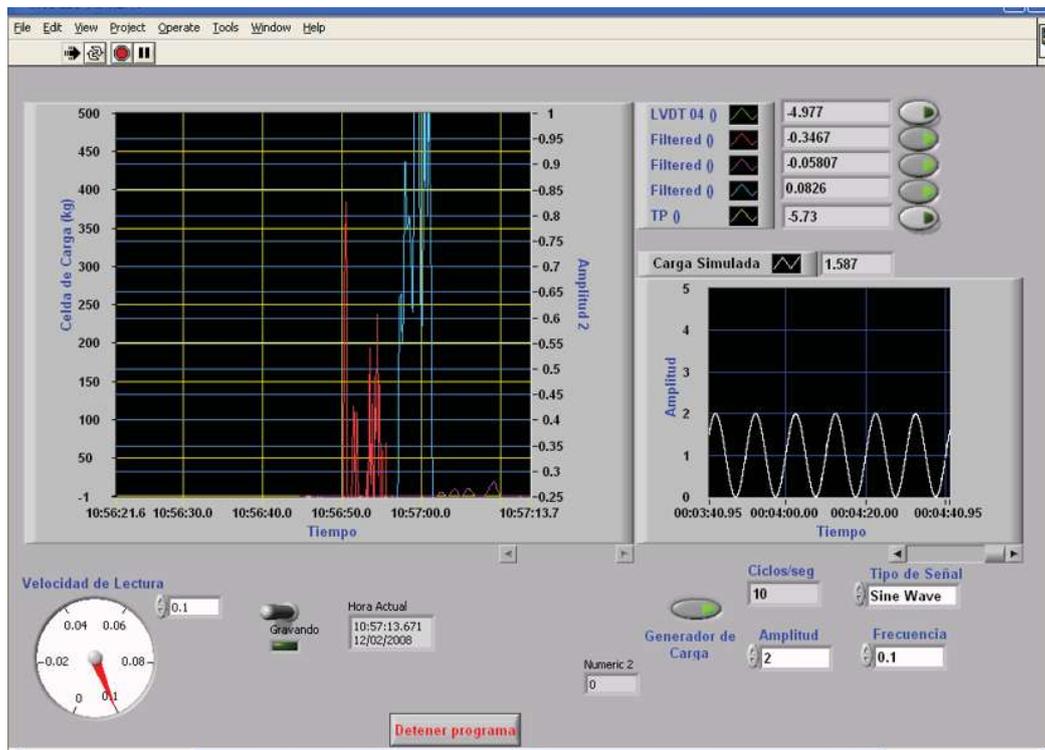


Figura 2.7 Pantalla del programa en LabVIEW

4. Sistema neumático de aplicación de carga

Está compuesto por un panel de control, que es una estructura que tiene un grupo de instrumentos montados sobre ella, los cuales son: botón de encendido/apagado, 4 electro válvulas, un PLC controlador de las electro válvulas, una válvula proporcional que regula la presión a través de un conducto por medio de una señal eléctrica, que puede ser de corriente o de voltaje, un filtro que sirve para quitar el agua que tenga el aire con un regulador de presión y una fuente de poder(ver figura 2.8).

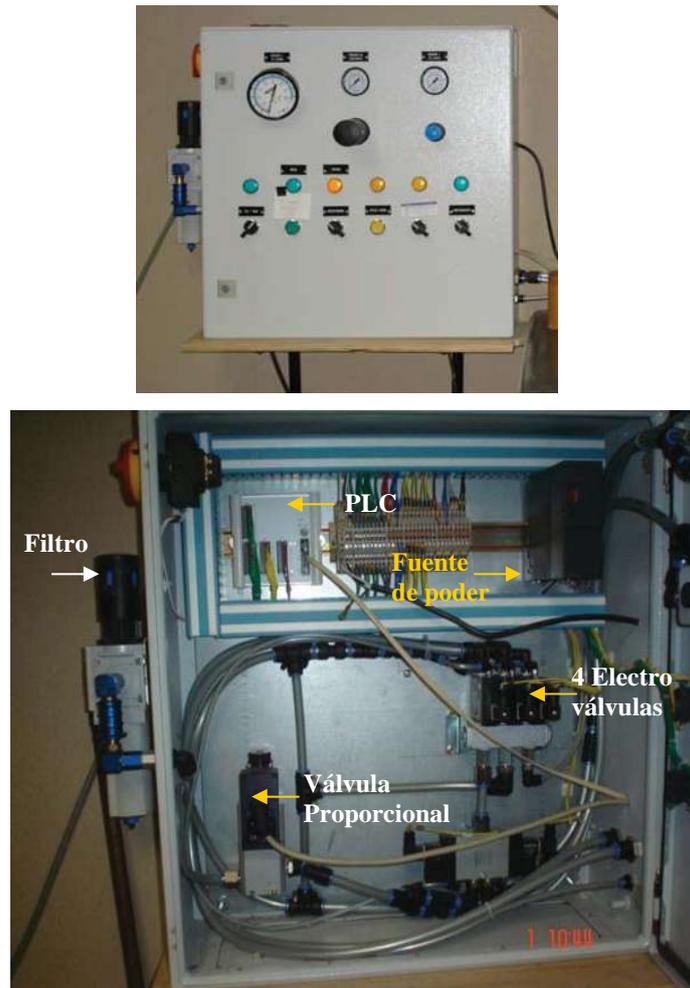


Figura 2.8. Panel de control por fuera y por dentro

El objetivo principal del panel es el de proporcional la presión para que se mueva el actuador. La función más básica es la de activar en carga el pistón o de retraer el pistón, que sirve para el montaje de las pruebas. El aire sigue hasta el pistón o cilindro de carga lo hace bajar, existe otra válvula que al momento de abrirse regresa el pistón a su estado natural. Para el control de la carga cíclica se puede realizar el control de dos formas: la primera mediante el control de la presión mediante la válvula proporcional, y la segunda mediante el control de electro-válvulas por medio de un PLC. La válvula proporcional, como se dijo, se controla mediante el programa de adquisición de datos; mandándole una señal en voltios y la válvula controla la presión de manera proporcional a la señal. Con el PLC se controla el tiempo de la abertura de las electro-válvulas y se programó

para una duración de un pulso la carga de entre 0.1 a 1.0 seg y un ciclo de relajación entre 1.0 y 3.0 seg, de acuerdo a la norma AASHTO T 292 – 97. Una última válvula se utiliza para aplicar la presión de confinamiento al espécimen y se regula a través de un regulador manual. En el diagrama que se presenta en la figura 2.9 se muestra las conexiones en interior del panel.

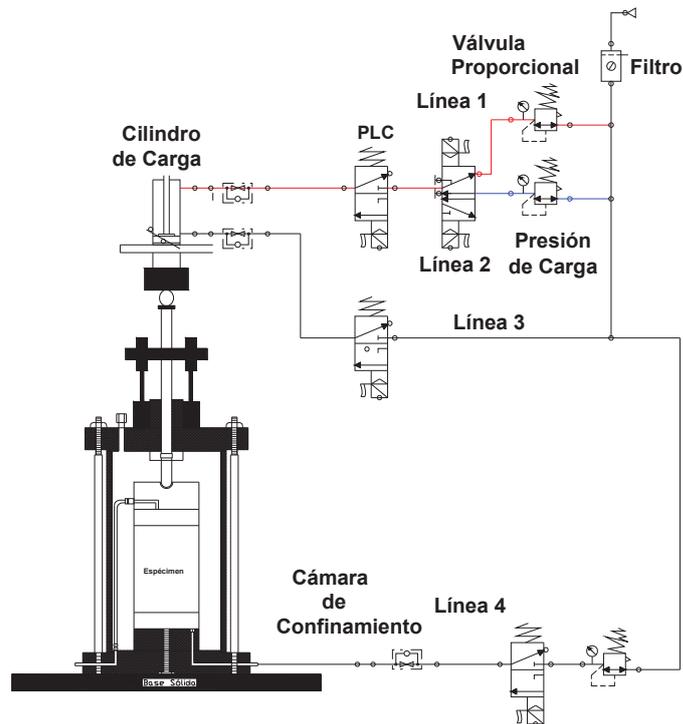


Figura 2.9 Diagrama de flujo del panel de control

La línea 1 es controlada a través del programa de adquisición de datos, mandando la señal a la válvula proporcional, deben de estar las dos válvulas abiertas y así llega al pistón del actuador la presión regulada por la válvula proporcional.

La línea 2 tiene un regulador manual de aire, se pulsa el botón de inicio y este se encarga de abrir la primera válvula para el paso de la presión. La segunda válvula es controlada por el PLC de acuerdo a los tiempos de carga y descarga

previamente programados. Si el PLC manda la señal de abrir la válvula la cámara del pisto se llena inmediatamente de aire a la presión fijada por el regulador. Cuando se cierra la válvula el aire a presión sale por la misma válvula. Con lo anterior se generan 50 pulsos de carga cuando se activa en el panel el control de PLC. Después el mismo PLC se encarga de mandar la señal para abrir la válvula de la línea 3 y el pistón regrese.

La línea 4 en el momento que se abre manualmente lleva la presión a la cámara triaxial para dar la presión de confinamiento. Es regulada manualmente.

5. Unidad de Aplicación Carga (Marco y Pistón)

Consta de un marco de carga, un actuador dinámico cíclico neumático **DNC-125-50-PPV-A** de doble efecto, el diámetro del émbolo es de 125 mm, una capacidad máxima de 10 bar y esto nos da una carga máxima estática de 1,227.1 kg. En la figura 2.10 se muestra un esquema del actuador. Este tipo de actuadores se pueden encontrar con carreras estándar de 500 mm opcionalmente de 2000 mm, en nuestro caso es de 50 mm., con amortiguación regulable en ambos lados o con anillos elásticos en las posiciones finales y rosca exterior en el vástago.

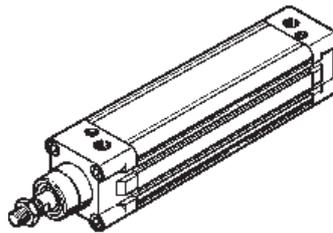


Figura 2.10 Actuador neumático.

Una cámara triaxial para especímenes de dimensiones de 150 mm de altura por 71 mm de diámetro. (Figura 2.11). El marco de carga está diseñado para aplicar cargas de hasta 10 ton, la parte superior se monta en dos vástagos roscados, estos tienen dos tuercas que ayudan a posicionar a una determinada altura el actuador.

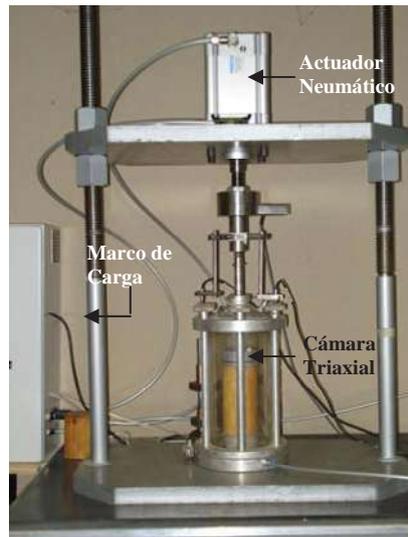


Figura 2.11 Unidad de aplicación de carga

6. Sistemas de preparación de la probeta.

Las probetas se estuvieron fabricando dentro de un molde de acero inoxidable con las siguientes dimensiones: de 76.3 mm. de diámetro interior por 186 mm. de altura, tiene unas abrazaderas por fuera para asegurar bien el espécimen. Se cubrió por la parte de adentro con una membrana de neumático para que a la hora de compactar disminuyera el impacto y la fricción; ya que es un material granular. Las membranas de látex se adquirieron especialmente para las dimensiones de las probetas y tienen un espesor de 1 mm. Para asegurar las membranas a los cabezales del molde se utilizaron o-rings y abrazaderas. Fue necesario utilizar dos membranas, una para compactar y otra para asegurar que la probeta estuviera completamente hermética. Se acondiciona un tubo de PVC de 3" de diámetro de para poder colocar la segunda membrana a través de vacío y facilitar su colocación sin necesidad de tocar el espécimen. El molde y el espécimen con las membranas se muestran en la figura 2.12.

Para la compactación se adaptó un martillo neumático con una longitud de carrera de 6.67 cm. ($2\frac{5}{8}$ "), capaz de aplicar 3,500 impactos por minuto, el

diámetro de la broca es estándar de 401 Parker Taper, el peso de la herramienta es de 1.59 kg. Tiene también un regulador para controlar la presión de la herramienta. Las presiones para las cuales la herramienta está diseñada son: 0.31 @ 6.21 bar al 60% de uso ó 0.52 @ 6.21 bar al 100% de uso. La broca que se utilizó fue especial y tiene las dimensiones siguientes: altura de 210 mm. y una placa al final con un diámetro de 69.6 mm. La placa tiene un espesor de 10 mm. El martillo se conecta a través de una manguera al compresor con conexiones rápidas. El martillo neumático y la broca se muestran en la figura 2.13



Figura 2.12 Molde y membranas de látex



Figura 2.13. Matillo neumático.

2.2. Normativa AASHTO para equipos dinámicos para la obtención del módulo.

En la norma AASHTO T 307 – 99 hace una descripción de qué especificaciones debe de cumplir el equipo y la instrumentación que se utilice para los ensayos de módulo de resiliencia. A continuación se describen los detalles:

♣ **Cámara de triaxial** - La cámara de presión es usada para contener el espécimen de prueba y el fluido confinante durante esta. Una cámara triaxial típica adecuada para el uso de pruebas resilientes es mostrado en la Figura 2.14 La deformación es medida externamente con dos transductores lineares (LVDT) como se muestra en la figura 2.14

♣ Aire deberá ser utilizado en la cámara triaxial como el fluido confinante.

♣ La cámara deberá estar hecha de policarbonato, acrílico o algún otro material “transparente” adecuado para facilitar la observación del espécimen durante la prueba.

♣ **Dispositivo de carga**- el dispositivo de carga deberá ser de carga superior, lazo cerrado, máquina de prueba electrohidráulica o electro neumática con un

generador funcional capaz de aplicar ciclos repetidos de pulso de carga de forma Haversine con las siguientes duraciones:

Tipo de dispositivo de carga	Pulso de carga (s)	Periodo de descanso
Neumático	0.1	0.9 a 3.0
Hidráulico	0.1	0.9

♣ El pulso de carga de forma de Haversine se conformar como la figura 2.15. Todo pre condicionamiento y prueba deberá ser conducido, utilizando un pulso de carga de forma haversine. La forma de onda de haversine generado por el sistema y la forma de onda de respuesta deberá ser mostrada para permitir al operador ajustar los aumentos para asegurar que coinciden durante el pre condicionamiento y prueba.

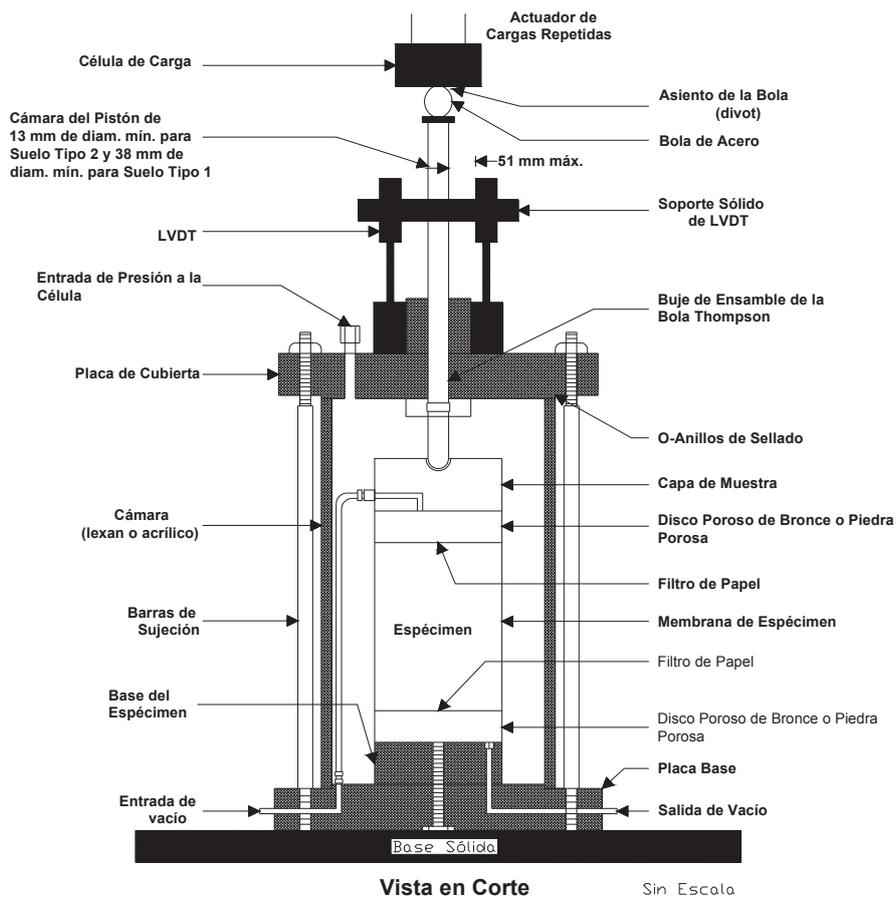


Figura 2.14 Cámara triaxial típica con LVDTs externos y Celda de Carga

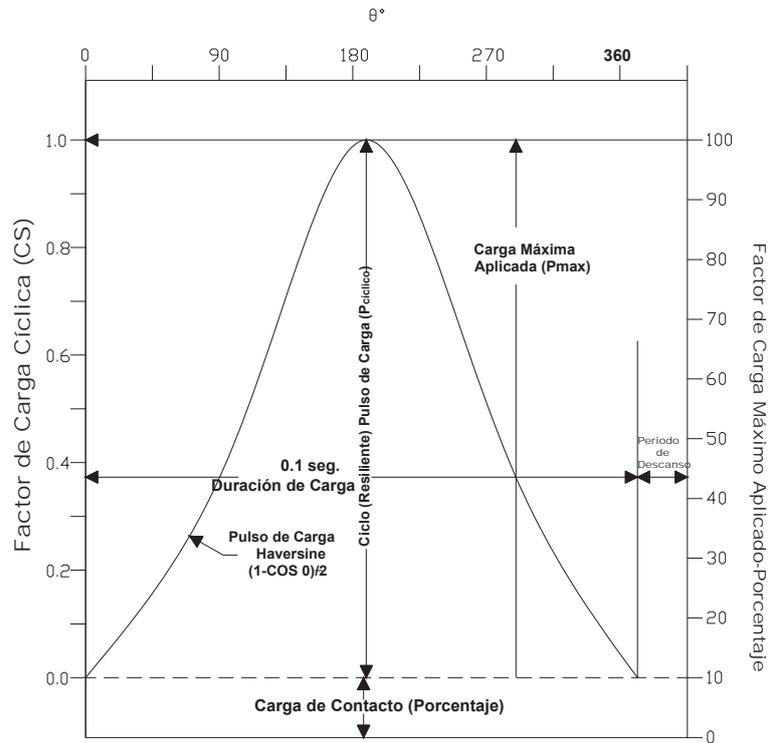
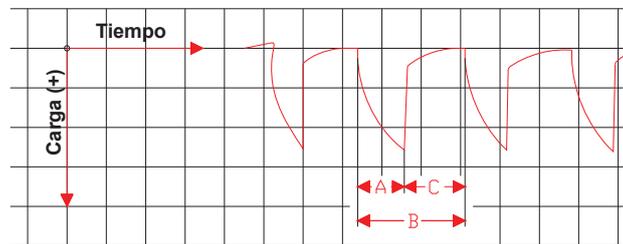
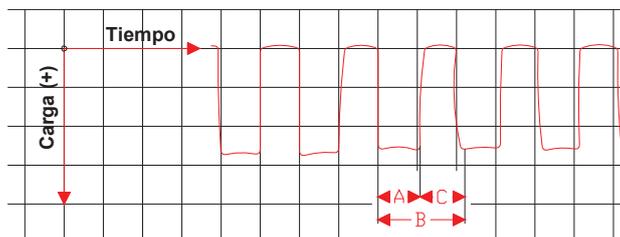


Figura 2.15 Forma de la curva haversine

♣ De acuerdo a la norma AASHTO T 292 – 97, se ajusta el dispositivo de carga por pulso, donde el periodo de carga fija esta dado entre 0.1 y 1.0 seg. Con un periodo del ciclo fijo entre 1.0 y 3.0 seg. Las duraciones de la carga y el ciclo deben ser escogidas para proveer un periodo de relajación de 0.9 seg. entre el final y el comienzo de la carga consecutiva como se muestra en la figura 2.16.



(a)



(b)

Figura 2.16 (a) Forma de onda triangular; (b) Forma de onda rectangular

2.2.1. Carga y Equipamiento para medición de respuesta del espécimen

♣ El dispositivo de medición de carga axial deberá de ser una celda electrónica de carga localizada entre el actuador y la barra del pistón de la cámara como se muestra en la Figura 2.13 Las siguientes capacidades de carga de celda son requeridas:

Diam. Del Especimen (mm)	Cap. Máx. De carga (kN)	Exactitud requerida (N)
71	2.2	±4.5
100	8.0	±10.0
152	22.24	±22.24

Los requerimientos de capacidad de carga y exactitud antes mencionados son aproximadamente lineales cuando son dibujados contra el área de la sección transversal del espécimen. Los requerimientos para las celdas de carga utilizados con otros diámetros de espécimen deberán ser aproximadamente en la misma relación lineal.

Nota 1- Durante los periodos de prueba de módulos resilientes, la celda de carga deberá ser monitoreada y verificada una vez cada dos semanas o después de 50 pruebas con un anillo de pruebas calibrado para asegurar que la celda de

carga opera adecuadamente. Una alternativa al anillo de prueba es insertar una celda de carga adicional calibrada y medir independientemente la carga aplicada por la celda de carga original para asegurar cargas exactas. Adicionalmente, la celda de carga deberá ser revisada en cualquier momento si la prueba del laboratorio indica no conformidad o existe la sospecha de un problema con la celda de carga. La prueba de módulo resiliente no deberá ser conducida si el sistema de prueba resulta estar fuera de calibración o si la celda de carga no se encuentra dentro de los requerimientos de tolerancia del fabricante requeridos para su exactitud, cualquiera de los dos se encuentre en la exactitud más alta.

♣ Las presiones de la cámara de prueba deberán ser monitoreadas con indicadores de presión convencionales, manómetros, o transductores de presión con exactitud de 0.7 kPa.

♣ **Deformación Axial-** el sistema de medición para todos los materiales deberá consistir de 2 LVDT fijos a los lados opuestos de la barra del pistón afuera de la cámara de prueba como se muestra en la figura 2.14. Estos dos transductores deberán ser ubicados equidistantes de la barra del pistón y deberán estar soportados en superficies duras y fijas, las cuales son perpendiculares al eje del LVDT. Los siguientes rangos de LVDT son requeridos:

Diam. Del espécimen (mm)	Rango (mm)
71	±1
100	±2.5
152	±6

Ambos LVDT deberán satisfacer las siguientes especificaciones mínimas:

- Linealidad, ±0.25 por ciento a escala completa
- Capacidad de repetición, ±1 por ciento a escala completa
- Sensibilidad mínima, 2 mv/v (AC) o 5 mv/v (DC)

Los requerimientos para los LVDT utilizados con otros diámetros de espécimen están en la misma relación lineal aproximadamente. Un sistema de deformación digital o de otro tipo con linealidad y especificaciones de capacidad de repetición equivalentes puede ser utilizado en lugar de los LVDT.

♣ Se debe de mantener contacto positivo, durante el procedimiento de prueba, entre los LVDT verticales y la superficie donde la punta de los transductores descansa deberá. Adicionalmente, los dos LVDT deberán ser conectados de manera que cada transductor pueda ser leído y revisado independientemente y los resultados promediados para propósitos de cálculo.

Nota 2- Desalineamiento o polvo en el eje del transductor puede provocar el “pegado” de los ejes del LVDT. El técnico de laboratorio deberá presionar y soltar cada LVDT antes de cada prueba para asegurar que no exista “pegado”. Un lubricante/limpiador aceptable (especificado por el fabricante) deberá ser aplicado al eje del transductor regularmente.

♣ La respuesta de los LVDT deberá ser revisada diariamente con el programa de adquisición de datos del laboratorio. Adicionalmente, los LVDT deberán ser calibrados cada dos semanas, o después de cada 50 pruebas de módulo resiliente, lo que ocurra primero, utilizando un micrómetro con resolución compatible o un juego de bloques de medida especiales trabajados a maquina. La prueba de módulo resiliente no deberá ser conducida si los LVDT no satisfacen los requerimientos de tolerancia de exactitud del fabricante.

♣ Una señal de excitación, un acondicionamiento, y un equipo de grabación datos son requeridos para grabaciones simultáneas de carga axial y deformaciones. La señal debe ser limpia y libre de ruido. Utilizar cables blindados para las conexiones. Si un filtro es utilizado, deberá tener una frecuencia que no atenúe la señal. Los LVDT deberán ser conectados separadamente para que cada

señal de LVDT pueda ser monitoreada independientemente. Un mínimo de 200 puntos de datos para cada LVDT deberá ser grabado por cada ciclo de carga.

♣ **Aparatos diversos** – Estos incluyen calibradores, micrómetro, regla de acero calibrada a 0.5 mm, membranas de hule de 0.25 a 0.79 mm de grosor, O rings de hule, fuente de vacío con cámara de burbujas y regulador, expansor de membrana, piedras porosas (rasante), discos porosos de bronce (base/sub base), escalas, latas de contenido de humedad y formatos, según se requiera.

♣ Sistema de calibración y revisiones periódicas- El sistema entero (transductor, acondicionamiento, y dispositivos de grabación) deberán ser calibrados cada dos semanas o después de 50 pruebas de módulo resiliente utilizando el programa de adquisición de datos del laboratorio. Revisiones diarias y otras revisiones periódicas del sistema también deberán ser realizadas de acuerdo con el programa de adquisición de datos del laboratorio.

2.3. Calibración de los instrumentos.

2.3.1 Calibración de los Transductores lineales

Como se había mencionado anteriormente la salida directa de la señal de los transductores tiene como unidades de milivoltios, para que la señal de salida sea mejor procesada se utiliza un acondicionador de señal, que realiza las funciones de: filtrar, amplificar, posicionar el “offset” y adaptar las resistencias (Chávez, 2004). Una vez acopiada la señal por la tarjeta de adquisición de datos en voltios es entonces cuando se hace la calibración.

La calibración es la relación que existe entre la medición física y el voltaje de salida del transductor. La medición física en este caso será distancia.

La calibración de los LVDT se realiza sujetando el transductor a un soporte especial como se muestra en la figura 2.17, las variaciones de longitud se miden en un micrómetro con aproximación a la μ de pulgada, colocado en una base regulable. El procedimiento consiste en ir variando la altura de la base regulable e ir registrando la señal de salida del transductor en voltaje y las lecturas del micrómetro. Ya que el recorrido del transductor llega hasta el límite máximo, se procedió a variar la altura de regreso hasta llegar al límite mínimo del transductor.

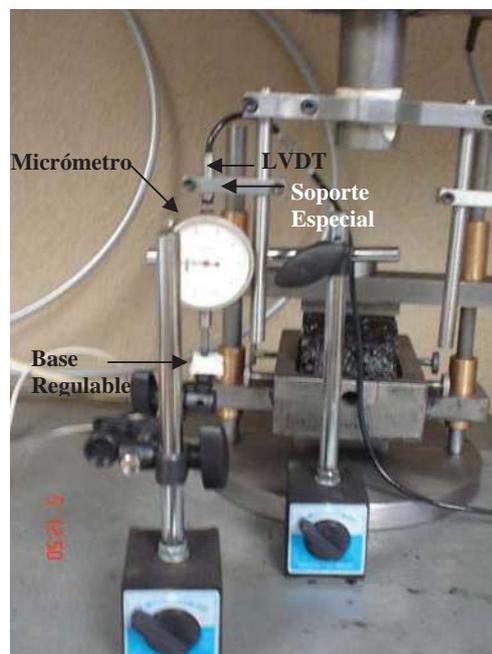


Figura 2.17 Calibración de los transductores.

Terminado el procedimiento de calibración, se obtienen los resultados, se hace una regresión lineal de los datos y se valoran los coeficientes de correlación.

En la Tabla 2.1 se muestran los resultados de calibración tanto de ida como de regreso del LVDT 1.

Tabla 2.1 Resultados del LVDT 1

LVDT-1 (IDA)				LVDT-1 (REGRESO)			
Lectura de Micrómetro		Lec. Del Progr.	promedios (volts)	Lectura de Micrómetro		Lec. Del Progr.	promedios (volts)
(μ)	(mm)	(volts)		(μ)	(mm)	(volts)	
25,00	0,063500	-2,250	-2,300220	576,00	1,463040	3,000	2,982050
50,00	0,127000	-2,000	-2,059713	550,00	1,397000	2,700	2,685276
76,00	0,193040	-1,750	-1,803898	525,00	1,333500	2,450	2,464880
101,00	0,256540	-1,500	-1,557703	500,00	1,270000	2,220	2,217130
128,00	0,325120	-1,300	-1,311624	474,00	1,203960	1,980	1,967806
150,00	0,381000	-1,000	-1,094610	447,00	1,135380	1,700	1,705260
176,50	0,448310	-0,830	-0,826078	423,00	1,074420	1,480	1,477815
200,00	0,508000	-0,600	-0,594959	398,00	1,010920	1,250	1,253099
226,50	0,575310	-0,350	-0,352833	374,00	0,949960	1,000	0,994969
250,00	0,635000	-0,120	-0,115794	348,00	0,883920	0,780	0,784868
279,00	0,708660	0,200	0,159237	324,00	0,822960	0,550	0,526508
300,00	0,762000	0,350	0,367233	298,00	0,756920	0,300	0,284890
325,00	0,825500	0,600	0,590699	274,00	0,695960	0,050	0,026947
352,50	0,895350	0,850	0,854308	247,50	0,628650	-0,200	-0,213676
376,00	0,955040	1,100	1,098540	224,00	0,568960	-0,400	-0,435893
402,00	1,021080	1,300	1,351559	198,00	0,502920	-0,650	-0,678203
426,00	1,082040	1,580	1,564645	173,00	0,439420	-0,920	-0,970576
451,00	1,145540	1,800	1,812578	146,00	0,370840	-1,190	-1,197001
478,00	1,214120	2,080	2,085879	122,00	0,309880	-1,410	-1,420859
504,00	1,280160	2,300	2,313141	98,00	0,248920	-1,650	-1,697253
525,00	1,333500	2,500	2,509648	74,00	0,187960	-1,870	-1,882125
550,00	1,397000	2,700	2,741120	48,00	0,121920	-2,120	-2,160554
570,00	1,447800	2,950	2,963829	24,00	0,060960	-2,350	-2,366006
578,50	1,469390	2,980	2,992988	0,00	0,000000	-2,600	-2,601103

En la figura 2.18 se muestra la curva de calibración del LVDT 1 con su respectiva ecuación y coeficiente de correlación.

Los resultados de transductor 2 se presentan en la tabla 2.2. También son las lecturas de ida y regreso de las alturas. Su curva de calibración se muestra en la figura 2.19 con su respectivo coeficiente de correlación y ecuación.

Las constantes que se obtuvieron en las ecuaciones de regresión, se agregaron dentro del programa ya que el coeficiente de regresión que se obtuvo fue muy bueno cercano a 1, así las lecturas de los transductores dentro de las gráficas e indicadores se encuentran en milímetros.

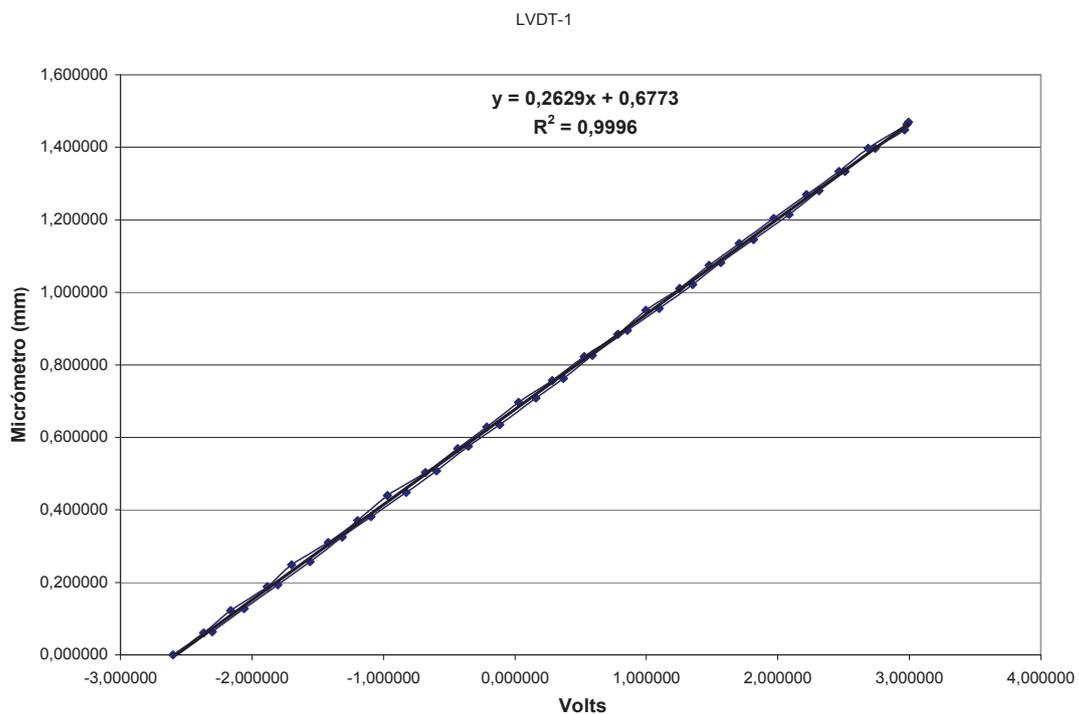


Figura 2.18 Curva de calibración del LVDT 1

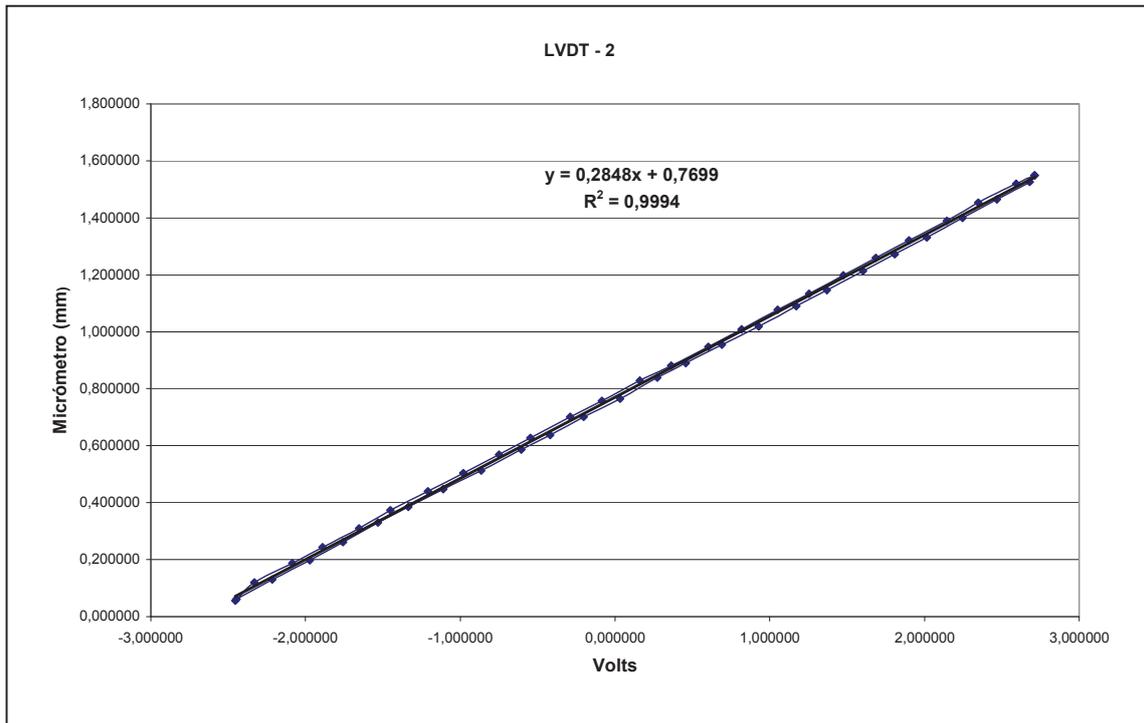


Figura 2.19 Curva de calibración del LVDT 2

2. 3.2. Calibración de la celda de carga.

La calibración de la celda de carga, se hizo aplicando ciclos de carga en contra de la presión aplicada al pistón, se realizó en el mismo marco de carga y con el actuador neumático, se colocó un espécimen de madera con las mismas dimensiones que deben tener los especímenes de prueba de 75 mm de diámetro por 150 mm de altura. La medición física en este caso fue de carga, la variación de lecturas se hizo en incrementos de la presión hasta llegar a la máxima de 4 kg/cm² en el sistema neumático de aplicación de carga. El manómetro de la presión sus unidades son de Kg./cm². Se fueron registrando las lecturas tanto de presión como de la carga. Se hizo una correlación de los datos obtenidos y se tuvieron los siguientes resultados que se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.2 Resultados del LVDT 2

LVDT-2 (IDA)				LVDT-2 (REGRESO)			
Lectura de Micrómetro		Lec. Del Progr. (volts)	promedios (volts)	Lectura de Micrómetro		Lec. Del Progr. (volts)	promedios (volts)
(μ)	(mm)			(μ)	(mm)		
24,00	0,060960	-2,450	-2,445620	610,00	1,549400	2,710	2,709116
51,00	0,129540	-2,220	-2,215634	598,00	1,518920	2,590	2,591623
78,00	0,198120	-1,980	-1,972977	572,00	1,452880	2,350	2,346486
103,00	0,261620	-1,750	-1,757906	547,00	1,389380	2,150	2,143943
130,00	0,330200	-1,530	-1,530949	520,00	1,320800	1,910	1,899154
151,50	0,384810	-1,330	-1,336065	496,00	1,259840	1,690	1,683825
176,00	0,447040	-1,110	-1,110010	472,00	1,198880	1,480	1,474716
202,00	0,513080	-0,860	-0,865203	446,00	1,132840	1,250	1,254625
231,00	0,586740	-0,610	-0,605526	424,00	1,076960	1,050	1,050236
251,00	0,637540	-0,420	-0,418365	397,00	1,008380	0,810	0,817865
276,00	0,701040	-0,200	-0,203039	373,00	0,947420	0,590	0,602839
301,00	0,764540	0,030	0,033768	347,00	0,881380	0,350	0,362562
330,00	0,838200	0,270	0,274114	326,00	0,828040	0,150	0,159375
350,50	0,890270	0,450	0,457692	298,00	0,756920	-0,090	-0,083791
376,00	0,955040	0,700	0,691518	276,00	0,701040	-0,280	-0,289868
401,00	1,018540	0,920	0,929367	247,00	0,627380	-0,530	-0,547070
429,00	1,089660	1,170	1,171102	224,00	0,568960	-0,740	-0,749724
451,00	1,145540	1,360	1,369295	198,00	0,502920	-0,970	-0,979224
478,00	1,214120	1,610	1,602267	173,00	0,439420	-1,200	-1,208632
501,00	1,272540	1,810	1,807606	147,00	0,373380	-1,450	-1,451567
524,00	1,330960	2,010	2,015420	122,00	0,309880	-1,650	-1,654613
551,00	1,399540	2,240	2,245434	96,00	0,243840	-1,880	-1,889663
576,50	1,464310	2,460	2,467239	74,00	0,187960	-2,090	-2,085172
601,00	1,526540	2,670	2,679125	47,00	0,119380	-2,310	-2,329980
610,00	1,549400	2,710	2,711406	22,00	0,055880	-2,450	-2,452257

Tabla 2.3 Lecturas tomadas para la calibración de la celda de carga.

Presión Kg/cm²	Celda de Carga. (Kg)
0,2	15,533
0,5	45,210
1,0	92,998
1,5	146,128
2,0	194,950
2,5	247,016
3,0	292,155
3,5	333,145
4,0	367,381

Se realizó un comprobación multiplicando la presión por el diámetro del embolo del actuador neumático, con la mismas presiones para así ver la respuesta de este y hacer una comparativa entre las dos calibraciones, tanto de la celda de carga como la del embolo. Las lecturas se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Lecturas tomadas para la calibración del embolo del actuador.

Presión Kg/cm²	Embolo (Kg)
0,2	24,542
0,5	61,355
1,0	122,71
1,5	184,065
2,0	245,42
2,5	306,775
3,0	368,13
3,5	429,485
4,0	490,84

Para ver más claro la comparación de las dos calibraciones en la figura 2.20 se observa las dos líneas de correlación de cada uno con su respectiva ecuación así como su coeficiente de correlación.

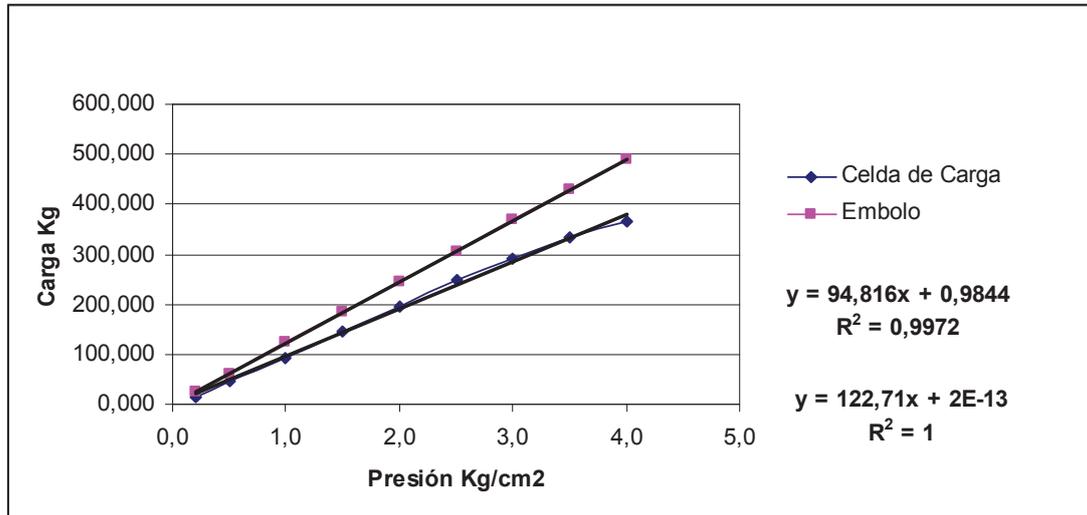


Figura 2.20 Curva de calibración de la celda de carga y embolo.

La correlación de la recta del embolo sale perfecta eso quiere decir que con esas presiones se tiene la carga que se indica. Existe una diferencia entre las dos rectas y esto se refleja en el coeficiente de correlación, debido a que existe una pequeña pérdida de carga en la fricción entre el pistón de la cámara triaxial con la misma cámara, pero aun así el coeficiente de correlación no es malo ya que esta muy cercano a uno por lo que se toma como buena la calibración de la celda de carga.

Al dar por buenas las calibraciones se toman las constantes de la ecuación de la celda de carga, para utilizarlas en el programa y que los datos que se muestran tanto gráficamente como numéricamente sean en kilogramos.

CAPITULO 3.

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

El objetivo de este trabajo de investigación es la puesta a punto del Equipo Triaxial Cíclico. Para llegar a ésta; se caracterizó una mezcla de material de banco que cumpliera con los requisitos establecidos en las normas SCT para materiales de capas de Sub-base, se utilizó para conformar las probetas de estudio.

3.1. Caracterización del material

3.1.1 Ubicación del Banco

El material que se utilizó para realizar de los ensayos, fue extraído del Banco de materiales “Cerritos”. De acuerdo al inventario de bancos de materiales 2006 que realizó la Unidad General de Servicios Técnicos, de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes. El Banco de Materiales “Cerritos” cuenta con las siguientes características: Su ubicación es en la carretera Morelia – Jiquilpan en el Km. 16+000, a 500 metros del lado derecho de la carretera en el sentido del cadenamiento Figura 3.1. La propiedad de éste es Ejidal, el material es un tezontle y el tratamiento al que generalmente debe quedar sujeto dicho material es a través del triturado parcial y cribado.

Del material del banco analizado, se procedió a elaborar una mezcla que cumpliera con los requisitos de calidad establecidos en la norma de la SCT para capas de Sub-base (N-CMT-4-02-001/04). Lo anterior se llevó a cabo ya que el material de banco no cumplía con los requisitos para capas de sub-base, por lo que se decidió a elaborar dicha mezcla cuyos porcentajes son: material Básico 50% y material Arena 50%, siendo los dos materiales extraídos del mismo banco.

a) Granulometría.

Para la mezcla mencionada anteriormente se utilizaron dos materiales los cuales se denominaron como material A para base y material B para la arena (ver Figura 3.2).



Figura 3.2 Material A y material B respectivamente

Se estudiaron los dos materiales por separados para sacar sus granulometrías de acuerdo a la norma M-MMP-1-06/03 de la SCT y así poder obtener el porcentaje adecuado para la mezcla. En la Tabla 3.1 y en la Figura 3.3, se presenta la granulometría del material A.

Tabla 3.1 Granulometría del material A

MALLA	Abertura mm.	% Que Pasa la malla
2"	50.80	100.00
1 ½"	36.10	100.00
1"	25.40	85.80
¾"	19.05	51.62
3/8"	9.52	5.39
No. 4	4.76	1.24
10	2.00	0.61
20	0.84	0.59
40	0.42	0.56
60	0.25	0.50
100	0.149	0.42
200	0.074	0.33

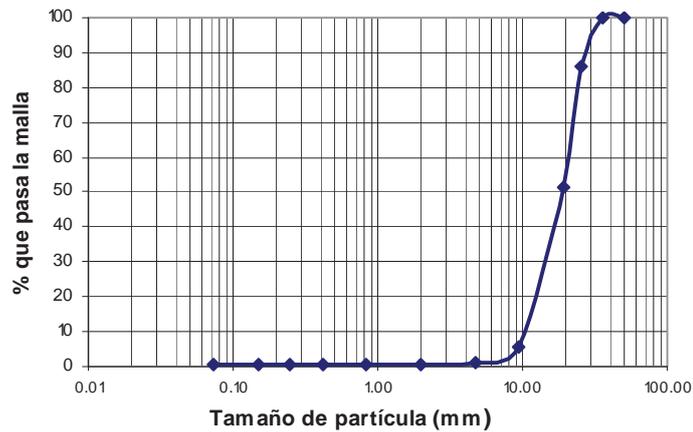


Figura 3.3. Curva Granulométrica del material A

En la tabla 3.2. y en la figura 3.4 Se presenta la granulometría del material B

Tabla 3.2. Granulometría del material B

MALLA	Abertura mm.	% Que Pasa la malla
10	2.00	74.32
20	0.84	31.24
40	0.42	13.39
60	0.25	7.61
100	0.149	5.20
200	0.074	2.68

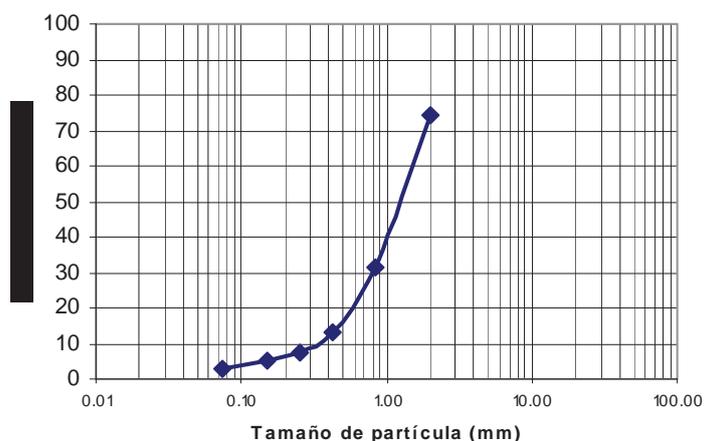


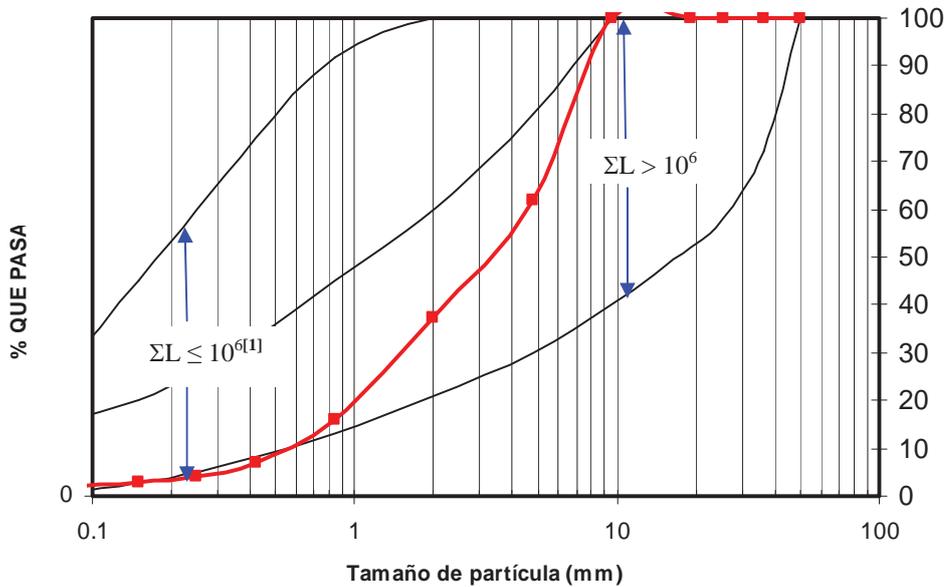
Figura 3.4 Curva Granulométrica del material B

De acuerdo a lo observado en dichas granulometrías, se llegó a la conclusión de que la mezcla debería de ser 50% de material A y 50% de material B para que estas pudieran cumplir con los requisitos de calidad de la norma para capas de Sub-bases. Tomando en cuenta como tamaño máximo de 9.52 mm para la fabricación de las probetas ya que éste debe de ser 1/6 del diámetro del molde.

En la tabla 3.3 se tiene los valores de la granulometría y en la figura 3.5 se muestra la curva granulométrica de la mezcla que esta dentro de las zonas recomendables para materiales de sub-base.

Tabla 3.3 Granulometría de la mezcla

MALLA	Abertura mm.	% Que Pasa la malla
2"	50.80	100
1 ½"	36.10	100
1"	25.40	100
¾"	19.05	100
3/8"	9.52	100
No. 4	4.76	65.15
10	2.00	39.53
20	0.84	17.15
40	0.42	8.10
60	0.25	5.28
100	0.149	3.90
200	0.074	2.23



[1] L = Número de ejes equivalentes acumulados de 8.2 t esperado durante la vida útil del pavimento

Figura 3.5 Curva Granulométrica de la mezcla dentro de las zonas granulométricas recomendables de los materiales para sub-bases (SCT)

b) Densidades Relativas y Absorción. (M-MMP-1-05/03)

Estas pruebas permiten determinar las relaciones masa – volumen de los materiales respecto a la relación masa – volumen del agua, así como la absorción de los materiales. Se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por la mezcla de los materiales en sus diferentes condiciones de contenidos de agua y el cambio de masa del material debido a la entrada de agua en sus poros, con respecto a su condición en estado seco.

c) Límites de Consistencia (M-MMP-1-07/07)

El objetivo de este ensaye es el de conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales que pasan la malla no. 40 (0,425 mm) cuando se modifica su contenido de agua, cuyos resultados se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. Las pruebas consisten en determinar el

límite líquido, es decir, el contenido de agua mínimo en cual desaparece su resistencia a esfuerzo cortante. El límite plástico que es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites mencionados. En la Figura 3.6 los límites de consistencia señalan las fronteras de los diferentes estados en que se encuentra el suelo dependiendo de su contenido de humedad.

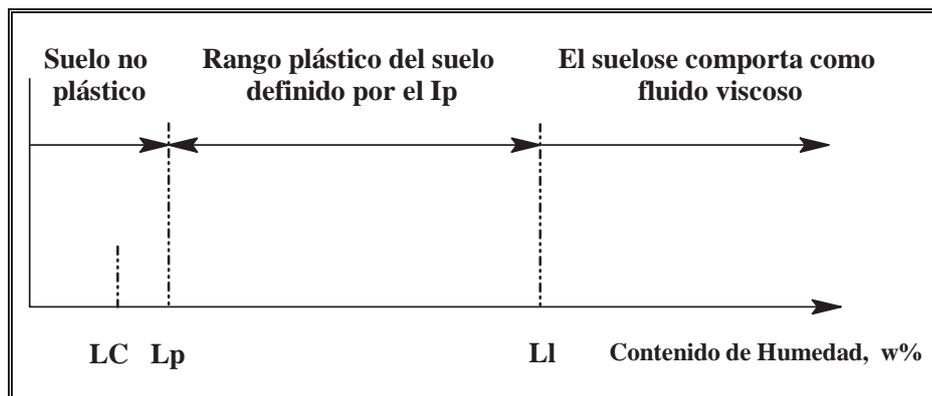


Figura.3.6 Localización relativa de los límites de contracción, plástico y líquido Sobre la escala de contenido de humedad (Bowles, 1980)

d) Contenido de agua. (M-MMP-1-04/03)

Esta prueba se realiza para tener un control sobre la humedad del material, con el fin de tener una idea cualitativa de su consistencia o de su probable comportamiento. La prueba consiste en determinar el porcentaje de la masa de agua con relación a la masa de los sólidos. Es un factor importante para los ensayos triaxiales cíclicos.

e) Equivalente de Arena (M-MMP-4-04-004/02)

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos. La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra de material pétreo que pasa la malla no. 4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla.

f) Desgaste de los Ángeles. (M-MMP-1-04-006/02)

El objetivo de esta prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla no 12 (1,7 mm de abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento.

g) Compactación AASHTO (M-MMP-1-09/06)

Las pruebas permiten determinar la curva de compactación de los materiales y a partir de ésta inferir su masa volumétrica seca máxima y su contenido de agua óptimo. Consisten en determinar las masas volumétricas secas de un material compactado con diferentes contenidos de agua, mediante la aplicación de una misma energía de compactación en prueba dinámica y graficando los puntos correspondientes a cada determinación, trazar la curva de compactación del material.

h) Valor Relativo de Soporte

La prueba consiste en penetrar un pistón circular de 1935 mm² (3in²) de sección transversal en un suelo, en un contenedor especial a una tasa de 1mm/min (0.05 in/min),. A partir de esto se obtiene el Valor relativo de soporte del suelo que se define como la relación, expresada como porcentaje, entre la presión necesaria para penetrar y la presión requerida para tener la misma penetración en un material patrón.

En la tabla 3.4 Se tienen todos los resultados de la mezcla 50% - 50% del material en estudio.

Tabla 3.4 Resultados de la caracterización del material-

Propiedad	Valor
Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS)	1.2781 gr./cm ³
Absorción	4.22 %
Densidad	2.35%
Desgaste	27 %
Peso Volumétrico Seco Máximo (PVSM)	1.6442 gr./cm ³
Humedad optima	7.53 %
Valor Relativo Soporte (VRS)	90.7 %
Equivalente de arena	86 %
Limite Liquido	Inapreciable
Limite plástico	Inapreciable
Índice Plástico	Inapreciable

En la tabla3.5 Se muestran los requisitos de calidad de los materiales para sub-bases de pavimentos asfálticos de acuerdo a la norma N-CMT-4-02-001/04

Tabla 3.5 Requisitos de calidad de los materiales para subbases (N-CMT-4-02-001/04)

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite Líquido ^[2] , máximo	30	25
Índice plástico ^[2] , máximo	10	6
Valor Soporte de California ^[2,3] , mínimo	50	60
Equivalente de Arena ^[2] , mínimo	30	40
Desgaste de los Ángeles ^[2] , máximo	50	40
Grado de compactación ^[2,4] , mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes acumulados, de 8.2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en esta norma.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta tabla

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO modificada-

Haciendo una comparativa entre los datos obtenidos en la caracterización de la mezcla del material en estudio y los requisitos de calidad se dice que, el material cumple para una sub-base.

CAPITULO 4.

MÓDULOS DE RESILIENCIA EN TEZONTLE

La investigación efectuada tuvo como objetivo principal realizar la puesta a punto del equipo triaxial cíclico. Esto no nada mas se hizo con la calibración de la instrumentación del equipo, sino también, fue importante la realización de pruebas triaxiales para observar el comportamiento de éste. Las probetas en estudio fueron dos, una de madera y la otra con la mezcla del material caracterizado del banco de cerritos, ambas con las dimensiones mencionadas en la norma AASHTO T 292-97.

4.1. Descripción de la prueba

A continuación se hace una descripción de la preparación del espécimen de prueba, previo al ensaye triaxial cíclico:

a) Se realizó el cuarteo de la mezcla del material, para contar con el suficiente y que este sea representativo.

b) Para especímenes compactados en laboratorio, un mínimo del 90% de la masa del material para preparar el espécimen de prueba, debe tener como tamaño máximo de partícula, $\frac{1}{6}$ del diámetro del espécimen. La longitud del espécimen no debe de ser menor de dos veces el diámetro. El diámetro como mínimo del espécimen es de 71 mm.

c) De acuerdo al volumen del molde para el ensaye en la maquina triaxial, el peso volumétrico seco máximo de la mezcla del material, humedad optima, obtenidos en la caracterización de ésta. Se hacen los cálculos necesarios para obtener el material requerido para rellenar el molde, así como el agua necesaria

para agregarle al material. También se hace el cálculo del número de capas necesarias para llenar el molde a las que se va a realizar su compactación

d) Se pesa el material requerido y se humedece con el agua calculada anteriormente, se deja reposar el material.

e) Se prepara el molde, engrasando sus paredes para evitar que se pegue a las membranas de látex. Se pone la membrana de compactación en la base de la cámara triaxial sujetándola con un O-ring. Se coloca el molde, se sujeta la membrana en la parte superior del éste, dicha membrana servirá para el soporte del espécimen, todo esto ya en la base del la cámara triaxial

f) Se divide y se pesa el material requerido en tres partes siendo este el número de capas a las que se va a compactar. Se introduce la primera capa cuidadosamente dentro del molde ya con la membrana,

g) La compactación se hace a través del martillo neumático descrito en capítulos anteriores. Con el propósito de simular la compactación vibratoria realizada en campo. Se abre todo el regulador de presión del martillo, se procede a compactar el material por un tiempo aproximado de 1 min. 20 seg. o hasta que el material ya no baje lo que suceda primero. En la figura 4.1 se ilustra el procedimiento de compactación.

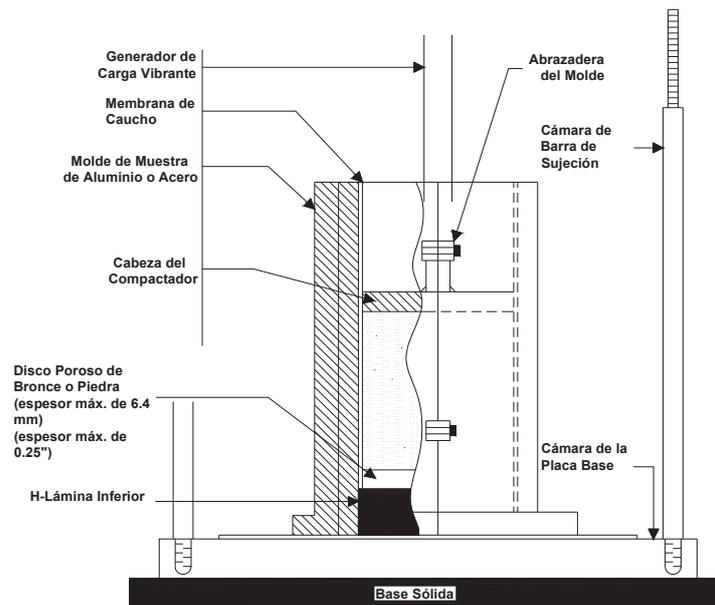


Figura 4.1. Aparato típico para compactación vibratoria

h) Después de haber sido compactado el material se procede a enrazar, quitar el excedente de la parte superior y colocar el cabezal. Se retira el molde con mucha precaución sin que se vaya a fracturar el espécimen.

i) En un tubo de PVC de 3 1/2" de diámetro de instalación hidráulica, se coloca la segunda membrana de látex, esta se coloca por si la primera haya sufrido alguna ruptura a la hora de compactar. A través de vacío se introduce al espécimen recién compactado. Se sujeta en la parte superior e inferior con O-rings y con abrazaderas, esto asegura que al espécimen no le entre aire al estar probándolo.

j) Se coloca la cámara triaxial, atornillando y asegurando de que quede bien hermética. El vástago de la cámara debe quedar bien centrado y sujetando el cabezal del espécimen. Se enciende el panel de adquisición de datos, el panel de control y la PC. De ahí se procede a colocarse en el marco de carga donde se centra bien la cámara triaxial en el pistón (ver figura 4.2), se conecta la manguera para el confinamiento y se abre la válvula para aplicarlo. Se colocan los

transductores de deformación lineal en las abrazaderas para su sujeción, estos deben de hacer contacto con los tornillos de la cámara. Se verifican que estén bien colocados en el programa de adquisición de datos.



Figura 4.2 Montado de la cámara triaxial

k) Ya montada la cámara triaxial, los LVDT y verificados se procede a realizar la prueba de módulo resiliente.

A continuación se describe la prueba de modulo resiliente de acuerdo a la norma AASHTO T 292-97.

Prueba de resiliencia para materiales granulares- El Procedimiento para esta sección son utilizados para especímenes de suelo de rasante granulares y materiales de base y sub base.

1. Se ajusta el dispositivo de carga para producir una duración de carga fija entre 0.1 y 1.0 segundos y una duración de ciclo fijo entre 1.0 y 3.0 segundos. Las duraciones de carga y de ciclo deberán ser escogidas para proveer un periodo mínimo de relajación de 0.9 segundos entre el final y el principio de repeticiones de carga consecutivas

Nota 1. Las propiedades resilientes de especímenes granulares son afectadas significativamente por la presión de confinamiento. Por lo tanto, los especímenes

granulares deberán ser probados arriba del rango de presiones de confinamiento esperadas en las capas de rasante o base/sub base.

2. Se Comienza la prueba aplicando 1000 repeticiones de una carga desviadora de 83 kPa (12 psi) para especímenes de suelos de rasante o 103 kPa (15psi) para especímenes de material de base/sub base. Las presiones de confinamiento que serán utilizadas para estas repeticiones son iguales a los niveles más altos de las secuencias de prueba. Esto constituye el condicionamiento del espécimen.

3. El proceso de condicionamiento del espécimen puede causar distorsiones severas o falla de algunos especímenes. Se debe a la tensión axial permanente durante las ultimas 900 repeticiones que excede el 1%, la carga desviadora deberá ser ajustada de manera que la relación de esfuerzos principal (S_1/S_3) este limitado al 50% del radio de carga crítico del material. La relación de carga crítico está en función del ángulo de fricción del material, el cual puede ser determinado por cualquier método de prueba apropiado.

Nota 2. Para materiales granulares, el número máximo de repeticiones necesarias permanecerá constante para todos los niveles de cargas desviadoras a una presión confinante particular pero debe de determinarse otra vez cuando la presión de confinamiento sea cambiada.

4. Para determinar el número máximo de repeticiones necesarias, compare las deformaciones axiales recuperables a las 20 y 50 repeticiones. Si la diferencia es menor del 5 % del más pequeño, grabe la deformación axial recuperable promedio de las últimas cinco repeticiones. Si la diferencia es mayor del 5% aplique 50 repeticiones adicionales en este estado de carga. Repita la comparación para las 50 y 100 repeticiones. Continué aplicando juegos adicionales de 50 repeticiones y repitiendo la comparación entre la ultimas y 50 repeticiones previas, hasta que la diferencia sea igual o menor al 5% del valor más pequeño. Cuando este criterio

7. Se Incrementa la carga desviadora al siguiente nivel deseado y disminuya la presión de confinamiento, continúe el proceso hasta que la prueba haya sido completada para todos los estados de carga deseados.

8. Si una contrapresión fue utilizada, redúzcala a cero, luego reduzca la presión de confinamiento a cero.

9. Se desarma la cámara triaxial y se remueven todos los aparatos del espécimen.

10. Se procede a hacer cálculos.

$$\text{Deformacion Unitaria} = \frac{\text{Deformacion Axial(mm)}}{\text{long.Inicial(mm)}}$$

$$Mr = \frac{\text{Esfuerzo Desviador } \sigma_d \text{ (KPa)}}{\text{Deformacion Unitaria}}$$

$$\theta = S_d + 3(S_3)$$

Donde:

Θ = Esfuerzo Invariante (KPa)

S_d = Esfuerzo desviador (KPa)

S_3 = Presión de confinamiento (KPa)

El reporte de pruebas en materiales granulares debe de incluir la gráfica de Módulo resiliente contra Esfuerzo Invariante en escalas logarítmicas. También debe de incluirse la ecuación de regresión y el coeficiente.

$$Mr = k_1 \theta^{k_2}$$

Donde:

K_1 y k_2 = Son constantes de la regresión y son adimensionales.

4.2. Ensayos realizados.

Se hicieron dos ensayos una en un pedazo de madera con las siguientes dimensiones: 150 mm de altura por 74.92 mm de diámetro. (Ver figura 4.3)



Figura 4.3. Prueba en la madera.

Se toma como ejemplo la secuencia 5 para observar las gráficas que se obtuvieron.

En la Figura 4.4 está la gráfica deformación unitaria contra tiempo de la secuencia 5 y se observa la respuesta de los LVDT.

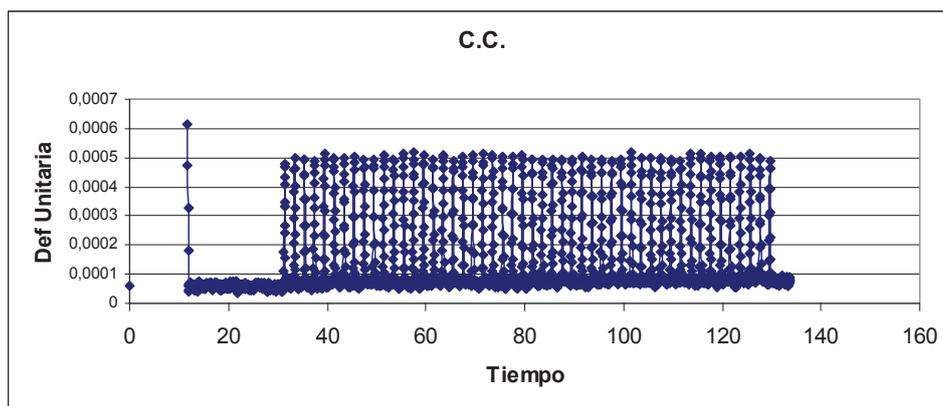


Figura 4.4. Gráfica deformación unitaria contra tiempo Sec 5.de la prueba en madera

En la Figura 4.5 esta la gráfica esfuerzo kPa contra tiempo de la secuencia 5 y se observa la respuesta de la celda de carga.

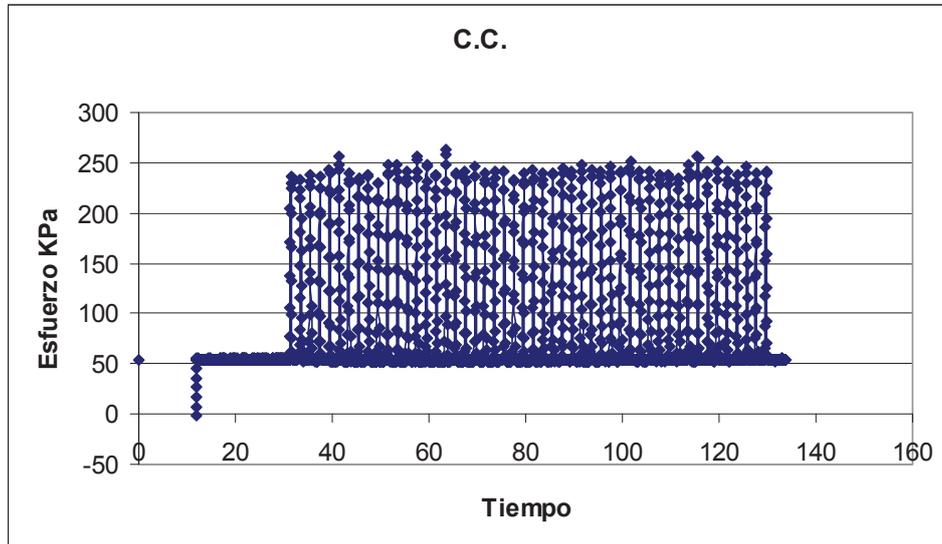


Figura 4.5. Gráfica Esfuerzo contra tiempo Sec 5.de la prueba en la madera

Es importante el observar el como se da la respuesta del Módulo resiliente de todos los datos, en la Figura 4.6 esta la gráfica deformación unitaria contra esfuerzo kPa de la secuencia 5.

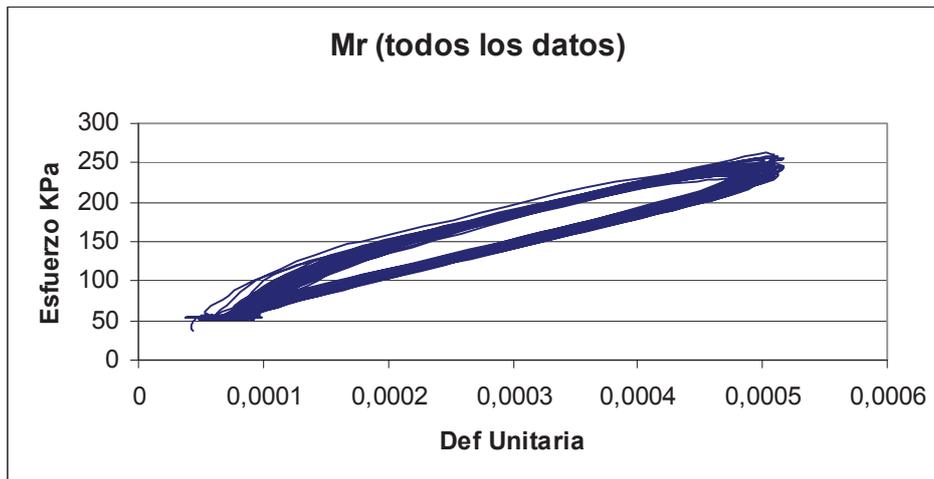


Figura 4.6. Gráfica Módulo resiliente de todos los datos de la Sec 5 de la prueba en la madera

La otra prueba que se realizó fue en la mezcla de material donde la probeta tenía las siguientes dimensiones: 148.3 mm de altura por 77.23 mm de diámetro (Ver figura 4.7)



Figura 4.7. Prueba en el material.

Se toma como ejemplo la secuencia 4 para observar las gráficas que se obtuvieron.

En la Figura 4.8 esta la gráfica deformación unitaria contra tiempo de la secuencia 4, se observa la respuesta de los LVDT como va la deformación.

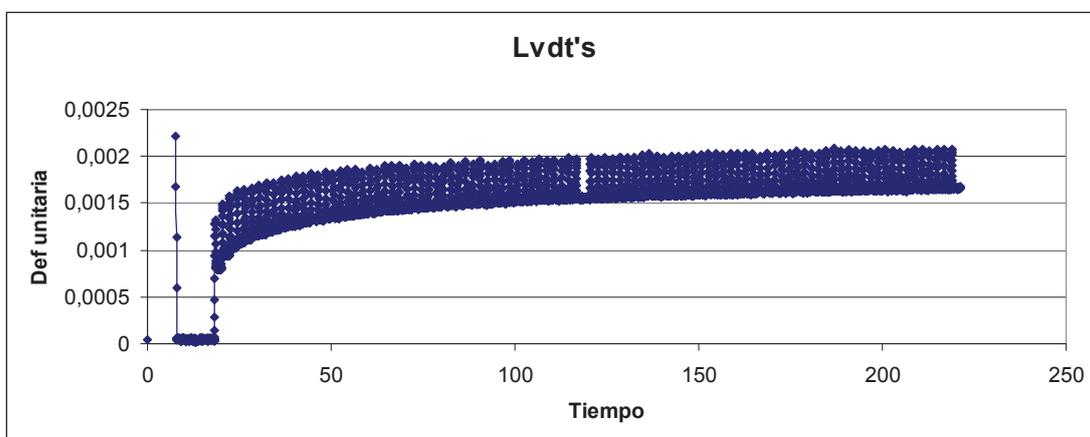


Figura 4.8. Gráfica deformación unitaria contra tiempo Sec 4 del espécimen de material granular.

En la Figura 4.9 esta la gráfica esfuerzo kPa contra tiempo de la secuencia 4 y se observa la respuesta de la celda de carga.

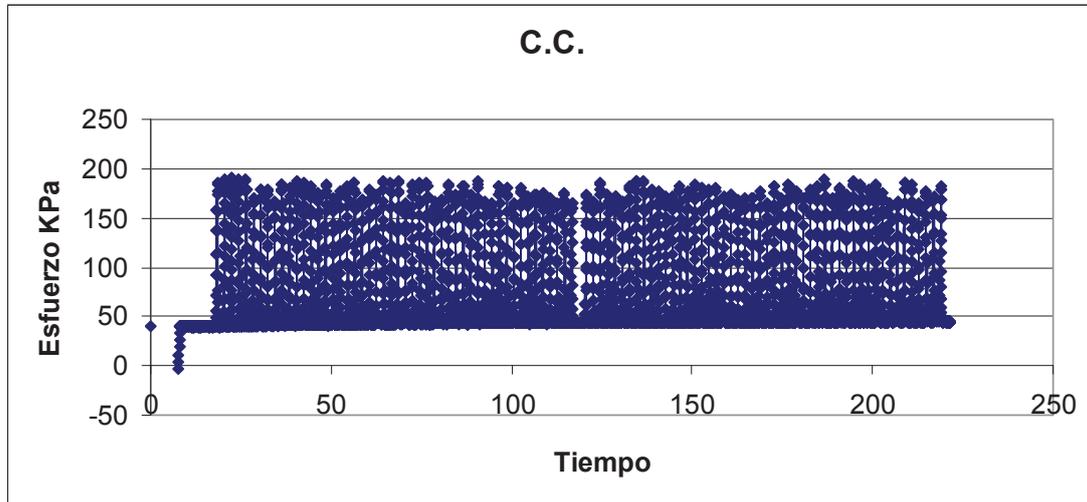


Figura 4.9. Gráfica Esfuerzo contra tiempo Sec 4 del espécimen de material granular.

Al igual que la prueba anterior es importante el observar el como se da la respuesta del Módulo resiliente de todos los datos, en la Figura 4.10 está la gráfica deformación unitaria contra esfuerzo kPa de la secuencia 4.

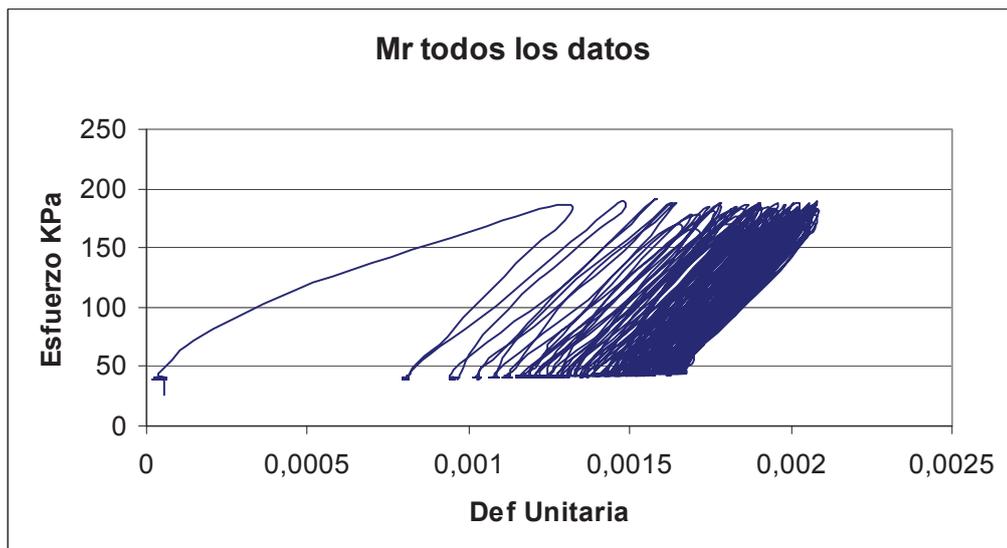


Figura 4.10. Gráfica Módulo resiliente de todos los datos de la Sec 4 en el espécimen de material granular

En el Anexo 1 se presentan todas las gráficas de las secuencias restantes de la prueba hecha en el material.

El equipo ha respondido bien, por ello se están realizando ya trabajos para empresas, para obtener módulos resilientes en materiales finos.

El procedimiento de la prueba para suelos finos es muy parecido a la de suelos granulares, la diferencia es que cambia las secuencias así como esfuerzos desviadores y presión de confinamiento. En la tabla 4.2 se presentan estas secuencias.

Tabla 4.2 Secuencia de prueba para suelos finos

Fase	No. de Secuencia	Esfuerzo Desviador (Kpa)	No. de repeticiones
Acondicionamiento	1	21 ^a 41 ^b	1000
Prueba	2	21	50
	3	34	50
	4	48	50
	5	69	50
	6	103	50

^a Usar para especímenes con un esfuerzo cortante de 48 KPa

^b Usar para especímenes con un esfuerzo cortante de 48 > KPa

Para todos los estados de esfuerzo el valor mínimo de repeticiones es de 50 y la presión de confinamiento para cada esfuerzo desviador es de 21 KPa.

Se tomó como ejemplo una de las secuencias de suelos finos, con un esfuerzo desviador de 103 KPa Las dimensiones de la probeta de suelo fino son: 76.8 mm de diámetro y 150 mm de altura (ver figura 4.11). Se presenta la gráfica de deformación unitaria contra tiempo en la figura 4.12.



Figura 4.11. Probeta de material fino.

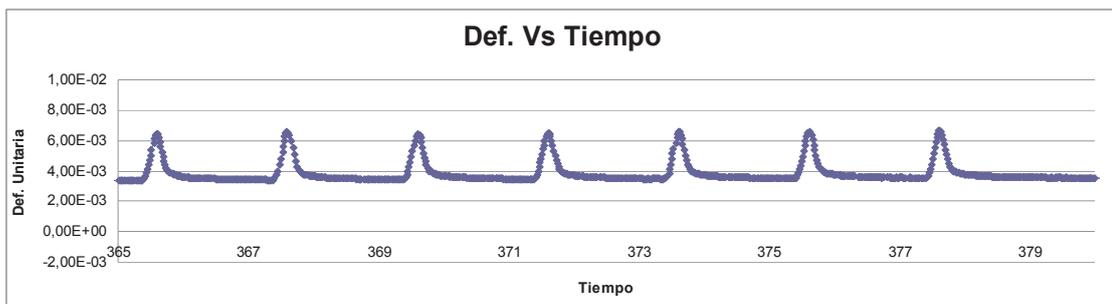


Figura 4.12. Gráfica deformación unitaria contra tiempo del suelo fino

En la figura 4.13 se presenta la gráfica de esfuerzo en kPa contra tiempo del material fino.

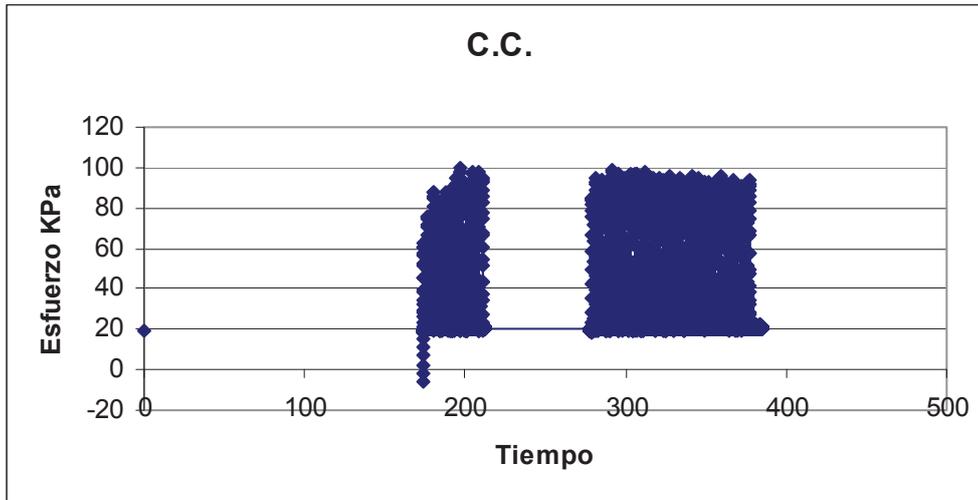


Figura 4.13. Gráfica Esfuerzo contra tiempo, suelo fino.

En la figura 4.14 se presenta la gráfica esfuerzo – deformación de todos los datos

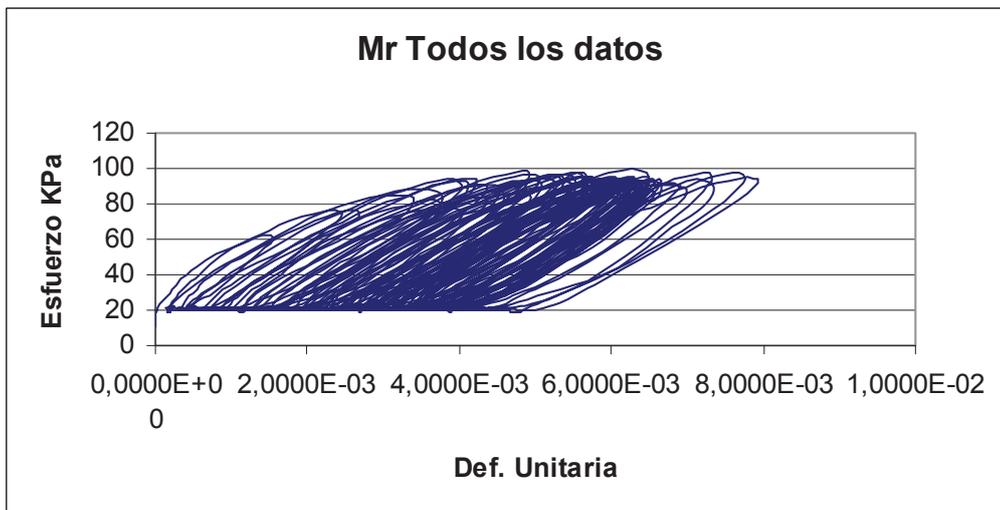


Figura 4.14. Gráfica Módulo resiliente de todos los datos de la probeta de suelo fino

4.3. Resultados.

La prueba de módulo resiliente específica que se deben de tomar las ultimas 5 deformaciones axiales y hacer los cálculos correspondientes con estas. Se obtienen los últimos ciclos de la prueba y de ahí el módulo resiliente de esa secuencia. Ya que se tiene todos los módulos resilientes de todas las secuencias se prosigue a graficar el esfuerzo invariante θ contra el Modulo resilinte y obtener su regresión.

De la secuencia 5 de la prueba en madera se obtuvo el siguiente módulo resiliente **Mr = 453,053.763 kPa** y su gráfica se muestra en la figura 4.15.

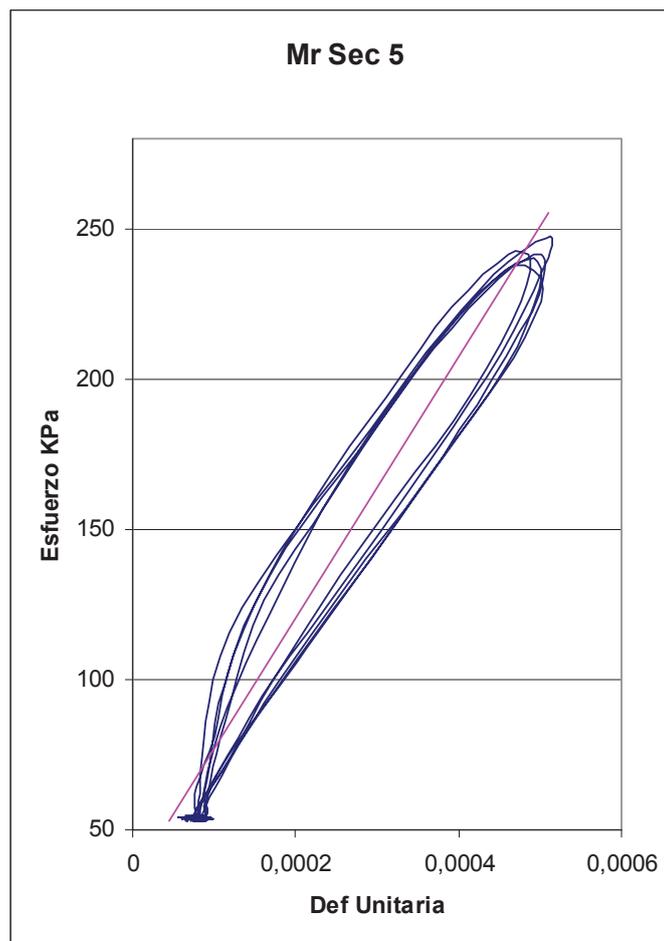


Figura 4.15. Gráfica Módulo resiliente de la Sec 5 de la madera

Así como se graficó y se calculó para la secuencia 5 se hizo para todas las secuencias de la prueba y de cada una de ellas se obtuvo un módulo resiliente. En la figura 4.16 se muestra la gráfica Mr contra Esfuerzo invariante, junto con su ecuación y coeficiente de correlación ya de toda la prueba en el espécimen de madera.

De la secuencia 4 de la prueba en el espécimen del material se obtuvo el siguiente modulo, **Mr = 308,035.714 kPa** y su gráfica se muestra en la figura 4.17

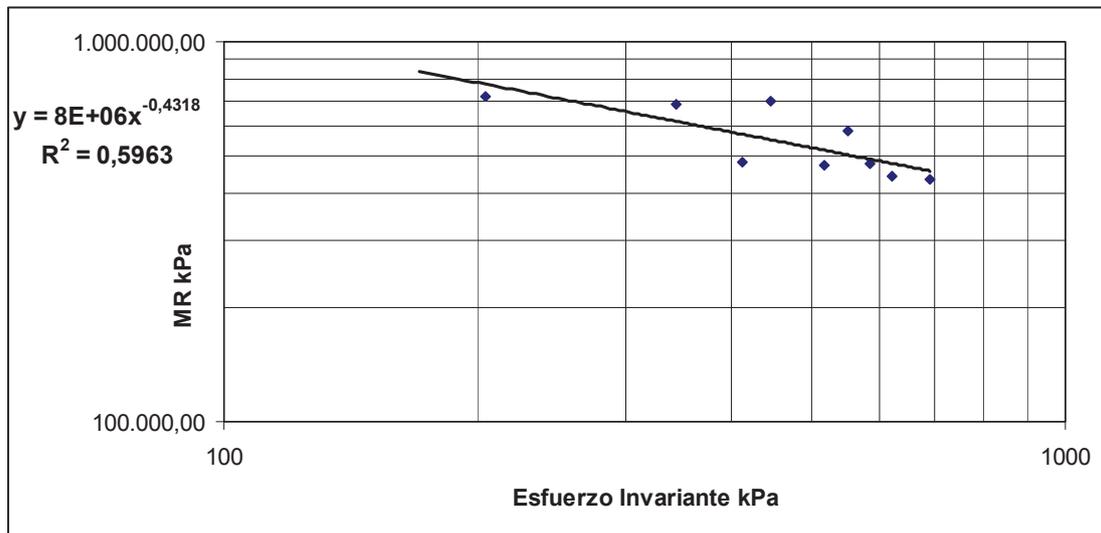


Figura 4.16. Gráfica Módulo resiliente y esfuerzo invariante de la Sec 5 de la madera

En todas las secuencias de la prueba del material se realizaron las gráficas, sus cálculos correspondientes y de cada una de ellas se obtuvo un módulo resiliente. En la figura 4.18 se muestra la grafica Mr contra Esfuerzo invariante, junto con su ecuación y coeficiente de correlación ya de toda la prueba en el espécimen del material.

El módulo resiliente que se obtuvo de la probeta de suelo fino fue: **Mr = 25,631.77 KPa**. En la figura 4.19 se ilustra el comportamiento y la pendiente de los últimos cinco ciclos, de donde se obtuvo dicho Módulo resiliente.

De la misma manera que en los ensayos anteriores es necesario graficar los módulos resilientes de las demás secuencias de la prueba contra el esfuerzo invariante y obtener su ecuación de regresión así como su coeficiente.(ver figura 4.20).

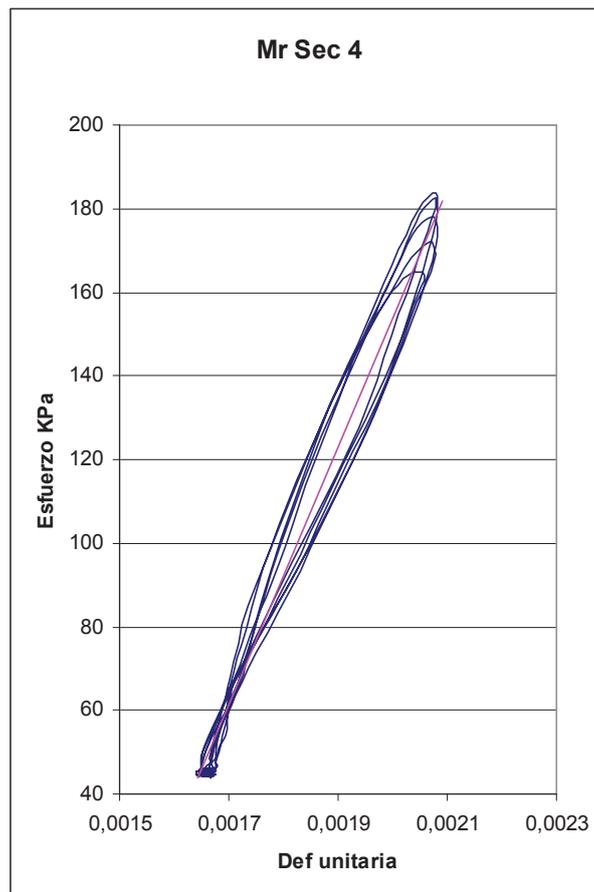


Figura 4.17. Gráfica Modulo resiliente de la Sec 4 del material granular.

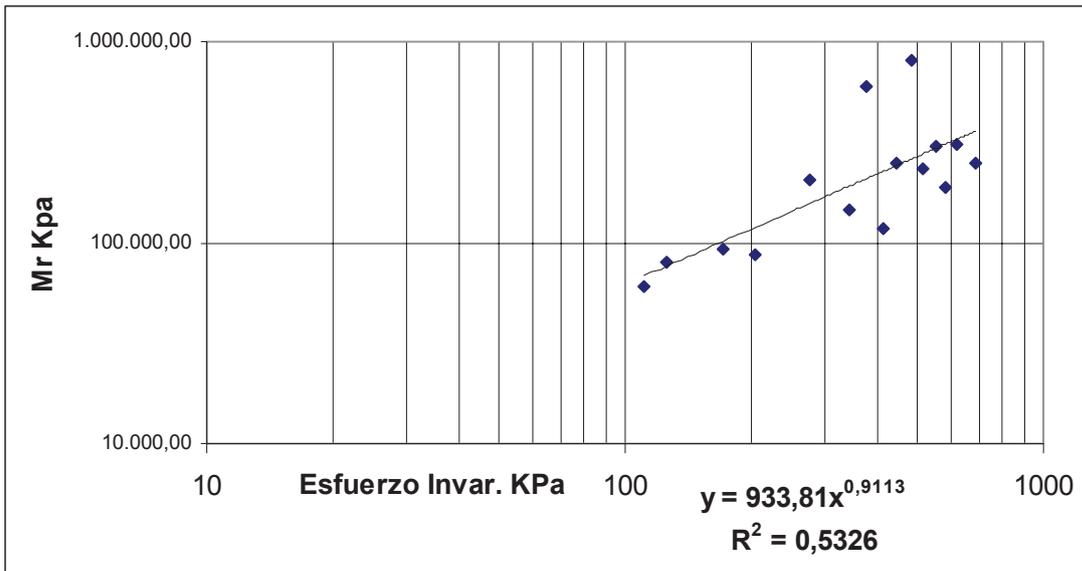


Figura 4.18. Gráfica Modulo resiliente y esfuerzo invariante de la Sec 4 del material granular

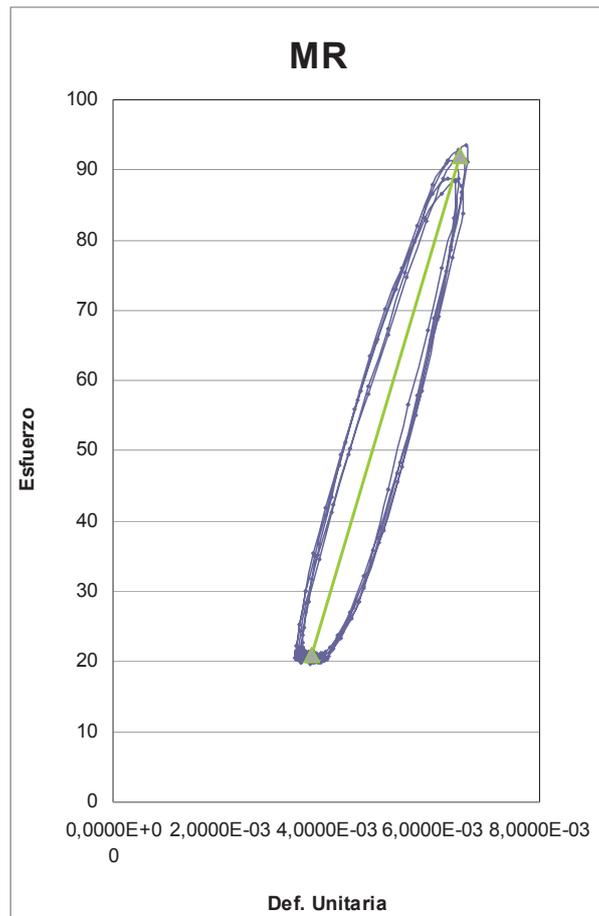


Figura 4.19. Gráfica Módulo resiliente del suelo fino.

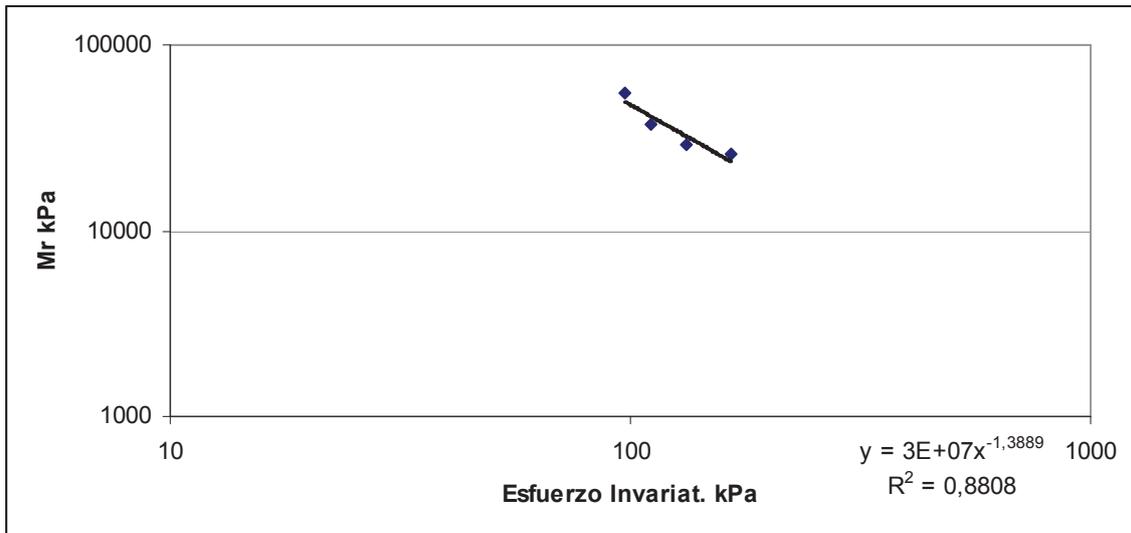


Figura 4.20. Gráfica Módulo resiliente contra esfuerzo invariante del suelo fino.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.

✚ Debido a las grandes exigencias de cargas pesadas y velocidades mayores en la estructura de un pavimento es necesario encontrar soluciones adecuadas para estas, con el propósito de que el paso vehicular sea seguro y económico.

✚ El Valor Relativo de Soporte (V.R.S.) puede ser visto como una medida indirecta del esfuerzo cortante del suelo pero no se puede relacionar directamente con los parámetros del esfuerzo cortante. Por lo que debe tomarse como un método empírico carente de universalidad científica.

✚ El valor relativo de soporte a tenido un gran impacto en todo el mundo desde los 30's. En México aun lo sigue teniendo ya que gran parte de los métodos de diseños de pavimentos tienen como fundamento este valor, como por ejemplo el método de La SOP y El de la UNAM.

✚ Existen nuevos métodos de diseño que utilizan el VRS pero ya no como un parámetro de diseño si no para correlacionarlo y obtener el módulo resiliente, estos métodos son: el DISPAV de la UNAM y también la nueva Guía de la AASHTO 2002.

✚ Los materiales utilizados en las estructuras del pavimento al estar bajo cargas repetidas tienen un comportamiento plástico. Para medir estas deformaciones es necesario utilizar un equipo especial que represente lo de campo en el laboratorio. Los equipos triaxiales cíclicos son los indicados para hacer estas mediciones, estos aparecieron en los años 50's.

✚ Los primero equipos eran mas mecánico, ahora lo son más sofisticados y digitalizados.

✚ El módulo resiliente está ligado a un proceso de carga repetida, en si es la pendiente que hay entre el esfuerzo y deformación en un proceso de cargas cíclicas.

✚ En la actualidad ya hay diseños mecanicistas en los que se utilizan como parámetro de diseño el módulo resiliente. El Valor Relativo de Soporte no sale de los métodos de diseño se va a seguir utilizando para hacer correlaciones con el módulo resiliente y casos no tan importantes como el diseño de terracerías.

✚ En México, hay muy pocos lugares en los que cuentan con equipos triaxiales cíclicos, para hacer pruebas en materiales para pavimentos. Es por eso la importancia que tiene el haber diseñado, construido y hacer la puesta a punto del equipo triaxial cíclico dentro de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

✚ El Equipo que se construyó dentro de la Universidad cumple con todos los requisitos que están citados dentro de la normativa AASHTO T 307-99 en la prueba de módulo resiliente.

✚ La calibración que se hizo a la instrumentación fue excelente ya que los factores de correlación salieron muy cercanos a 1, se pudieron utilizar las constantes de la ecuación de regresión para convertir los voltios recibidos a unidades.

✚ En la celda de carga existe una diferencia entre la calibración de misma y el embolo del actuador, esto se debe a la fricción que existe en el pistón con la cámara triaxial.

✚ El funcionamiento del programa esta adecuado para recibir adecuadamente la señal de los LVDT y celda de carga.

✚ En este momento se hace manualmente el funcionamiento del equipo, pero se obtiene lo que se esta buscando la realización de las pruebas de módulos resilientes. Posteriormente se hará mas automatizado a través del programa que mande la señal a la válvula proporcional.

✚ La mezcla de material del Banco “Cerritos” de 50% -50%, cumplió con las características necesarias para un material de sub-base.

✚ En la realización de las pruebas, se tuvieron algunos contratiempos pero se logró estandarizar el procedimiento para llegar a un resultado adecuado.

✚ La prueba que se realizó en el pedazo de madera se observó que las deformaciones eran muy pequeñas por la rigidez de esta. Es por eso que en las gráficas de deformación unitaria contra tiempo no se observa bien esas deformaciones.

✚ Al contrario de la prueba en la madera, en el material se puede ver perfectamente ese comportamiento plástico en las gráficas deformación unitaria contra tiempo.

✚ Las cargas no empiezan en cero ya que el pistón del marco de carga tiene una pequeña precarga debido al peso del mismo y de la celda de carga, pero esta pequeña carga ya es tomada dentro del programa de adquisición de datos.

✚ Los resultados obtenidos tanto de la madera como del material fueron satisfactorios y se puede observar muy bien su comportamiento de estos en las gráficas realizadas

✚ Para completar el estudio se obtuvieron algunos resultados en suelos finos de trabajos que ya se están realizando en el nuevo equipo. Estos resultados son muy buenos.

✚ El equipo se utilizara para trabajos de la misma universiada y para futuras investigaciones.

✚ Con todo esto se concluye que el objetivo de hacer la puesta a punto del equipo triaxial cíclico se llevo a su meta. Aunque este trabajando manualmente satisface todas las necesidades para la realización de pruebas.

5.1 SUGERENCIAS-

✚ Hacer que trabaje el equipo triaxial cíclico con la válvula proporcional y sea más automatizado y no manual como hasta ahora se ha estado trabajando.

✚ Adquirir una nueva cámara triaxial dinámica, para mejorar el desempeño y evitar el rozamiento que hay en el pistón y la cámara, para así lograr que los esfuerzos desviadores pequeños se transmitan adecuadamente a la probeta de suelo.

BIBLIOGRAFIA

Black, W. P. M. (1961). "Calculation of laboratory and in-situ values of California bearing ratio from bearing capacity data", *Geotechnique*, vol. 11, No.1, , pp14-21.

Bowles, E. J. (1980). *Manual de Laboratorio de suelos en Ingeniería Civil*. Ed. McGRAW – HILL. Latinoamérica. Bogotá, Colombia.

Boyce, J. R., Brown, S. F. y Pell, P. S. (1976) "The resilient behaviour of a granular material under repeated loading", *Proc. Aust. Road Research Board*.

Brown, S.F. Austin, G And Overy, R. F. (1980), "And instrument triaxial cell for cyclic loading of clays", *Geotech, Testing J., ASTM*, 3, No. 4, pp.145-152

Brown, S.F. O' Reilly, M. P. and Pappin, J. W. (1989). "A repeated load triaxial apparatus for granular materials", In *Unbound Aggregates in Roads*, London, Butterworth, , pp 143-158

Brown, S.F. (1996). "Soil mechanics in pavement engineering". *Geotechnique* 46, N°3, pp. 383-426,-

Chavez, C. (2004). "Estudio del comportamiento triaxial de los materiales granulares de tamaño medio, con énfasis en la influencia de la succión". Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña.

Chávez, J. (2004) "Selección y utilización del módulo de resiliencia de materiales de base empleados en las obras viales de la ciudad de Morelia". Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Cheung, L. W. (1994) "Laboratory assessment of pavement foundation materials", PhD thesis, Universidad de Nottingham.

Davis, E.H. (1949). "The California Bearing Ratio method for design of flexible roads and runways" *Geotechnique* 1. No. 4. 249 – 263.

Flores, (2007). "Los laboratorios de mecánica de suelos, a 50 años de apoyar la aplicación geotécnica en México". *Memorias Conmemorativas del 50 aniversario de La Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*. México. D.F.

FESTO. Manual de productos. Embolo DNC-125-50-PPV-A

Garnica et al, *Mecánica de materiales para pavimentos*, (2002) Publicación técnica No. 197, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro.. pp. 254

Garnica et al, (2001) "*Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*", Publicación técnica No. 142, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro.. pp. 48

Garnica Paul, Correa Ángel (2004). "*Conceptos Mecanistas en Pavimentos*"; Publicación Técnica No. 258; Instituto Mexicano del Transporte; Sanfandila, Queretaro;. pp.52

Head, K.H. (1994). "Soil Laboratory Testing". Vol 2, Second edition, Pentech Press. London.

Huang, Y. H. (2004). "Pavement Analysis and Design". University of Kentucky. Ed. Prentice Hall. New Jersey.

Hveem, F.N. (1955). "*Pavement deflections and fatigue failures*". Highway Res. Board Bulletin N°114, Washington, DC, pp. 43-87,

Hveem, F.N. y Carmany, R.M. (1948). "*The factors underlying the rational design of pavements*", Proc. Highway Research Board, Washington, DC.

Instructivo, Martillo Neumático

National Instrument. (2005) "Getting Started with LabVIEW". Version 8

Norma AASHTO T 307 – 99 Determining the Resilient Modulus of Soil and Aggregate.

Norma AASHTO T 292- 97 Resilient Modulus of Subgrade Soils and Untreated Bases/Subbase Materials

Norma SCT N – CMT – 4 – 02 – 001/04 Materiales para Subbases.

Norma SCT M – MMP – 1 – 04/03 Contenido de agua.

Norma SCT M – MMP – 1 – 05/03 Densidades relativas y Absorción.

Norma SCT M – MMP – 1 – 06/03 Granulometría de los materiales

Norma SCT M – MMP – 1 – 07/07 Límites de Consistencia

Norma SCT M – MMP – 1 – 09/06 Compactación AASHTO.

Norma SCT M – MMP – 4 – 04 - 004/02 Equivalente de arena de materiales pétreos

Norma SCT M – MMP – 4 – 04 - 006/02 Desgaste mediante la prueba de los Ángeles.

Paute, J – L., Hornich, P. y Beraben, J – P. (1993). *“Repeated load triaxial testing og granular material son the French network of Laboratories des Ponts et Chaussés”* Flexible Road, Balkema.

Porter, O. J. (1938). *“The preparation of subgrades”*, Proc. Highway Res. Board, 18, No.2, Washington, DC. pp. 324-331

Porter, J.; (1950). *“Development of the original method for highway design. Development of CBR flexible pavement design method for airfields”*. a symposium. Trans. American Society of Civil Engineers, 115, pp. 461-467,.

Porter, O.J. (1938). *“The preparation of subgrades”*, Proc. Highway Res. Board, 18, N°2, Washington, DC, pp. 324-331,

Raybould, M. R. (1992). *“The response of Silt-clay mixtures to cyclic loading”*. PhD thesis, University of Nottingham.

Rico, A. y Del Castillo, H. (2000). *“La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras y aeropistas”* Volumen 2. Ed. Limusa. México, D.F.

Ruiz, C. G. A. (1997). *“Estudio de la deformación permanente de un suelo compactado para capa subrasante, sometido a carga cíclica”* Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chihuahua

Seed, H.B.; Chan, C.K.; Lee, C.E.. (1962). *“Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures”*. Proc. Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, pp. 611-636.

Seed, H.B.; Chan, C.K.; Monismith, C.L. (1955). *“Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay”*. Proc. Highway Res. Board, 34, Washington, DC, pp. 541-558.

Sweere, G. T. H., (1990) *“Unbound granular bases for roads”*, Tesis doctoral, Delft University of Technology.

The Asphalt Institute. (1963). Soil Manual. Ms 10. Collage Park, Maryland.

Turnbull, W. J. (1950). *“Appraisal of the CBR method, Develoment of CBR flexible pavement design method for airfields”*. A Symposium Trans. Am. Soc. Civ. Engrs. 547 - 554

Whiffin, A., C., (1955) *Fist interim report on the measurement of dynamic stresses in roads*. D.S.I.R. Rd Res. Lab. Research Note No. RN/2570/IACW

www.gdsinstruments.com

www.gcts.com

www.NI.com

<http://catarina.udlap.mx>

ANEXO 1

En esta parte del documento se presentan las gráficas de cada una de las secuencias, obtenidas en la prueba de módulo de resiliencia en la mezcla del material.

Secuencia 1 es la fase de acondicionamiento.

Secuencia 2 Con un esfuerzo desviador de 69 kPa y presión de confinamiento de 138 kPa $M_R = 801.063,83$ kPa

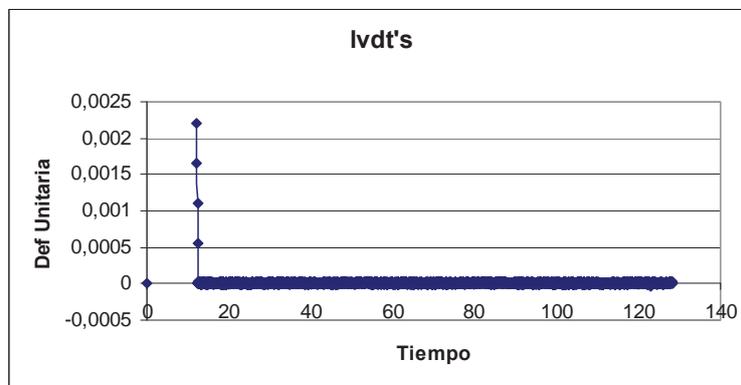


Figura A.1 Gráfica deformación unitaria contra tiempo.

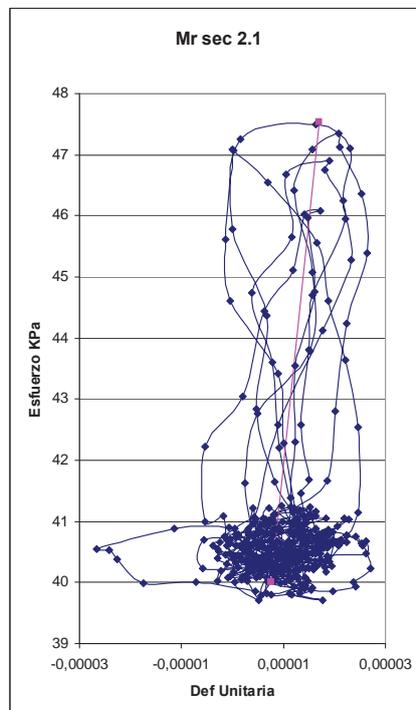


Figura A.2 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 3 Con un esfuerzo desviador de 138 KPa y presión de confinamiento de 138 KPa. $M_R = 303.664,92$ KPa

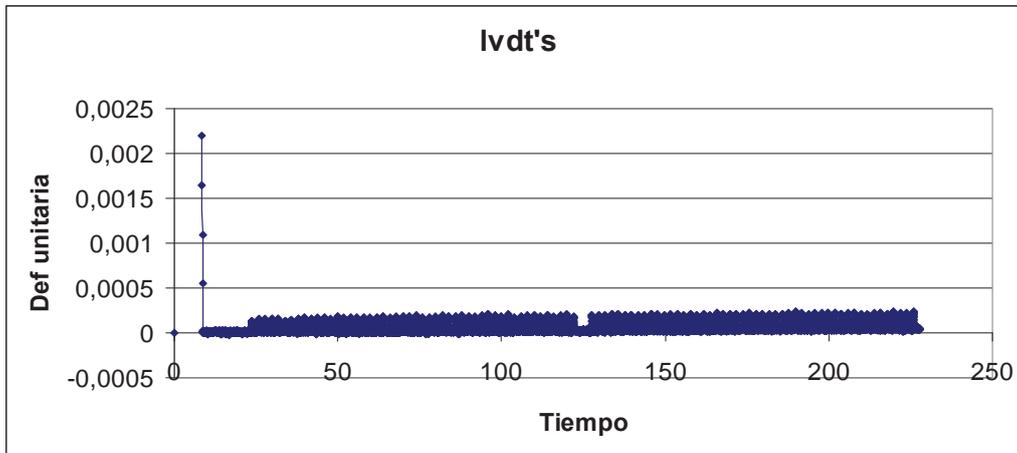


Figura A .3 Gráfica deformación unitaria contra tiempo.

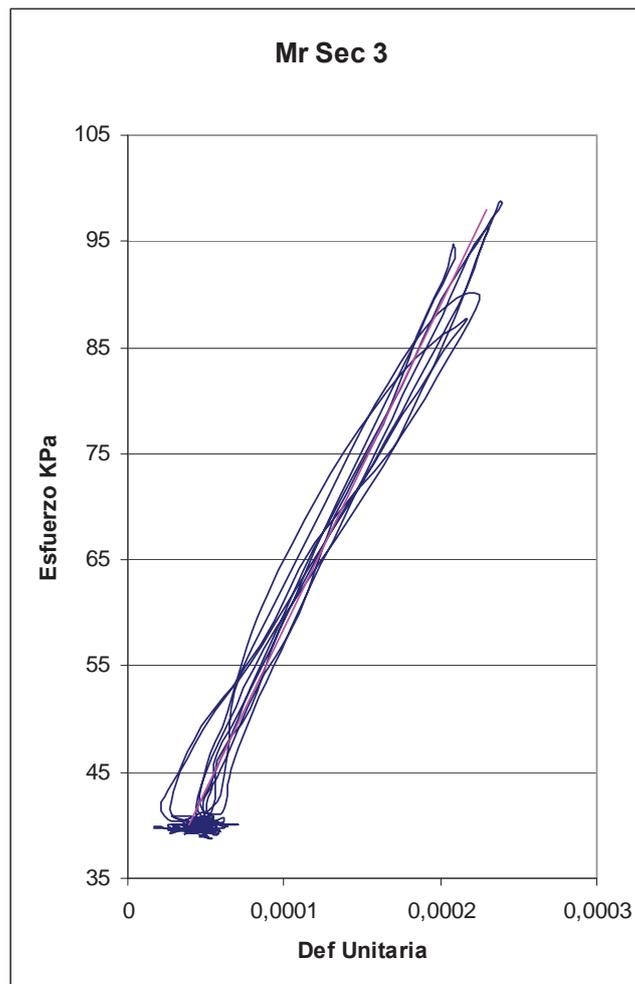


Figura A .4 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 5 Con un esfuerzo desviador de 276 KPa y presión de confinamiento de 138 KPa. $M_R = 250.611,25$ KPa

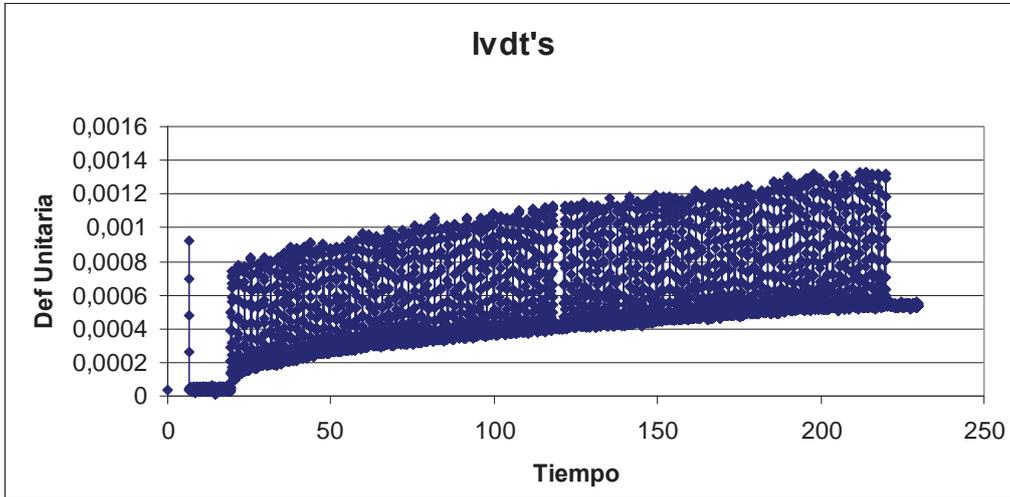


Figura A .5 Gráfica deformación unitaria contra tiempo.

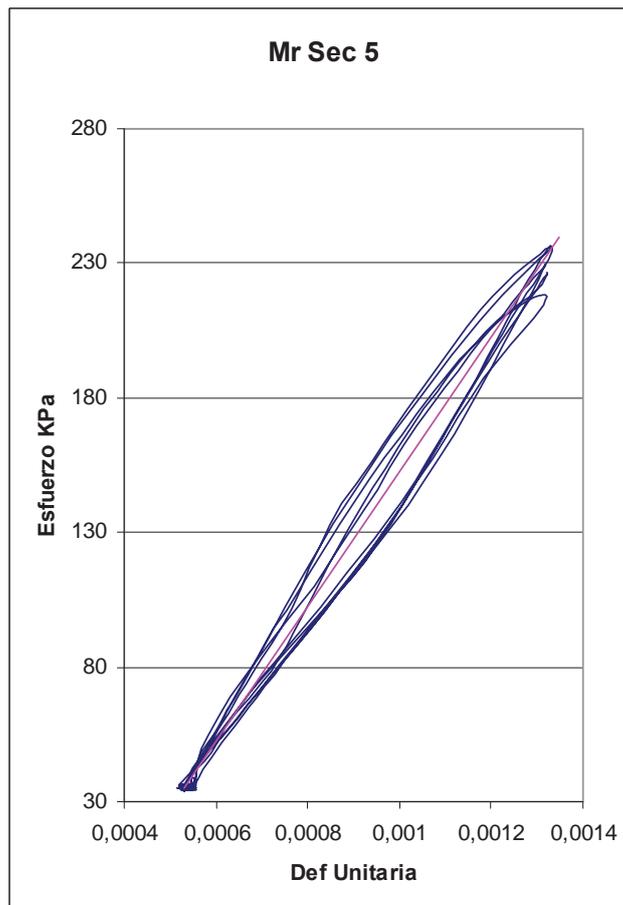


Figura A .6 Gráfica Esfuerzo - Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 6 Con un esfuerzo desviador de 69 KPa y presión de confinamiento de 103 KPa. $M_R = 604,395.60$ KPa

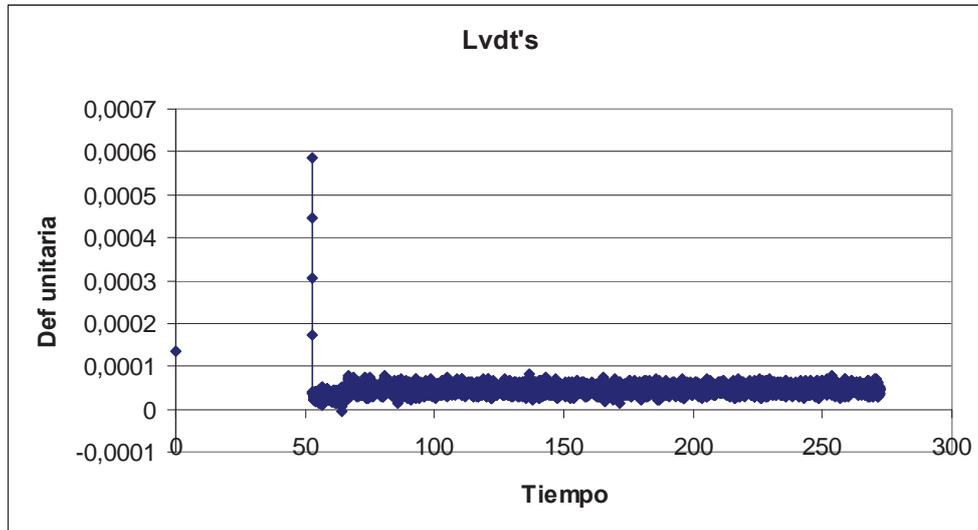


Figura A .7 Gráfica deformación unitaria contra tiempo.

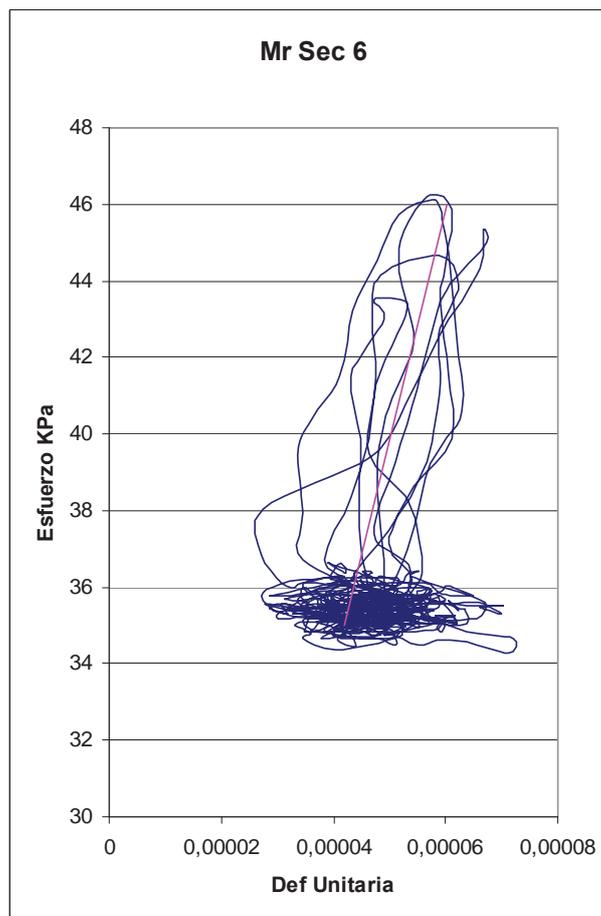


Figura A .8 Gráfica Esfuerzo - Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 7 Con un esfuerzo desviador de 138 KPa y presión de confinamiento de 103 KPa. $M_R = 250,909-09\text{KPa}$

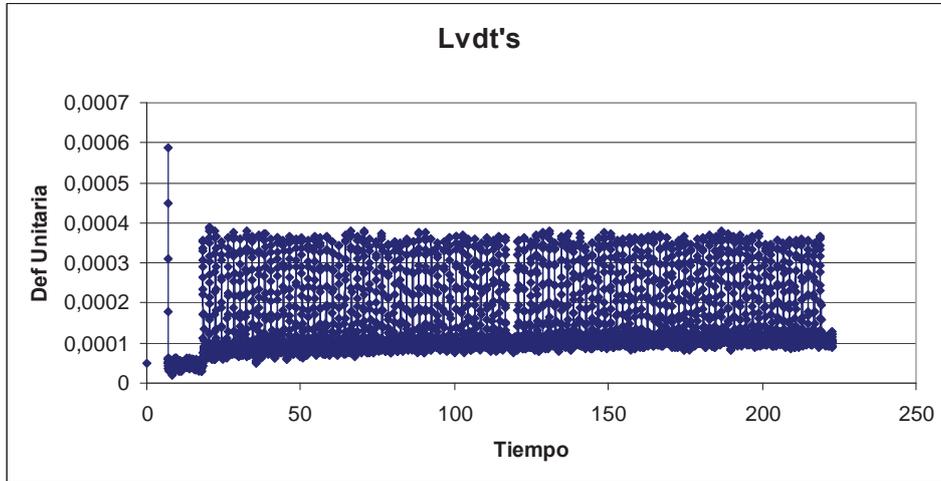


Figura A .9 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

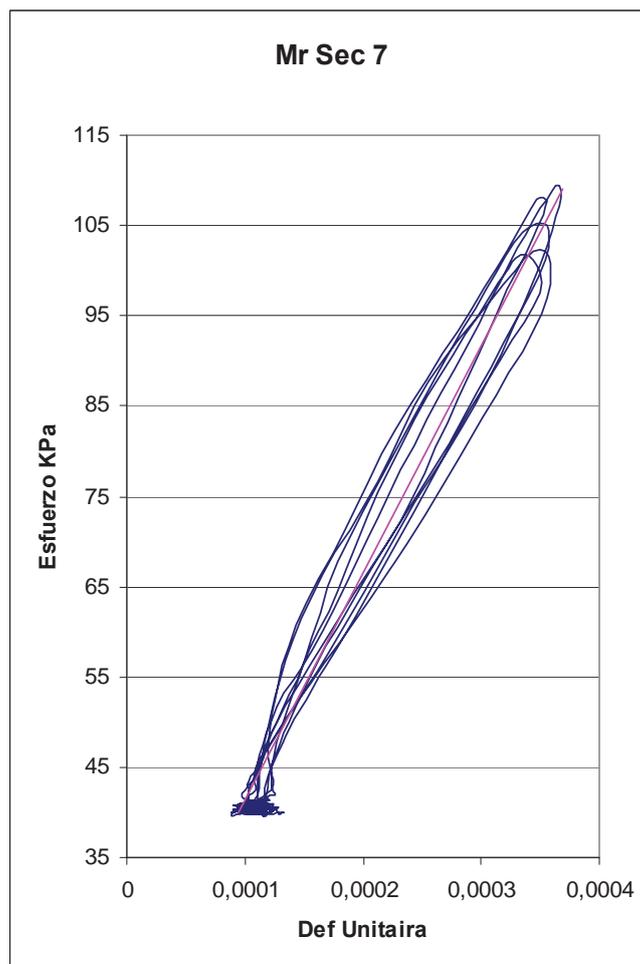


Figura A .10 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 8 Con un esfuerzo desviador de 207 KPa y presión de confinamiento de 103 KPa. $M_R = 232,420.75$ KPa

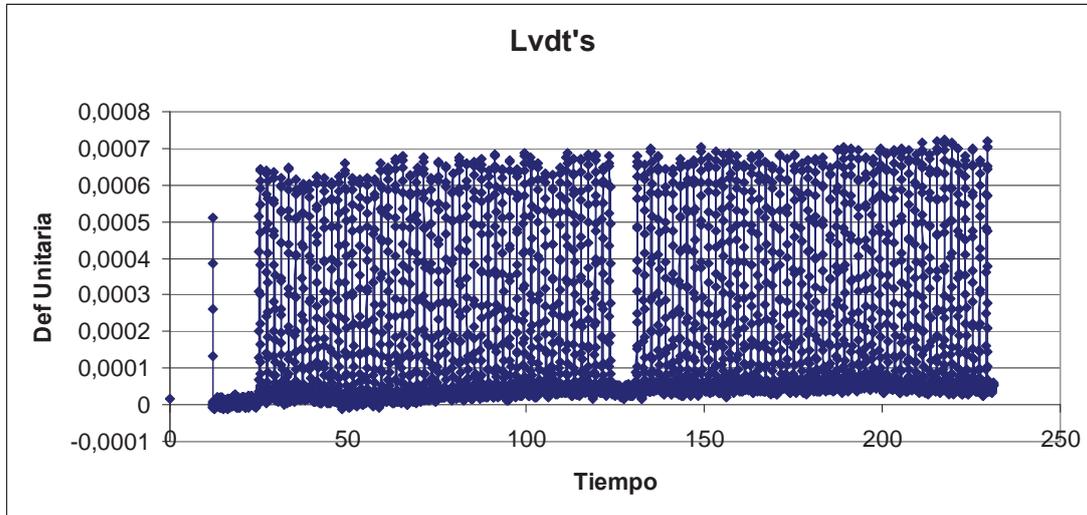


Figura A .11 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

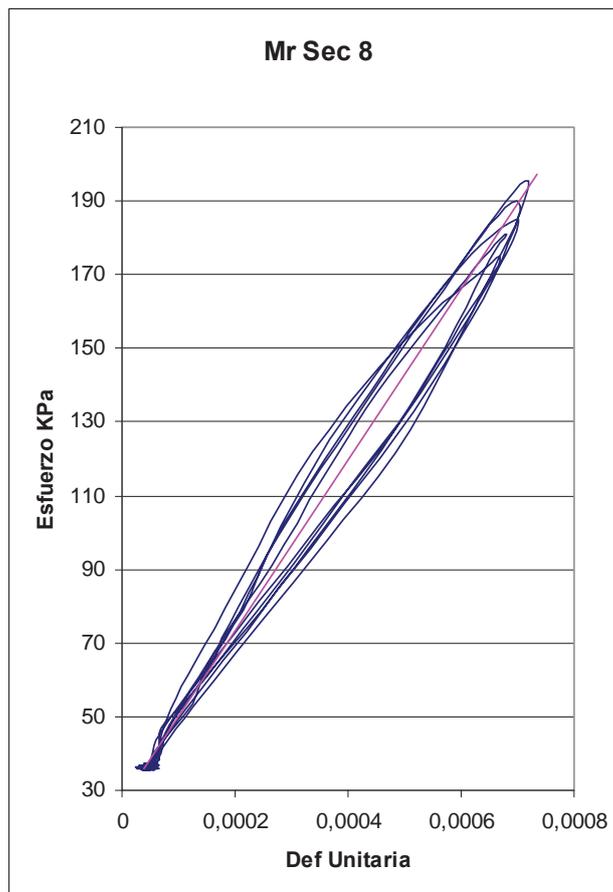


Figura A .12 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 9 Con un esfuerzo desviador de 276 KPa y presión de confinamiento de 103 KPa. $M_R = 186,400.00$ KPa

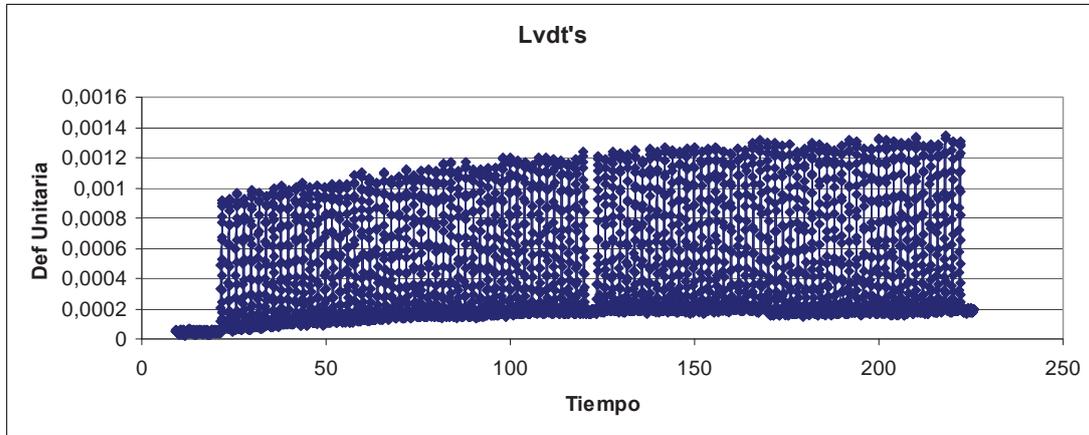


Figura A .13 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

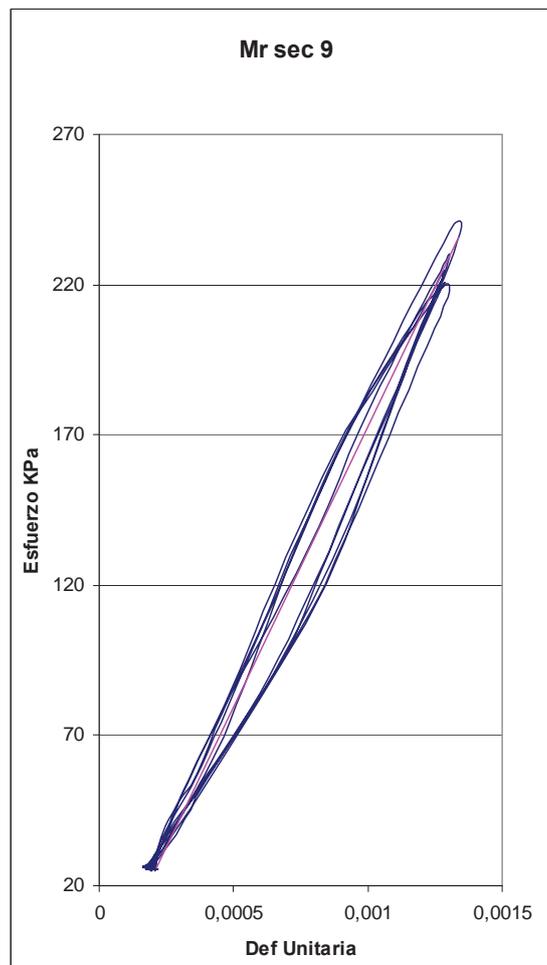


Figura A .14 Gráfica Esfuerzo - Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 10 Con un esfuerzo desviador de 34 KPa y presión de confinamiento de 69 KPa. El M_R no se pudo calcular.

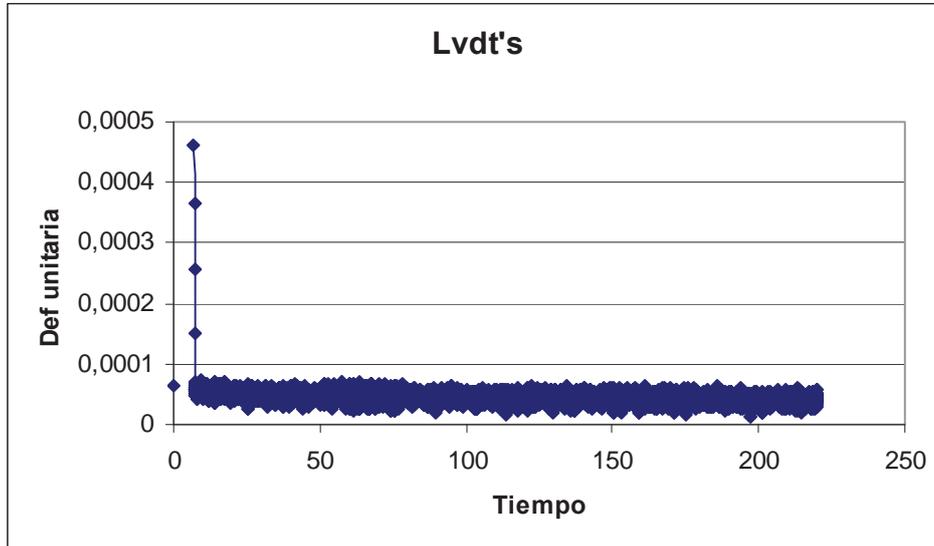


Figura A .15 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

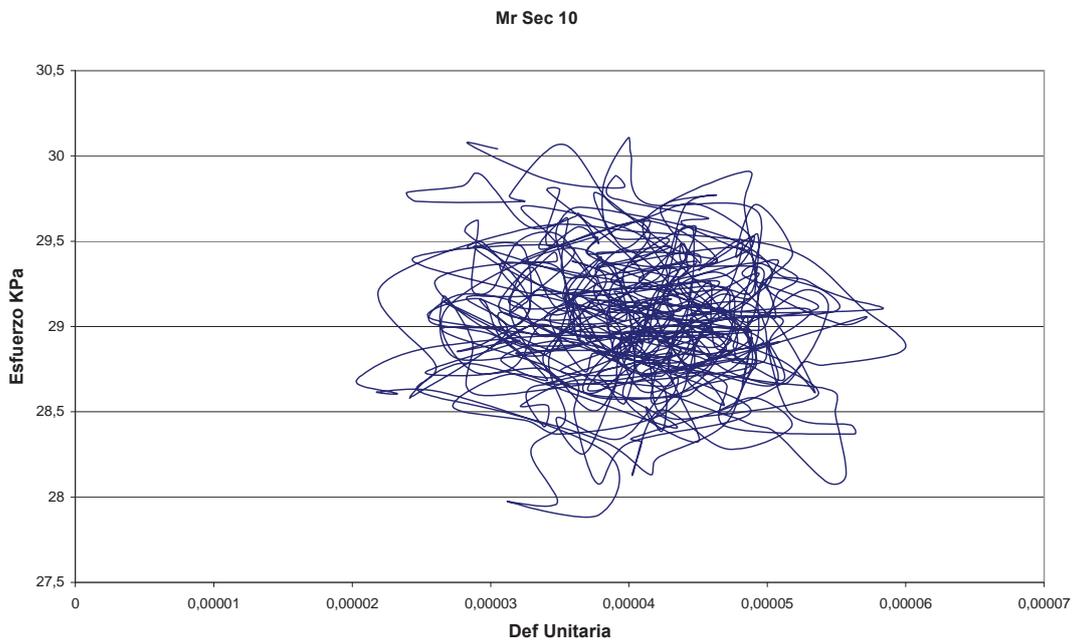


Figura A 16 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 11 Con un esfuerzo desviador de 69 KPa y presión de confinamiento de 69 KPa. $M_R = 203,893,64$ KPa

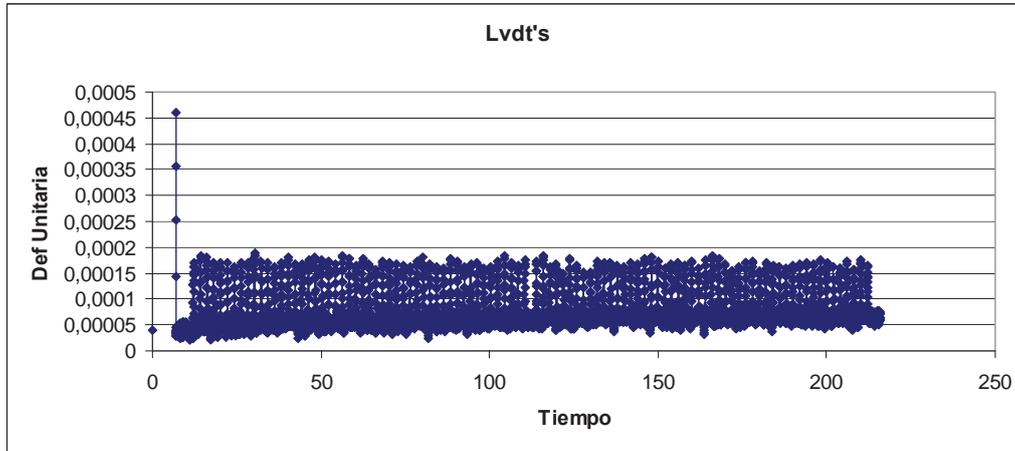


Figura A .17 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

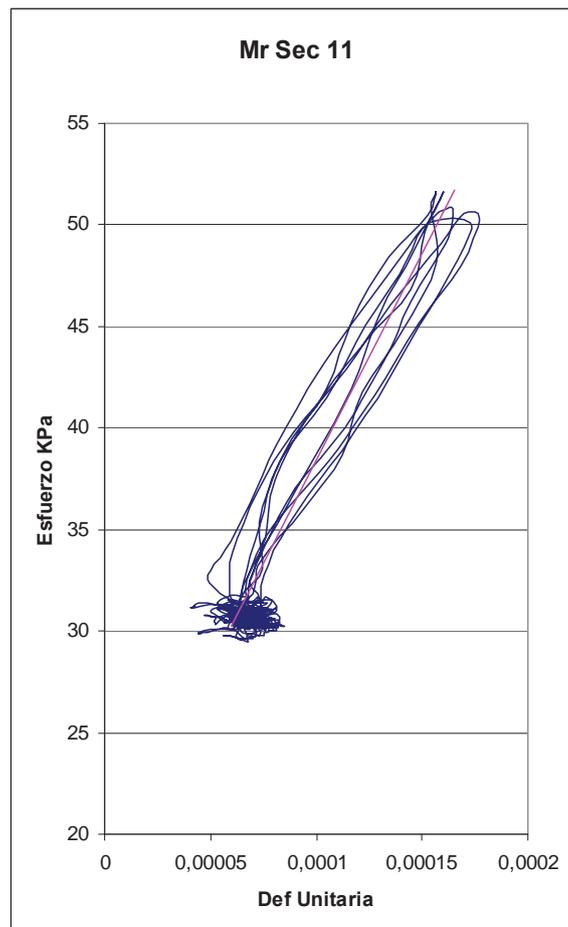


Figura A .18 Gráfica Esfuerzo - Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 12 Con un esfuerzo desviador de 138 KPa y presión de confinamiento de 69 KPa. $M_R = 146,166.67$ KPa

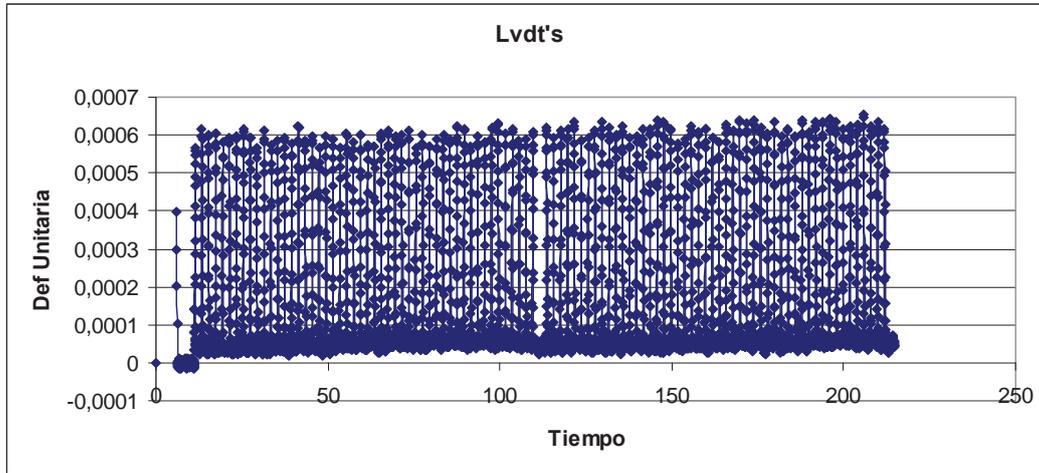


Figura A .19 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

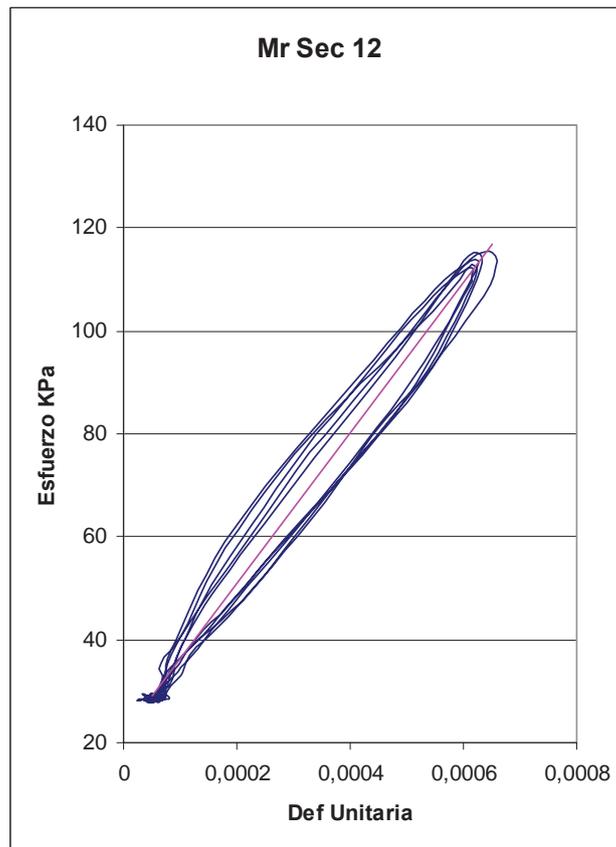


Figura A .20 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 13 Con un esfuerzo desviador de 207 KPa y presión de confinamiento de 69 KPa $M_R = 116,356.88$ KPa

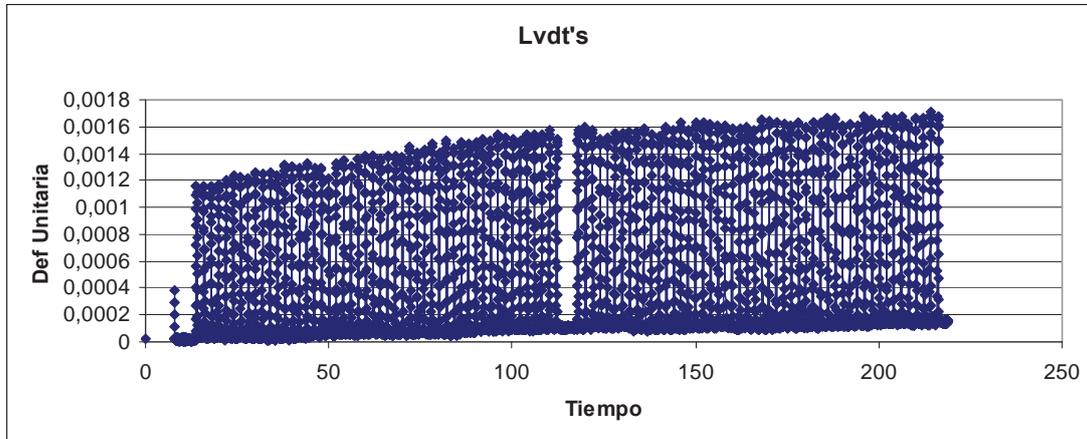


Figura A .21 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

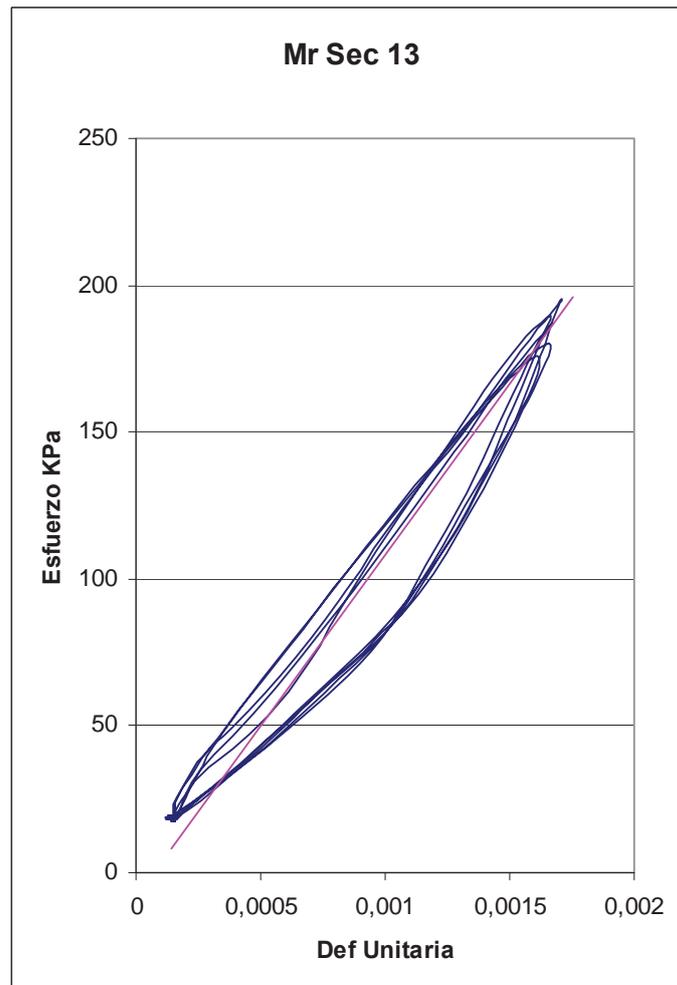


Figura A .22 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 14 Con un esfuerzo desviador de 34 KPa y presión de confinamiento de 34 KPa. El M_R no se pudo calcular.

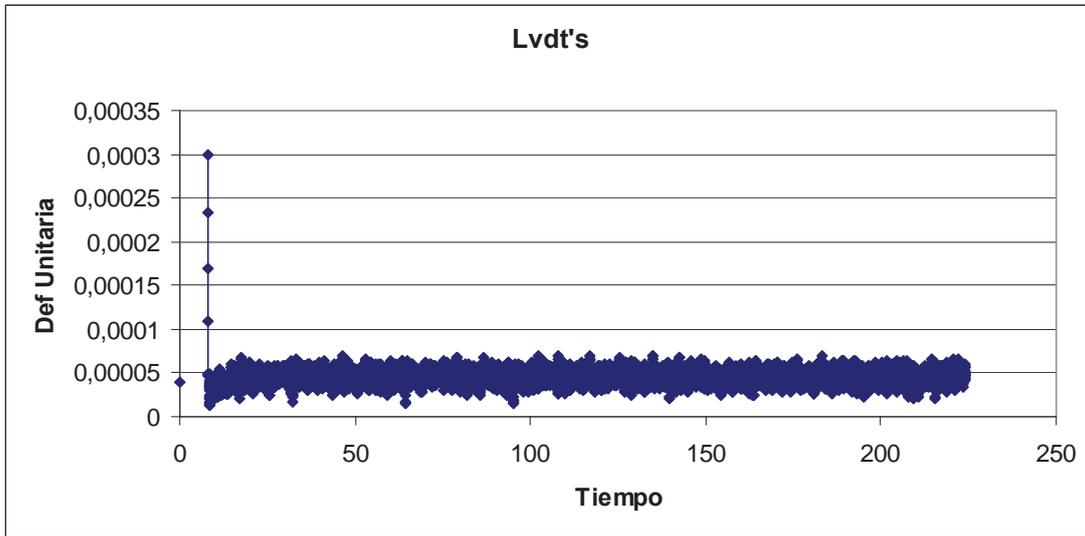


Figura A .23 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

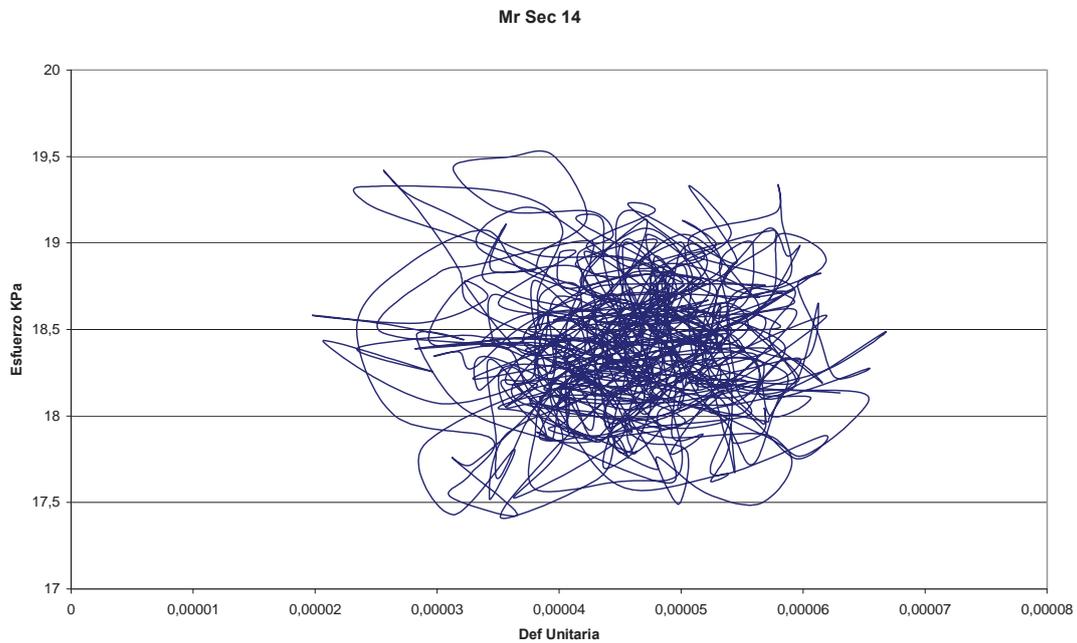


Figura A .24 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 15 Con un esfuerzo desviador de 69 KPa y presión de confinamiento de 34 KPa. $M_R = 93,670.89$ KPa

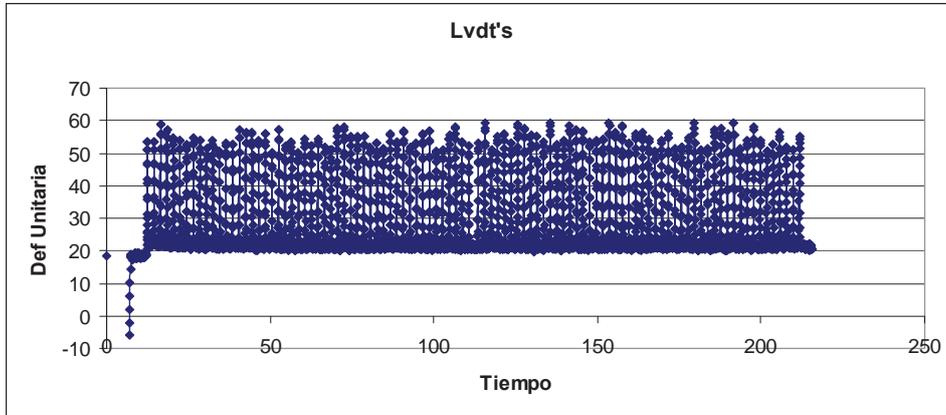


Figura A .25 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

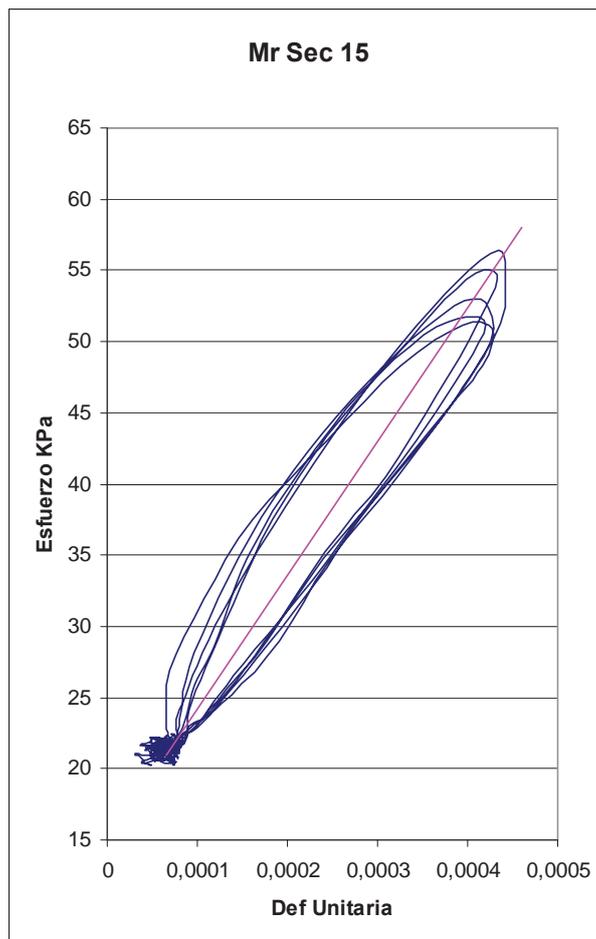


Figura A .26 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 16 Con un esfuerzo desviador de 103 KPa y presión de confinamiento de 34 KPa. $M_R = 87,862.02$ KPa

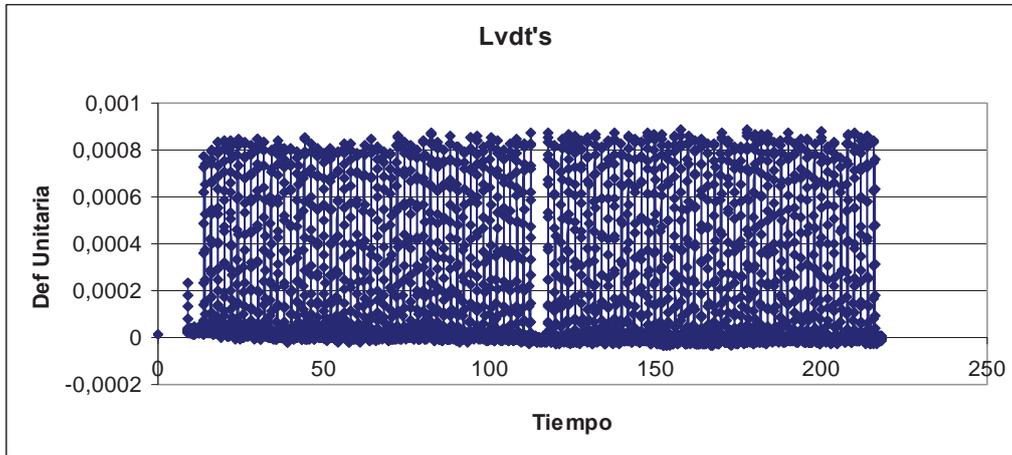


Figura A .27 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

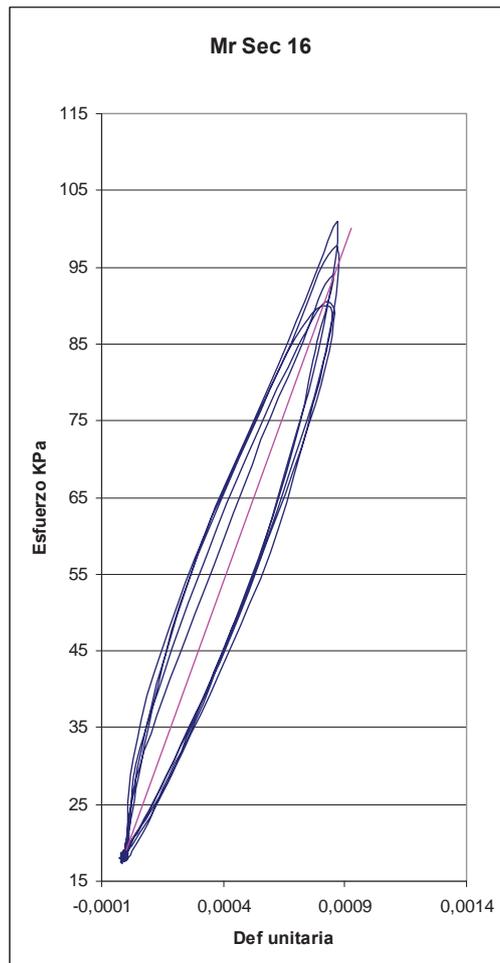


Figura A .28 Gráfica Esfuerzo - Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 17 Con un esfuerzo desviador de 34 KPa y presión de confinamiento de 21 KPa- El M_R no se pudo calcular.

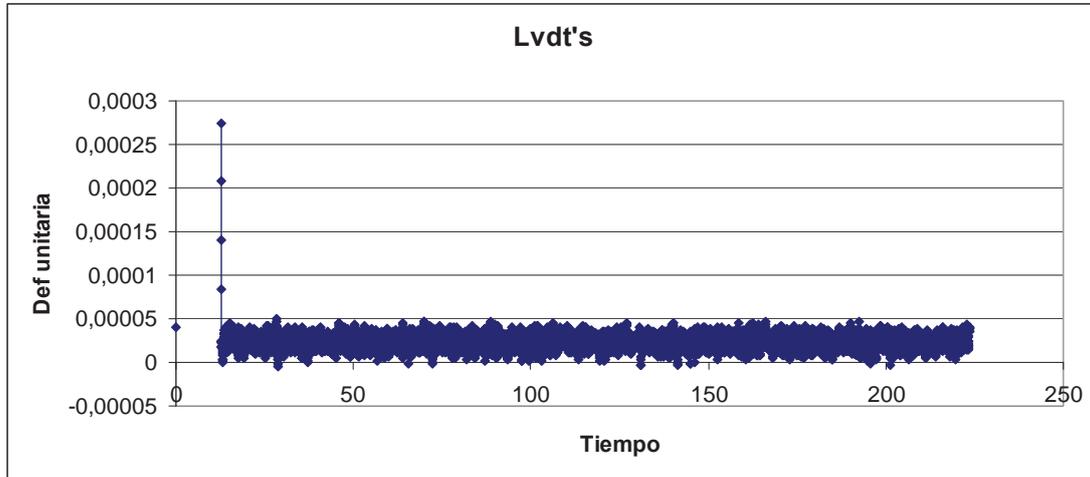


Figura A .29 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

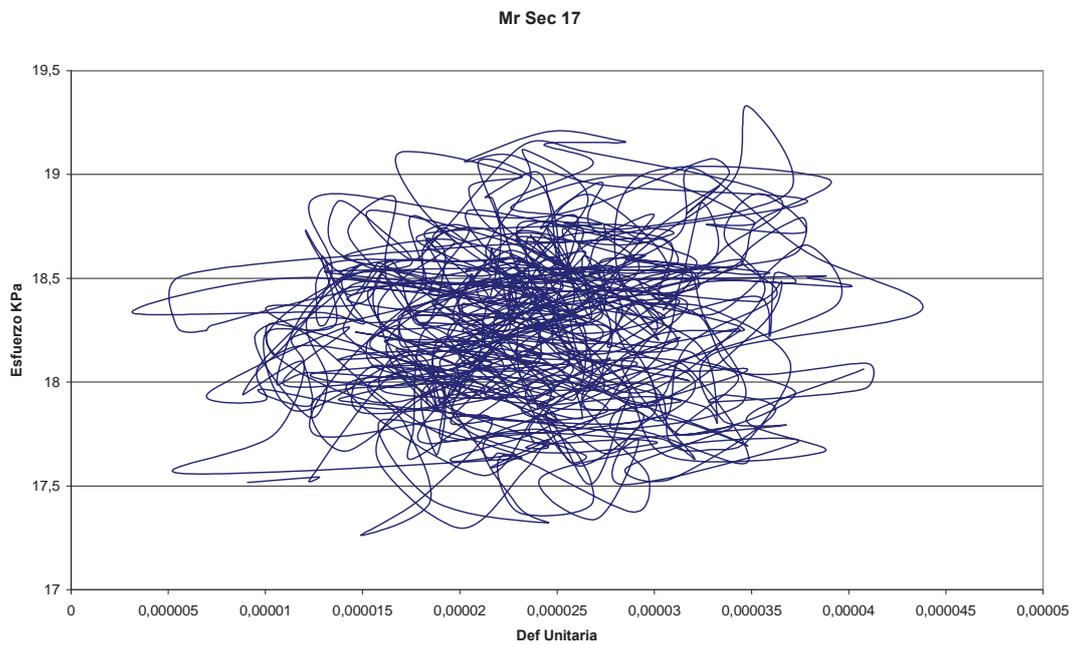


Figura A 30 Gráfica Esfuerzo – Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 18 Con un esfuerzo desviador de 48 KPa y presión de confinamiento de 21 KPa $M_R = 60,318.61$ KPa

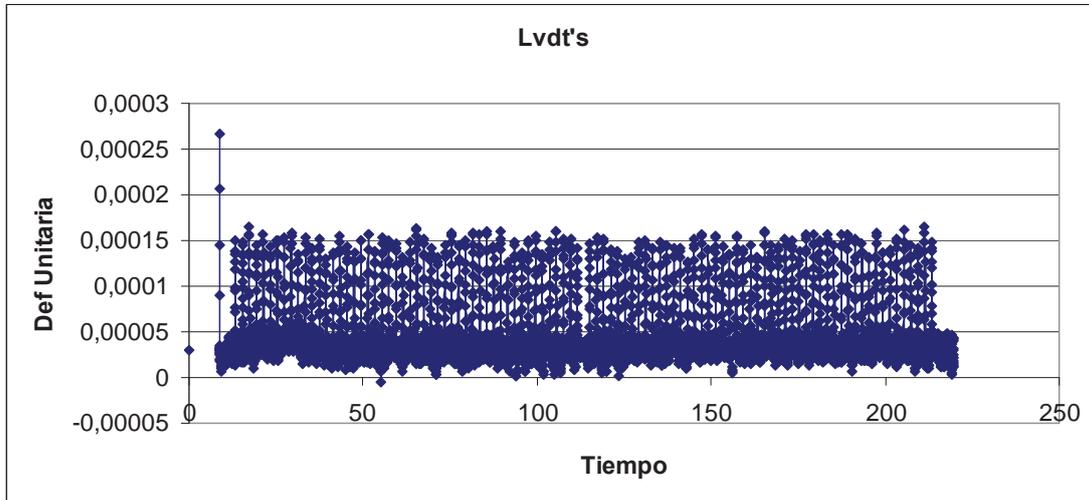


Figura A .31 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

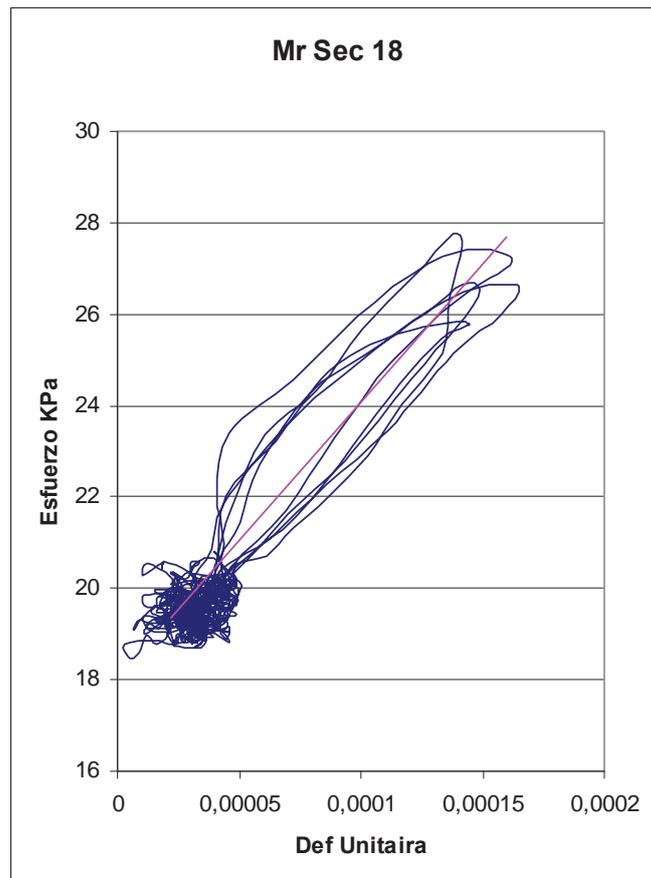


Figura A .32 Gráfica Esfuerzo - Deformación de los últimos cinco ciclos

Secuencia 19 Con un esfuerzo desviador de 62 KPa y presión de confinamiento de 21 KPa. $M_R = 79,320.11$ KPa

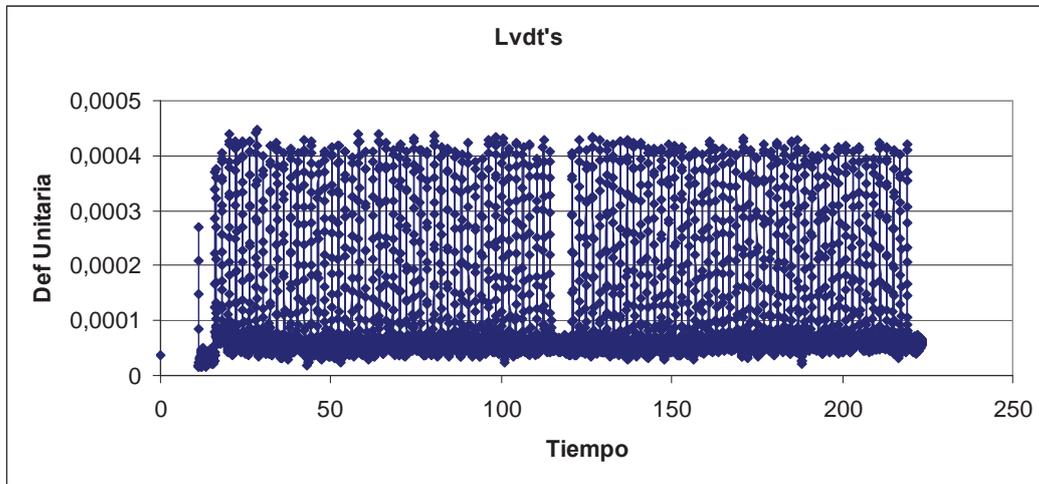


Figura A .33 Gráfica deformación unitaria contra tiempo

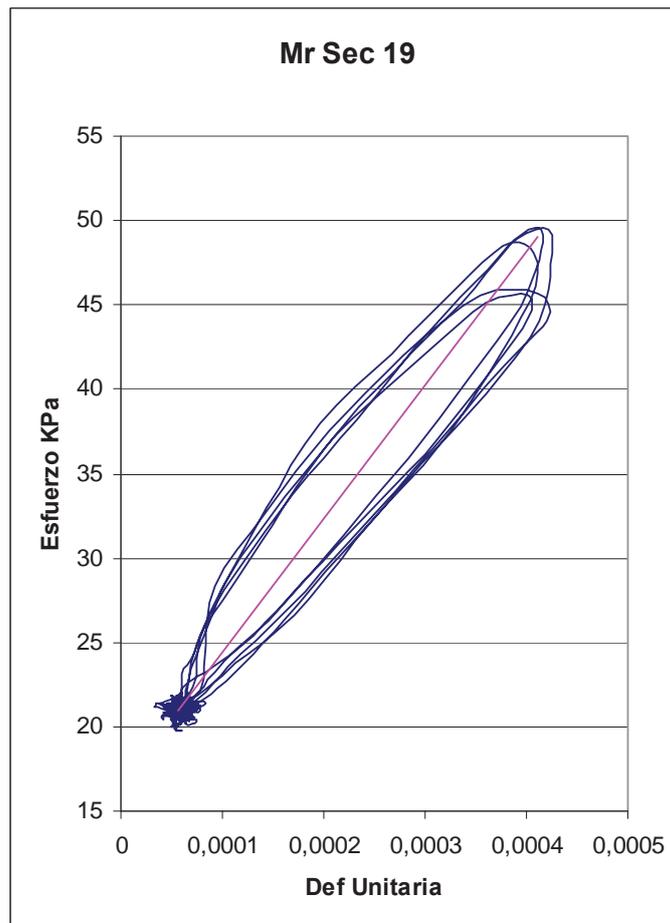


Figura A .34 Gráfica Esfuerzo - Deformación de los últimos cinco ciclos