

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Acondicionamiento de un Equipo Triaxial Cíclico
Para la Estimación de Módulo Resiliente, Utilizado
en el Diseño de Pavimentos**

Luis Eduardo Ayala Velasco

Fabricio Yépez, PhD, director de tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención
del título de Ingeniero Civil

Quito, enero de 2013

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Acondicionamiento de un Equipo Triaxial Cíclico
Para la Estimación de Módulo Resiliente, Utilizado
en el Diseño de Pavimento**

Luis Eduardo Ayala Velasco

Fabricio Yépez, PhD.

Director de la Tesis

Fernando Romo, MSc.

Director de la Carrera de Ingeniería Civil y

Miembro del Comité de Tesis

Quito, enero 2013

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art.144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: Luis Eduardo Ayala Velasco

C. I.: 1716075930

Fecha: Enero, 2013.

A mi Madre, mi apoyo y mi fuerza para ser mejor cada día.

Gracias mamá por estar siempre a mi lado.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas aquellas personas que estuvieron a mi lado en algún momento de este camino. A mi familia, en especial mis abuelos que han sido mis segundos padres y mi tía Alvita que ha sido otra madre para mí. A mis hermanos Andrés y Juliana, Gracias por serlo.

A mis amigos, todos con los que he compartido alguna etapa de mi vida, algunos siguen hasta hoy, Gracias por estar.

También al Ing. César Landázuri Soto, quien con sus enseñanzas levantó mi interés por esta carrera y a su hijo, el Ing. César Landázuri Ludeña, quien impulsó y fue una guía importantísima durante este trabajo, Gracias por todo.

Resumen

El diseño de pavimentos confiables y duraderos es una de los principales objetivos de la ingeniería de transporte. Para esto, se han elaborado varios conceptos que permiten entender de mejor manera el comportamiento del pavimento ante las cargas que son sometidos por parte del tráfico y las inclemencias de la naturaleza y del tiempo. Uno de estos conceptos es el de módulo resiliente. Sin embargo, la falta de equipos para llevar a cabo el ensayo en el Ecuador ha obligado a limitar el diseño al uso de correlaciones en base a otros ensayos, como el CBR. El presente trabajo tiene como objetivo principal el acondicionamiento de un equipo triaxial cíclico adquirido por un laboratorio particular para la realización de ensayos de módulo resiliente, lo que permitirá obtener datos más precisos y acordes a la realidad del Ecuador.

Abstract

The design of reliable and durable pavement structures is one of the main objectives of the transport engineering. For this purpose, several concepts that allow better understanding of pavement performance under traffic loads and environmental effects have been developed. One of these concepts is the resilient modulus. However, the lack of equipment to carry out the essays in Ecuador has led the design to be limited to the use of correlations based on other tests such as CBR. The main objective of this work is the setup of a cyclic triaxial equipment acquired by a private laboratory for resilient modulus essays, allowing more precise, and consistent data with the reality of Ecuador.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	11
1.1.	Introducción.....	11
1.2.	Antecedentes.....	12
1.3.	Definición y uso de C.B.R.....	13
1.4.	Introducción de métodos dinámicos	15
1.5.	Definición de Módulo Resiliente.....	15
1.6.	Importancia del Módulo Resiliente y su aplicación en el diseño de pavimentos.....	17
2.	ACONDICIONAMIENTO DEL EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO	19
2.1.	Descripción del equipo triaxial cíclico	19
2.1.1.	Cámara de presión triaxial	20
2.1.2.	Unidad de carga	22
2.1.3.	Equipo de medición de respuesta y carga del espécimen.	24
2.1.4.	Equipo de preparación del espécimen.....	27
2.2.	Calibración de los equipos de medición.....	28
2.2.1.	Calibración de los transductores lineales LVDT's	28
2.2.2.	Calibración de la celda de carga.	29
3.	PRUEBA DE MÓDULO RESILIENTE	32
3.1.	Descripción de la muestra.....	32
3.1.1.	Ensayo de clasificación.....	32

3.1.2.	Ensayo de compactación.....	32
3.1.3.	C.B.R. de suelos compactados en laboratorio.....	33
3.2.	Ensayo de la muestra	34
3.3.	Resultados del ensayo.....	39
4.	Conclusiones	42
5.	Recomendaciones	43
6.	Bibliografía	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquemas de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos.....	11
Figura 1.2	Esquema del ensayo de C.B.R.....	14
Figura 1.3	deformación de materiales no ligados ante la carga del tráfico (Huang 2004)	16
Figura 2.1	Equipo moderno de Módulo Resiliente y sus partes	20
Figura 2.2	Esquema de cámara triaxial con LVDT's externos	21
Figura 2.3	Cámara triaxial	22
Figura 2.4	Ciclo de carga y determinación de valores máximos y mínimos	23
Figura 2.5	Panel de control de válvulas de presión	23
Figura 2.6	Celda de carga electrónica.....	24
Figura 2.7	Transductores lineales	25
Figura 2.8	DAQ, sistema de adquisición de datos	26

Figura 2.9 Pantalla del programa de control LabVIEW	26
Figura 2.10 Molde partido de acero y pie de acero para compactación de muestras	27
Figura 2.11 Curva de calibración LVDT's.....	30
Figura 2.12 Calibración celda de carga	31
Figura 3.1 Resultados de ensayos de clasificación	33
Figura 3.2 Curva de compactación de la muestra	34
Figura 3.3 Muestra compactada.....	36
Figura 3.4 Muestra al concluir el ensayo.....	39
Figura 3.5 Tiempo vs Deformación, Secuencia 9.....	40
Figura 3.6 Tiempo vs Deformación, Sec. 9, 5 últimos ciclos.....	40
Figura 3.7 Módulo Resiliente vs. Suma de esfuerzos principales	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Datos de calibración LVDT's	29
Tabla 2.2 Datos calibración celda de carga	31
Tabla 3.1 Resultados CBR.....	34
Tabla 3.2 Secuencias de ensayo.....	38

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1. Introducción

El pavimento es la superficie donde transitan los vehículos y está formada por varias capas de distintos materiales destinados a distribuir y transmitir las cargas producidas por los vehículos a la base de suelo natural (Gutierrez, 2004). Los pavimentos se dividen en dos tipos: pavimentos flexibles (asfalto) y pavimentos rígidos (concreto hidráulico). En la Figura 1.1 se muestra un esquema de una sección de estos dos tipos de pavimentos.

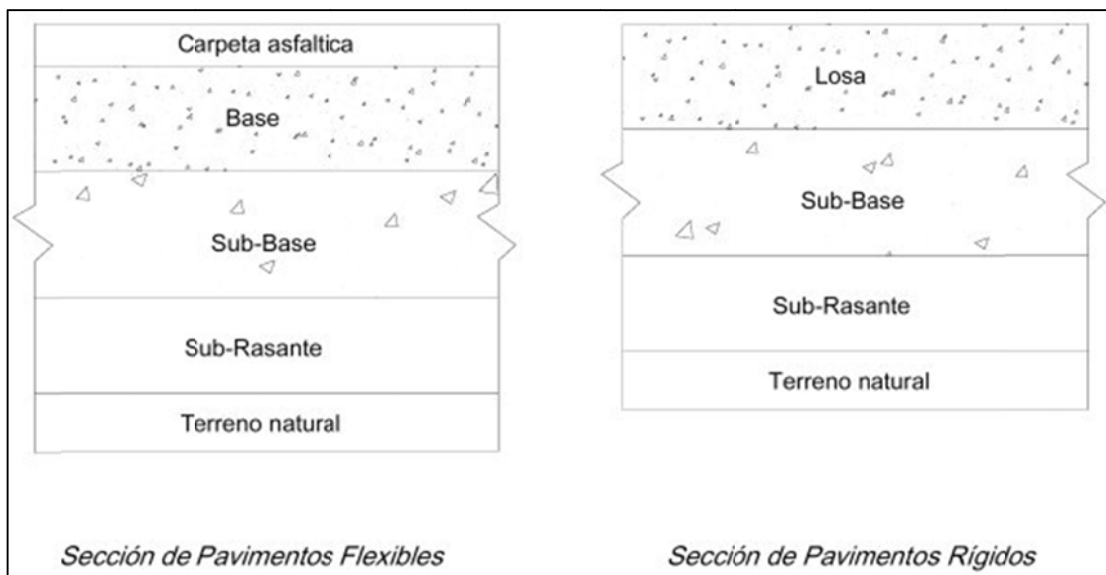


Figura 1.1 Esquemas de estructuras de pavimentos flexibles y rígidos

La disposición y el espesor de estas capas varía dependiendo del tipo de pavimento requerido y de las características de los materiales usados en su elaboración. Estas características son estudiadas mediante ensayos de campo y laboratorio que permiten un mejor entendimiento de sus propiedades y además intentan hacer predicciones sobre su comportamiento y desempeño en el futuro.

El estudio de diseño de pavimentos se ha llevado a cabo desde la creación de los pavimentos, y se ha desarrollado conforme las técnicas se han mejorado y la tecnología lo

ha permitido. Actualmente en el mundo, uno de los criterios de diseño más usado es el obtenido a través del C.B.R. (California Bearing Ratio), creado por Porter en 1938.

Sin embargo este método, aún muy fiable y usado, ha demostrado tener ciertas limitaciones con respecto a la naturaleza dinámica de los esfuerzos a los que los pavimentos están sometidos por parte de los vehículos. Para suplir esta deficiencia, se desarrollaron nuevos conceptos, y con ellos, nuevos métodos para ensayar los materiales usados en la fabricación de pavimentos.

Estos nuevos conceptos en el diseño de pavimento analizan y estudian el comportamiento elástico de los pavimentos. En realidad, los pavimentos no se consideraban elásticos por presentar una deformación permanente con cada carga que se aplica sobre ellos; sin embargo, se demostró que tras varios ciclos de carga los materiales se endurecen y solo se produce en ellos una deformación recuperable, esta deformación se la conoce como Deformación Resiliente.

El presente trabajo tiene como objetivo el acondicionamiento de un equipo triaxial cíclico usado, adquirido por la empresa Geosuelos con el fin de poder llevar a cabo ensayos de materiales granulares de base, subbase y subrasante para el diseño de estructuras de pavimento.

1.2. Antecedentes

Desde la creación de los primeros vehículos fue evidente la necesidad de caminos duraderos y resistentes a desgastes producidos por el tráfico y la misma naturaleza. El diseño de pavimentos se ha desarrollado conforme la teoría de pavimentos se fue ampliando y la tecnología avanzando, con el fin de construir mejores y más resistentes estructuras de pavimentos.

Existen un sinnúmero de estudios destinados a comprender el comportamiento de los materiales usados en la construcción de pavimentos, con el fin de prever posibles causas de las fallas; entre las más comunes están los agrietamientos, hundimientos, desgaste, etc.

La División de Carreteras de California (California Division of Highways) fue uno de los primeros institutos en realizar estos ensayos y emitir recomendaciones, basadas en la experiencia mayormente, sobre materiales y diseño de pavimentos. En los años 40's se publicaron los primeros resultados sobre el Ensayo de C.B.R. (California Bearing Ratio), que se extendería ampliamente en el mundo, y se convertiría en el principal criterio de diseño debido a la gran aceptación a nivel mundial de sus resultados (Brown, 1997). Sin embargo, futuras investigaciones demostrarían que esta prueba tendría una gran limitación al ser un ensayo estático, siendo que se basa en la capacidad de una muestra de suelo ante una carga constante.

En los años 50's Seed y sus colaboradores de la universidad de California estudiaron una nueva prueba que simulaba de mejor manera el paso del tráfico sobre la estructura, y mostraba de forma más acertada las propiedades resilientes de éstas ante carga repetidas. Este ensayo permitía analizar más profundamente el comportamiento de los materiales fuera del límite elástico, lo cual se ha demostrado, tiene mayor relación con las fallas de las estructuras de pavimentos.

1.3. Definición y uso de C.B.R.

Como señala Brown (1997), el C.B.R. es el método casi mundialmente aceptado para la caracterización y diseño de pavimentos alrededor del mundo. Fue creado en los años 30's por el Departamento de Carreteras de California y popularizado por James Porter al

demostrar que las correlaciones de sus “Ensayos de Soporte de Carga de Suelos” eran consistentes con las deformaciones de los pavimentos para caminos y carreteras.

El ensayo de C.B.R. es un índice de prueba empírico que relaciona la presión necesaria para penetrar una muestra de suelo con un pistón cilíndrico de 1935 mm^2 (3 in^2) de sección transversal, en un molde estándar a una tasa de 1 mm/min (0.05 in/min), con la presión necesaria para penetrar una muestra de suelo estándar (roca triturada) con un pistón y molde de las mismas características. En la Figura 1.2 se puede apreciar un diagrama de dicho ensayo y sus componentes.

Este ensayo fue tomado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para el diseño de pavimento de aeropistas durante la segunda guerra mundial, luego también aceptado por el Departamento de Carreteras de Gran Bretaña, y posteriormente difundido en casi todos los departamentos de ingeniería del mundo como el principal parámetro de diseño de pavimentos.

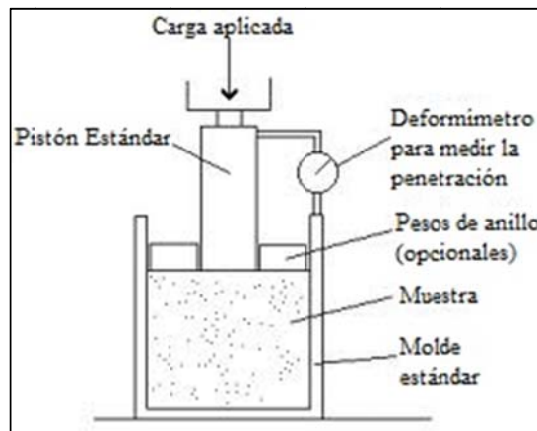


Figura 1.2 Esquema del ensayo de C.B.R.

1.4. Introducción de métodos dinámicos

Como ya se ha puntualizado previamente, el ensayo de C.B.R. muestra deficiencias con respecto a las propiedades elásticas que se presentan en los pavimentos producto de la carga cíclica, o repetida, a la que son sometidos por parte de los vehículos. El mismo Porter se refirió al hecho en las siguientes palabras (Porter, 1950):

“Los resultados son influenciados solo en un grado menor por la deformación elástica”

El ensayo fue descrito por Turnbull en el mismo año como un *“índice de resistencia al corte”*. (Turnbull 1950)

En el Reino Unido también hubo posturas acerca del alcance del ensayo C.B.R. Según Croney (1977):

“La Resistencia al corte de los suelos no es de directo interés para el ingeniero de caminos... el suelo debe operar a niveles de esfuerzo dentro del rango elástico... el ingeniero de pavimentos está, en consecuencia, más interesado en el módulo elástico de los suelos y su comportamiento frente a carga repetida”

Paralelamente a los trabajos realizados con el C.B.R. se realizaron nuevos estudios enfocados en entender estos parámetros que empezaban a tomar fuerza dentro del diseño, así Hveem y sus colaboradores de la Universidad de California presentaron su trabajo sobre el Estabilómetro y posteriormente, con la ayuda de Seed, los conceptos sobre Módulo Resiliente.

1.5. Definición de Módulo Resiliente

El pavimento fue concebido en un principio como un material plástico, ya que se presentaban deformaciones permanentes con cada carga que se aplicaba. Posteriormente se

demonstró que estas deformaciones iban disminuyendo conforme se aumentaba el número de repeticiones o ciclos de carga, hasta que finalmente desaparecían las deformaciones permanentes, o plásticas, y el material actúa como un material elástico completamente; por lo que las propiedades elásticas de los materiales se ven relacionadas profundamente con el mecanismo de carga repetida.

En la Figura 1.3 se muestra una representación del proceso de deformación de los materiales frente a cargas repetidas.

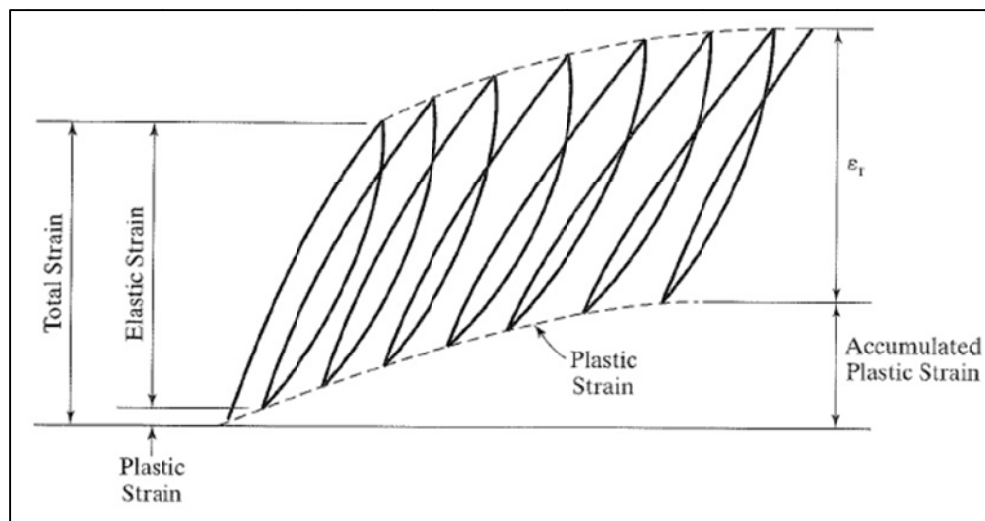


Figura 1.3 deformación de materiales no ligados ante la carga del tráfico (Huang 2004)

Esta deformación elástica permanente se conoce con el nombre de deformación resiliente, y su cociente entre el esfuerzo desviador que se aplica para generar esta deformación se conoce con el nombre de Módulo Resiliente (M_r):

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad \text{Ec. 1-1}$$

Donde,

M_r = Módulo Resiliente.

σ_1 = esfuerzo principal mayor.

σ_3 = esfuerzo principal menor.

σ_d = esfuerzo desviador.

ϵ_r = deformación axial resiliente.

1.6. Importancia del Módulo Resiliente y su aplicación en el diseño de pavimentos.

La importancia del Módulo Resiliente reside principalmente en la caracterización del material por su respuesta a cargas cíclicas que simulan el paso del tráfico sobre la estructura del pavimento. Muchas veces el pavimento presenta problemas antes de alcanzar su esfuerzo máximo de corte, determinado por el ensayo de C.B.R. por lo que conocer las características resilientes de los materiales se torna fundamental en el diseño de pavimentos.

La American Society of Highway American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), hace referencia al módulo resiliente como el principal parámetro para el diseño de pavimentos multicapas, especialmente para el dimensionamiento de las capas de materiales de subbase y subrasante, que son los cimientos de las estructuras de pavimento. De hecho, el módulo resiliente es la propiedad de material requerida para la guía de diseño *1993 AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, que es un procedimiento de diseño basado empíricamente y es el parámetro de entrada principal para la Guía de Diseño 2002 (Yau, 2002), en dónde se puede encontrar la fórmula empírica de diseño de pavimento flexible, que se presenta a continuación:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Ec. 1-2

W_{18} = número calculado de cargas de ejes simples equivalentes de 80kN (18000 lbs).

Z_R = desviación normal estándar.

S_0 = error estándar combinado de la predicción de tráfico y desempeño.

SN = número estructural (índice indicativo del grosor total de pavimento requerido).

ΔPSI = diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial y el índice de diseño de serviciabilidad final.

M_R = Módulo resiliente de la subrasante.

Esta no es la única ecuación empírica utilizada para el diseño de pavimentos, pero es un ejemplo bastante útil para demostrar el uso del módulo resiliente en el diseño de pavimentos. Los cálculos para el diseño final se realizan mediante el software proporcionado en la misma ASSHTO, en el cuál se introducen una serie de datos adicionales referentes a variables del tipo de pavimento y el ambiente en que se desarrollará.

Lamentablemente, la obtención de módulos resilientes se ve limitada a la disponibilidad de equipos y laboratorios que tengan la capacidad de llevar a cabo este ensayo, debido al costo de los equipos y complejidad del procedimiento. Por lo que, en gran parte de los lugares donde no se cuenta con esta facilidad, se utilizan distintas correlaciones de M_R basadas en resultados de C.B.R., penetración de cono dinámico, caracterización del material, entre otras.

Sin embargo, estas correlaciones, en su mayoría, son llevadas a cabo por instituciones ajenas al lugar del diseño. En el caso de Ecuador existen muy pocas instituciones que

poseen esta capacidad, por lo que se utilizan actualmente las correlaciones presentadas por AASHTO en el manual antes nombrado. Naturalmente, estas correlaciones tienen gran variabilidad con la realidad de las propiedades de los materiales del medio y se vuelve fundamental la obtención del módulo resiliente real de los materiales a ser usados en el lugar de implementación del diseño.

2. ACONDICIONAMIENTO DEL EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO

2.1. Descripción del equipo triaxial cíclico

El equipo a ser usado y los procedimientos llevados a cabo para la determinación de módulo resiliente se encuentran de acuerdo a las normas establecidas por AASHTO (T292), y con la ayuda del protocolo del *Long-Term Pavement Performance P46*, desarrollado por la División Federal de Carreteras del *U.S. Department of Transportation*.

El equipo consta de las siguientes unidades:

1. Cámara de presión triaxial.
2. Unidad de carga.
3. Equipo de medición de respuesta y carga del espécimen.
4. Equipo de preparación del espécimen.
5. Equipos misceláneos.

En la Figura 2.1 se presenta un equipo actual de módulo resiliente, indicando los 3 primeros puntos de la lista anterior.



Figura 2.1 Equipo moderno de Módulo Resiliente y sus partes

El equipo adquirido por la empresa Geosuelos consta de la cámara de presión triaxial, la unidad de carga, el equipo de preparación de la muestra y parte del equipo de medición de respuesta. El equipo de medición de respuesta adquirido consta de transductores lineales para medición de deformaciones, celda de carga diametral para medición de cargas aplicadas y acondicionador de señal. Fue adaptado a un sistema más moderno de adquisición de datos, detallado más adelante.

2.1.1. Cámara de presión triaxial

La cámara de presión es usada para contener el espécimen de prueba y el fluido confinante durante el ensayo. La deformación es medida externamente por dos transductores lineales o LVDT's, por sus siglas en inglés (*Linear Variable Differential Transformer*).

- El fluido confinante debe ser aire.

- El material de la cámara debe ser acrílico, Lexan o cualquier otro material transparente que permita ver el espécimen durante el ensayo. En la Figura 2.3 se muestra la cámara triaxial adquirida por Geosuelos.

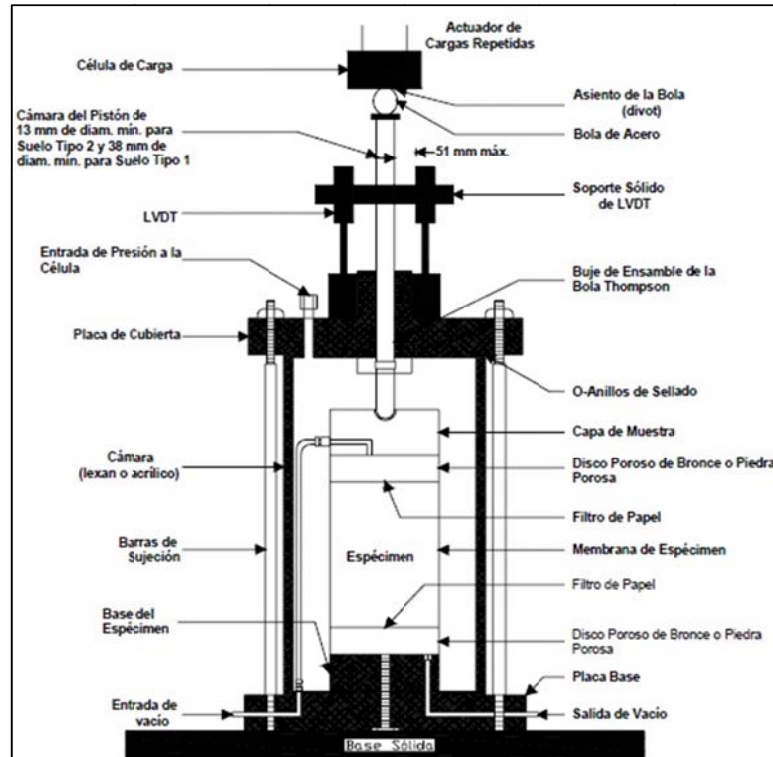


Figura 2.2 Esquema de cámara triaxial con LVDT's externos



Figura 2.3 Cámara triaxial

2.1.2. Unidad de carga

El equipo de carga consta de un aparato de carga electrohidráulica con un actuador capaz de generar ciclos repetidos de carga con un forma haversine de duración 0.1s, seguido por un tiempo de reposo de 0.9s.

Este tipo de onda se utiliza por ser una buena aproximación a la forma en que la rueda de un vehículo transmite su carga al pavimento durante un periodo determinado de 1 seg. Esto es, un valor máximo durante la aplicación directa del neumático, con un valor ascendente durante la aproximación y nulo durante el resto del periodo. Aunque otras formas de onda han sido propuestas (ej. onda de forma cuadrada), la norma T292 presentada por ASSHTO especifica el uso de una onda de forma haversine.

En la Figura 2.4 se muestra un ciclo de carga con forma haversine que debe ser aplicado a la muestra.

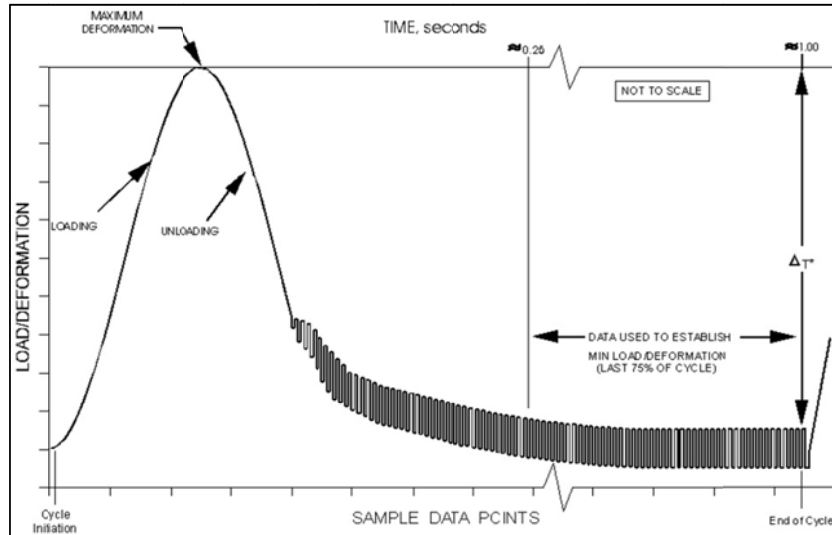


Figura 2.4 Ciclo de carga y determinación de valores máximos y mínimos

El equipo de carga consta de un sistema de válvulas de control, alimentado por un compresor de aire capaz de proveer hasta 150psi de presión al sistema. Se pueden manipular dichas válvulas en el panel de control que se presenta en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Panel de control de válvulas de presión

- Repetibilidad: ± 1 por ciento a escala completa
- Sensibilidad mínima: 2mV/V (AC) o 5mV/V (DC)



Figura 2.7 Transductores lineales

La presión dentro de la cámara y de carga que se transmiten al actuador son medidos por los manómetros presentados en la Figura 2.5 con una precisión de 0.5kPa.

Las mediciones que se obtienen de los aparatos de medición electrónicos se filtran en un acondicionador de señal individual para cada uno y se transmiten a un CPU para ser registrados con la ayuda de un sistema de adquisición de datos (DAQ por sus siglas en ingles) de marca National Instruments, el cual se muestra en la Figura 2.8. Este sistema electrónico permite cumplir con la especificación de la norma ASSHTO T292, que indica que se debe poder obtener mediciones a una tasa mínima de 500Hz, es decir una medición cada 0.02 segundos.



Figura 2.8 DAQ, sistema de adquisición de datos

Los datos se reciben por medio del Software LabVIEW de la marca National Instruments, que permite crear a necesidad las entradas y pantallas necesarias para monitorear y registrar las mediciones realizadas durante el ensayo. A continuación se presenta la pantalla de control de datos. Se pueden ver dos cuadros, en el izquierdo se monitorea en tiempo real el progreso del ensayo por cada repetición de carga y en el cuadro de la derecha se proyecta un resumen del ciclo completo. Además cuenta con un botón de inicio y apagado, así como un recuadro del fichero en el que se guarda los datos del ensayo, en la Figura 2.9 se muestra una captura de pantalla del programa.

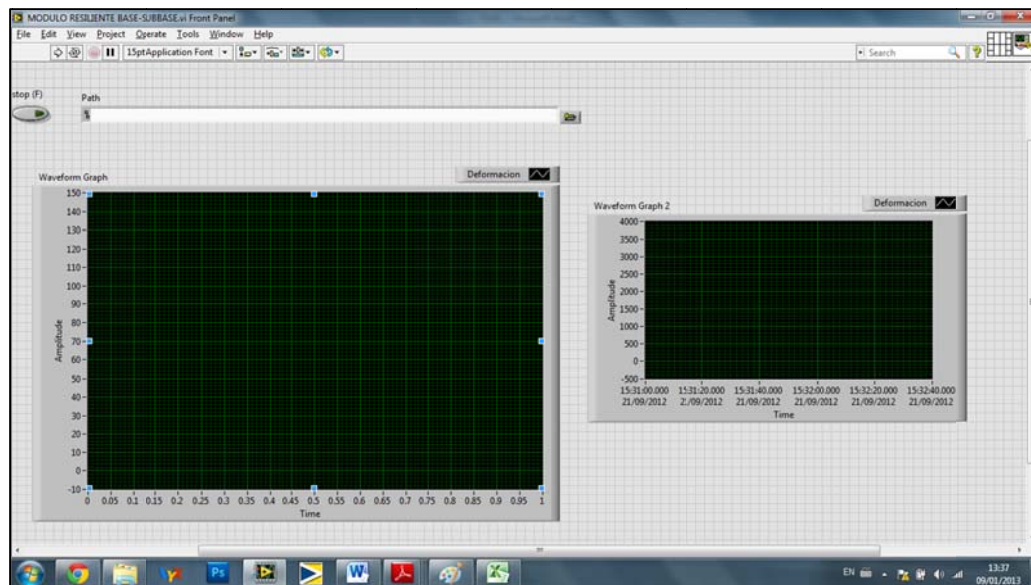


Figura 2.9 Pantalla del programa de control LabVIEW

Estos datos se guardan automáticamente en archivos compatibles con el programa Microsoft Excel, en dónde se realizan los cálculos necesarios para la determinación del Mr.

2.1.4. Equipo de preparación del espécimen

Las muestras de prueba se preparan de acuerdo a la normativa ASSHTO T292 en un molde partido de acero cilíndrico, con dimensiones de 76.3mm de diámetro interior por 186mm de altura. Externamente se asegura con ayuda de abrazaderas y se recubre internamente con una membrana de paño que disminuye la fricción al momento de realizar el compactado. La muestra se protege con una membrana de látex fabricada especialmente para las dimensiones necesarias y ésta se agarra a las cabezas de los moldes con o-rings de caucho.

Para la compactación, se adaptó a un martillo mecánico un pie de acero de 69.6mm y un brazo de 210mm de longitud.



Figura 2.10 Molde partido de acero y pie de acero para compactación de muestras

2.2. Calibración de los equipos de medición

Como se indica en la norma ASSHTO T292 y en el protocolo P46, los equipos de medición se deben calibrar periódicamente para no perder precisión en los ensayos. Este procedimiento es de vital importancia ya que lo que el computador recibe son variaciones de voltaje que deben ser transformadas en medidas coherentes con las del ensayo.

2.2.1. Calibración de los transductores lineales LVDT's

La señal de salida de los transductores lineales tiene como unidad de medida el voltio. Esta señal se procesa con la ayuda de un acondicionador de señal que ayuda a filtrar y amplificar la señal antes de pasar a la tarjeta de adquisición de datos.

La calibración de los LVDT's se lleva a cabo con la ayuda de un deformímetro digital con una precisión de 0.002mm. El deformímetro y los transductores se sostienen de un soporte especial sobre una base fija. Para llevar a cabo la calibración se varía la altura de la base y se anotan los valores proporcionados por el deformímetro y los voltajes indicados en el computador. En la Tabla 2.1 se presentan los datos de este procedimiento.

Con estos datos se realizó la regresión lineal que permite obtener la ecuación y el coeficiente de correlación respectivo. La curva de calibración y su ecuación se muestran en Figura 2.11.

El coeficiente de correlación es alto, por lo que se acepta la calibración y se introducen los valores en el software de procesamiento de datos para que los valores procesados estén en milímetros.

Tabla 2.1 Datos de calibración LVDT's

Deformación, mm	Voltaje, V
0.000	-0.900
0.116	-0.450
0.218	-0.090
0.326	0.320
0.446	0.740
0.548	1.080
0.644	1.420
0.802	2.000
0.952	2.550
1.108	3.060
1.154	3.250
1.280	3.700
1.360	4.000
1.480	4.410
1.564	4.720
1.684	5.128
1.746	5.375
1.904	5.945
2.006	6.313
2.176	6.925
2.258	7.235
2.396	7.705
2.518	8.165
2.618	8.548
2.720	8.880
2.876	9.495
3.068	10.090
3.140	10.380
3.210	10.597

2.2.2. Calibración de la celda de carga.

La calibración de la celda de carga se realizó utilizando el mismo equipo de aplicación de carga neumática del equipo triaxial. Se colocó un cilindro de acero utilizado como apoyo para ensayos de hormigón y una celda de carga “S” calibrada previamente para otros

ensayos del laboratorio. Se hizo variar la presión en el sistema neumático por medio del panel de control mientras se tomaba nota de los valores de la celda de carga, en libras, y del sistema de adquisición de datos, en voltios. Los resultados de este procedimiento se presentan en la Tabla 2.2.

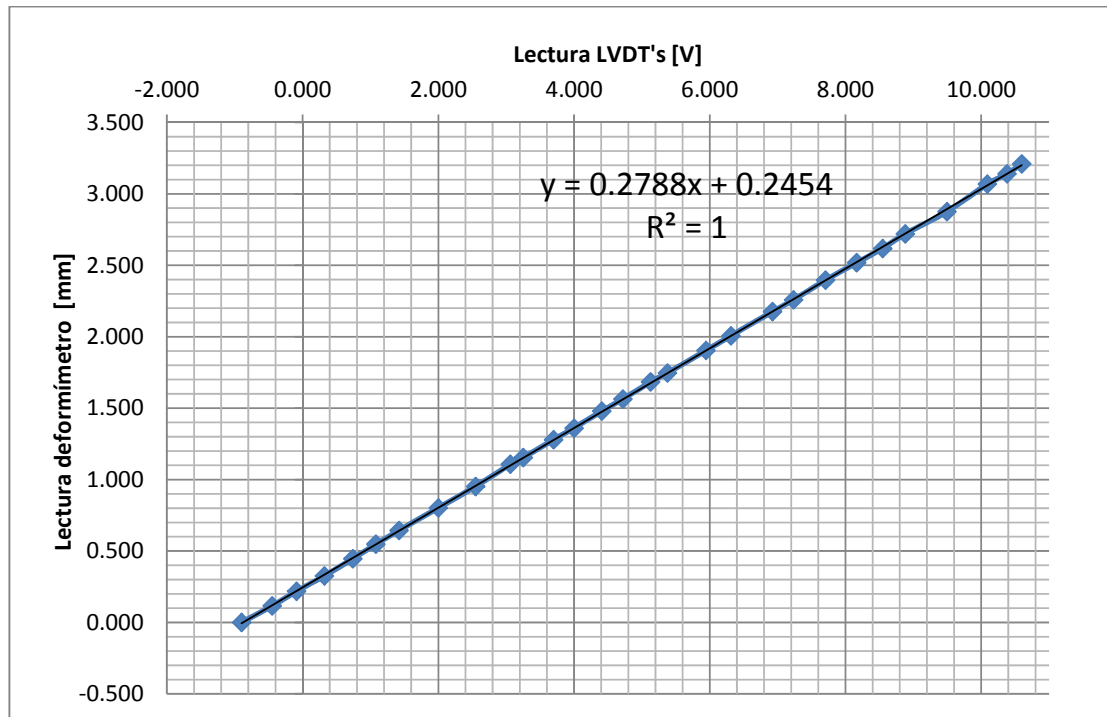


Figura 2.11 Curva de calibración LVDT's

Con los resultados se realizó el mismo procedimiento que en la calibración de los LVDT's y se obtuvieron los datos de la regresión y el valor de la correlación entre la celda de carga "S" y la celda de carga diametral. Este resultado se presenta en la Figura 2.12.

Los resultados de la regresión dan un coeficiente de correlación casi perfecto, que permite calificar la calibración como buena. Estos datos se ingresaron en el software de control para tener una lectura en libras de la celda de carga.

Tabla 2.2 Datos calibración celda de carga

Lectura celda de carga "S", lbs	Lectura celda de carga, V
15	0.035
40	0.16
88	0.3975
133	0.625
179	0.8475
224	1.07
269	1.29
311	1.51
357	1.735
400	1.95
448	2.175
474	2.305

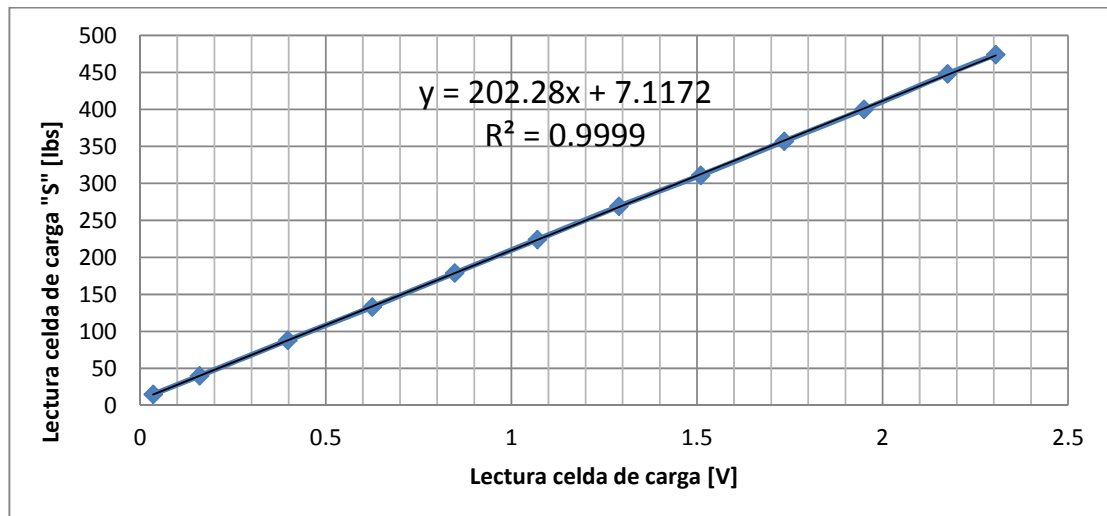


Figura 2.12 Calibración celda de carga

3. PRUEBA DE MÓDULO RESILIENTE

3.1. Descripción de la muestra

La muestra a ser ensayada se tomó de una calicata producto de un estudio de pavimentos y corresponde a una muestra granular del sur de la ciudad de Quito. Esta muestra se seleccionó al azar con el solo fin de mostrar el trabajo del equipo en la consecución del módulo resiliente.

Los ensayos realizados para caracterizar la muestra se explican a continuación y los resultados se detallan en este trabajo.

3.1.1. Ensayo de clasificación

Esta práctica consta de una serie de ensayos enfocados en obtener una clasificación de suelo de origen mineral y orgánico-mineral para propósitos ingenieriles, basado en la determinación en laboratorio del tamaño de partículas, límite líquido e índice de plasticidad (ASTM). Se encuentra normado bajo la norma ASTM D2487.

En la Figura 3.1 se presenta los resultados de los ensayos de clasificación.

3.1.2. Ensayo de compactación

El ensayo determina la relación entre el contenido de agua y la densidad seca de los suelos compactados, en moldes de 4 o 6 pulgadas con un martillo especial de 44.5N que se deja caer una altura de 18 pulgadas (ASTM). Con estos resultados se elabora la curva de compactación, que permite calcular la densidad máxima del suelo y su contenido de agua óptimo. Se encuentra normado bajo la norma ASTM 1557-02.

GOLPES		PES. HUM.	PES. SECO	CÁPSULA	W%	RESULTADOS
1.- CONTENIDO DE AGUA		203.65	197.42	26.54	3.65	
		177.06	171.89	24.03	3.50	3.57
2.- LÍMITE LÍQUIDO						
<i>La muestra no es plástica</i>						
3.- LÍMITE PLÁSTICO						
<i>La muestra no es plástica</i>						
4.- GRANULOMETRÍA				5.- CLASIFICACIÓN		
PES. INICIAL	12,022.00	ENSAYO VIA:	SECA	GRAVA	60	
PESO INICIAL PARA CÁLCULOS =			12,022.00	ARENA	29	
				FINOS	11	
TAMIZ	PES. RET.	% RETEN.	% PASA			
3"	0.00	0	100	Cu =	182	
2"	0.00	0	100	Cc =	4	
1"	322.00	3	97			
3/4"	2,275.00	19	81			
1/2"	4,623.00	38	62			
3/8"	5,609.00	47	53			
No. 4	7,232.00	60	40			
No. 10	8,283.54	69	31			
No. 40	9,511.99	79	21			
No. 200	10,738.44	89	11			
				RESUMEN		
				SUCS:	GP/GM	
				AASHTO:	A-1-a	
				IG(86):	0	
				IG(45):	0	
<i>Nombre de Grupo: Grava pobremente gradada con limo y arena</i>						
<i>Descripción Particular: Color Café</i>						

Figura 3.1 Resultados de ensayos de clasificación

En la Figura 3.2 se muestra la curva de compactación y los resultados del ensayo.

3.1.3. C.B.R. de suelos compactados en laboratorio

Esta práctica cubre la determinación de CBR de materiales subrasante, subbase y base para pavimentos compactados en laboratorio por medio del procedimiento descrito anteriormente (ASTM). Esta normado bajo la norma ASTM D1883-05.

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados del ensayo de CBR realizados a la muestra.

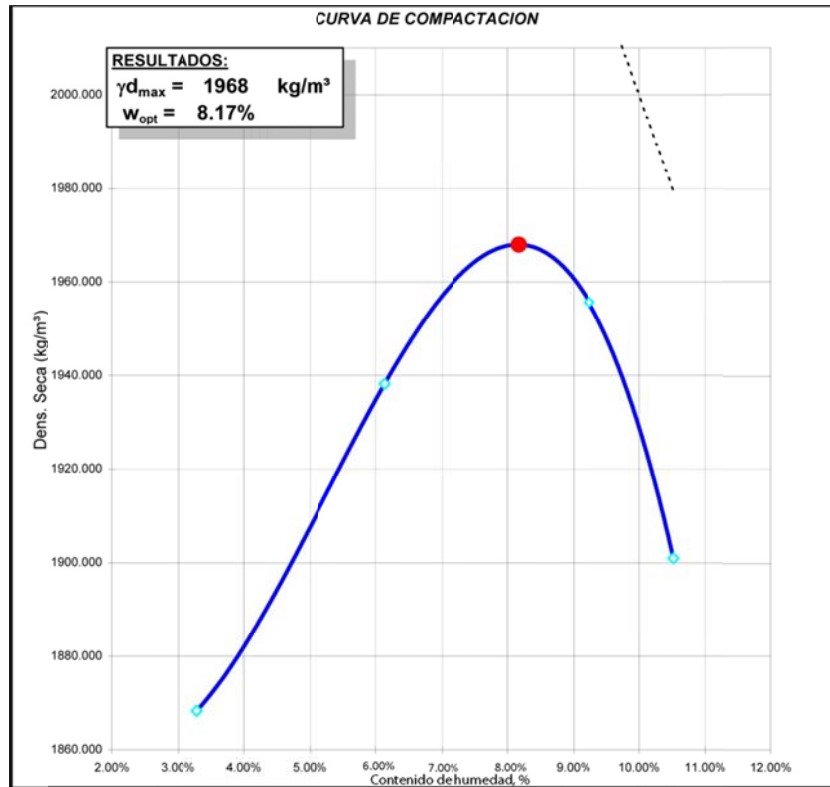


Figura 3.2 Curva de compactación de la muestra

Tabla 3.1 Resultados CBR

Molde	Golpes/capa	Datos de Moldeo			Datos Luego de Saturar				CBR (%)		Sobre carga (kg)	Corrección Lineal (pulg)	Esponj. Máximo
		Dens. Seca (kg/m³)	Grado de Compact.	Humedad	Dens. Seca (kg/m³)	Grado de Compact.	Humedad Superf. (%)	Humedad Media (%)	a 0.1 pulg	a 0.2 pulg			
1	56	1,809	91.9%	5.34%	1,770	89.3%	11.61%	11.61%	31.0	41.3	4.00	0.005	0.11%
2	25	1,802	91.6%	5.22%	1,883	95.7%	11.71%	11.71%	17.4	24.5	4.00	0.002	0.13%
3	10	1,782	90.6%	5.82%	1,811	92.0%	12.18%	13.63%	9.6	12.4	4.00	-0.001	0.17%

3.2. Ensayo de la muestra

Los pasos que se describen a continuación fueron realizados con la guía del protocolo LTTP P46, basado en normas AASHTO T292 para la determinación del módulo resiliente de materiales granulares no ligados de base/subbase y subrasante para pavimentos.

Primero se presentan los pasos seguidos para preparar la muestra:

1. Se tomó una cantidad aproximada de 12.0kg de la muestra y se la secó en horno a 60°C durante una noche.
2. Previamente se llevaron a cabo los cálculos pertinentes para poder realizar una mezcla de suelo y la cantidad necesaria de agua que concuerde con la densidad y el contenido de humedad que el material tenía en el lugar de investigación. Estos datos se obtuvieron mediante un ensayo de densidad nuclear in situ.
3. Se realizó la mezcla de suelo seco y la cantidad de agua calculada sobre una bandeja de metal y se dejó reposar la mezcla en doble bolsa de plástico durante una noche.
4. Se preparó el molde partido ajustándolo con una abrazadera y se extendió una membrana de latex en su interior. Con la ayuda de una bomba de vacío se extrajo el aire contenido entre el molde y la membrana por medio de una válvula especial del molde.
5. Se tomó la cantidad necesaria de suelo para que la muestra tenga la misma densidad que la que tenía el material en el terreno en el volumen del molde; esta cantidad se dividió en seis partes para realizar la compactación en seis capas.
6. El molde se acomodó sobre la base de la cámara triaxial y una piedra porosa sobre ella.
7. Se colocó 1/6 de la mezcla de suelo y agua y, con la ayuda del martillo mecánico y el pie de acero, se compactó la muestra hasta que ésta tenga dos pulgadas de

altura, que es $1/6$ de la altura total de la muestra. A veces es necesario compactar y revisar si se ha logrado la altura deseada, de no ser así, se vuelve a compactar.

8. Terminado este procedimiento se escarificó la superficie de la capa compactada y se procedió con la siguiente capa. Se repitió hasta completar la altura total de la muestra.
9. Se aflojó la abrazadera del molde y se retiró. En la Figura 3.3 se puede ver la muestra compactada y colocada sobre la base del marco de la cámara triaxial.



Figura 3.3 Muestra compactada

10. Una vez sobre la base del marco se recubrió con una nueva membrana la muestra en caso de que la primera haya sufrido daños por la naturaleza vibratoria de la compactación. Se colocó la celda de carga sobre la muestra y la cámara acrílica en su lugar para sellar la muestra.

11. La cámara triaxial se colocó bajo el marco de aplicación de carga con el vástago en su lugar y los LVDT's ajustados a este y se conectó la manguera de presión triaxial proveniente del panel de control.

Una vez preparada la muestra se procedió con el ensayo de módulo resiliente como sigue:

1. Se aplicó una presión de confinamiento de 103.4 kPa a la cámara triaxial.
Debido a que el vástago debe tener un contacto positivo con la muestra se aplica un esfuerzo de contacto equivalente al 10% del esfuerzo axial máximo.
2. Se ajustó la presión que se transmitirá al actuador neumático, para aplicar el esfuerzo cíclico correspondiente a la secuencia de acondicionamiento. En esta secuencia se aplican 500 repeticiones de un esfuerzo máximo de 103.4 kPa, incluyendo el esfuerzo de contacto inicial; si la muestra se sigue deformando después de las 500 repeticiones, se aplicarán 500 más. En la Tabla 3.2 se muestran las secuencias a seguir con las cargas correspondientes aplicadas a la muestra y el número de repeticiones para cada una.
3. Se enciende el sistema de carga al mismo tiempo que se inicia el programa de registro de datos. Al completarse el número de repeticiones se apagan ambos controles.
4. Una vez terminada la secuencia de acondicionamiento, se redujo la presión de confinamiento a 20.7 kPa y se ajustó la presión del actuador para transmitir un esfuerzo axial máximo de 20.7 kPa. Se aplicaron 100 repeticiones de carga como indica la Tabla 3.2 en la secuencia 1.

Tabla 3.2 Secuencias de ensayo

Secuencia No.	Presión de Confinamiento S_3		Carga Axial Máx. S_{max}		Carga cíclica Scíclica		Carga de contacto $0.1S_{max}$		No. De Aplicaciones de carga
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500 - 1000
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	0.3	100
2	20.7	3	41.4	6	39.3	5.7	2.1	0.3	100
3	20.7	3	62.1	9	60.0	8.7	2.1	0.3	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.4	0.5	100
5	34.5	5	68.9	10	65.5	9.5	3.4	0.5	100
6	34.5	5	103.4	15	100.0	14.5	3.4	0.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.1	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	131.0	19.0	6.9	1.0	100
9	68.9	10	206.8	30	199.9	29.0	6.9	1.0	100
10	103.4	15	68.9	10	58.6	8.5	10.3	1.5	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	196.5	28.5	10.3	1.5	100
13	137.9	20	103.4	15	89.6	13.0	13.8	2.0	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	262.0	38.0	13.8	2.0	100

Nota: el ensayo se interrumpe si se alcanza un 5% de la deformación unitaria o la muestra falla.

- El ensayo se continuó hasta alcanzar el criterio de falla mencionado. Al ocurrir esto se retiró la muestra del marco y se tomó una muestra para realizar un ensayo de contenido de agua comprobatorio. En la Figura 3.4 se presenta la muestra después de concluir el ensayo.



Figura 3.4 Muestra al concluir el ensayo

3.3. *Resultados del ensayo*

Los datos obtenidos en el software de adquisición de datos se guardan en un fichero compatible con el programa Microsoft Excel en donde se llevan a cabo los cálculos necesarios para la obtención del valor de módulo resiliente como se indicó en la Ec. 1-1.

Para este cálculo se toman solo los últimos 5 ciclos de carga de cada secuencia y se promedian los resultados para tener un solo valor de módulo resiliente.

En la Figura 3.5 se muestran los datos obtenidos en la secuencia 9 del ensayo realizado.

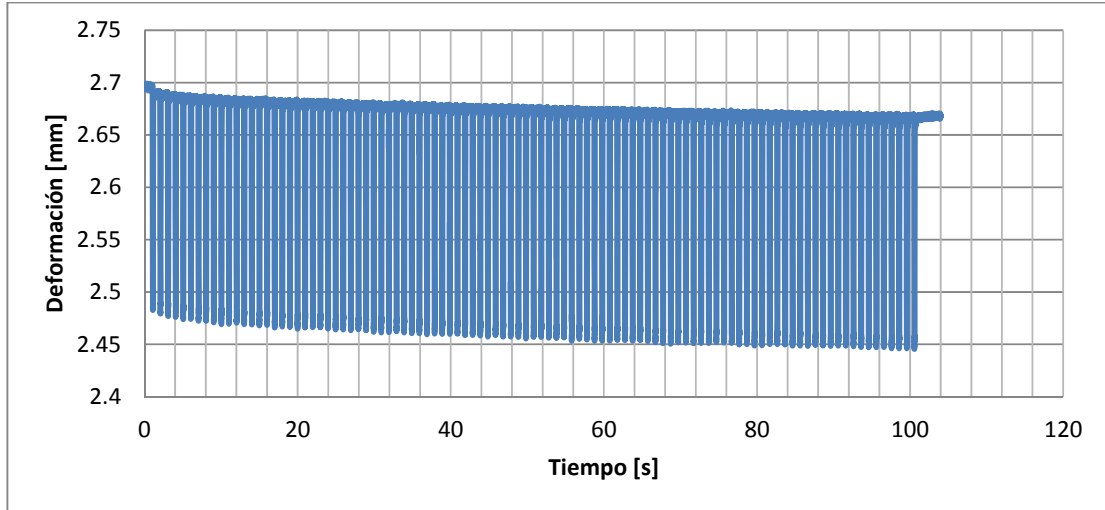


Figura 3.5 Tiempo vs Deformación, Secuencia 9

En la Figura 3.6 se muestran los últimos 5 ciclos de carga más detalladamente, se puede observar fácilmente la deformación resiliente producto de las aplicaciones de carga anteriores.

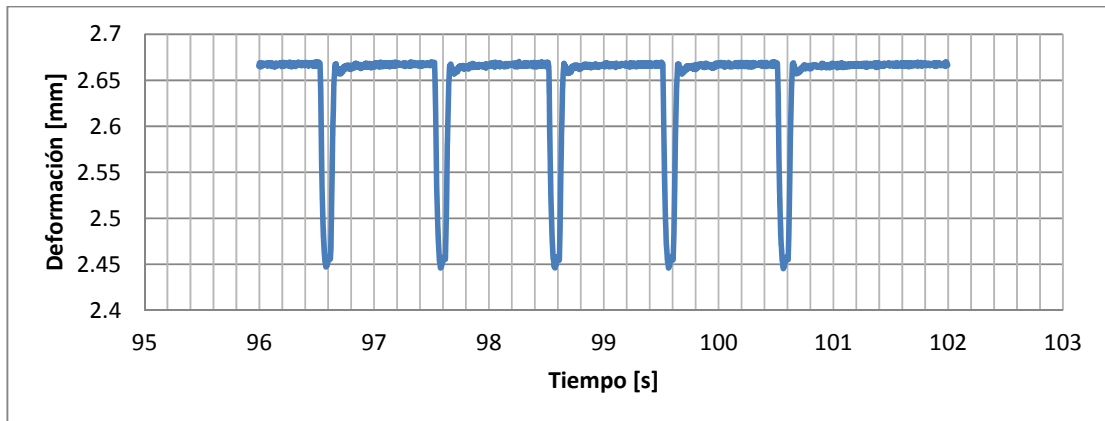


Figura 3.6 Tiempo vs Deformación, Sec. 9, 5 últimos ciclos

Con los valores obtenidos de todas las secuencias se genera una regresión log-log de los valores de módulo resiliente para cada secuencia y la suma de esfuerzos principales, de la forma:

$$Mr = k_1 \theta^{k_2} \quad \text{Ec. 3-1}$$

Mr = módulo resiliente

k_1, k_2 = constantes de regresión.

En la Figura 3.7 se muestran los datos del ensayo y su respectiva regresión.

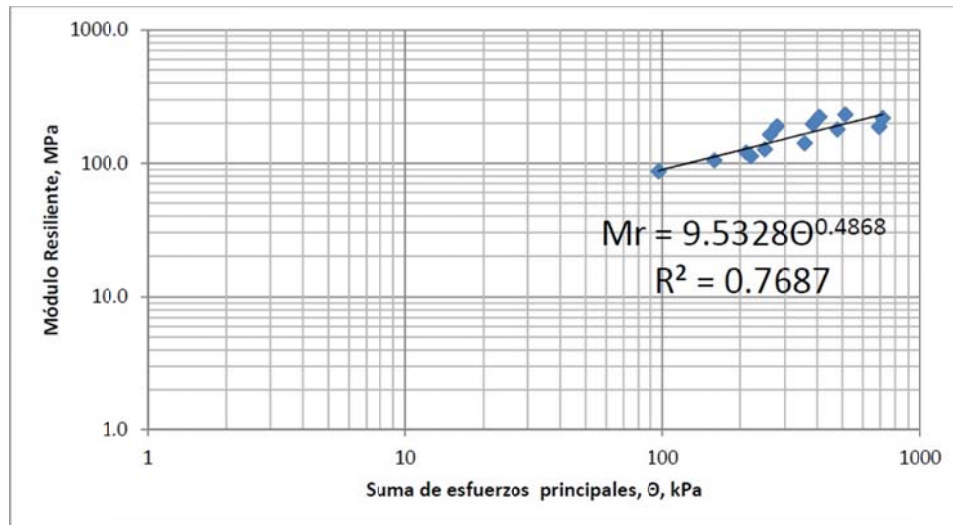


Figura 3.7 Módulo Resiliente vs. Suma de esfuerzos principales

El módulo resiliente de la muestra calculado a partir del ensayo de CBR se realiza con la siguiente fórmula, indicada en la guía de diseño AASHTO 1993:

$$M_r = 3000 \times CBR^{0.65} \quad \text{Ec. 3-2}$$

$$M_r = 3000 \times 41.3^{0.65} = 33689.0 \text{ psi} = 232 \text{ MPa}$$

El módulo resiliente de la muestra calculado para la mayor combinación de esfuerzos $\theta=962$ kPa se calcula con la Ec. 3-1, propuesta para la regresión:

$$Mr = k_1 \theta^{k_2} = 9.5358 \times 962^{0.4868} = 270 \text{ MPa}$$

Se puede evidenciar una diferencia importante entre el valor calculado con la correlación propuesta y el resultado del ensayo de módulo resiliente realizado.

4. Conclusiones

- El estudio de materiales para pavimentos es fundamental para poder realizar un diseño confiable y duradero.
- El ensayo de CBR es un parámetro usado por varios departamentos de ingeniería de transporte alrededor del mundo, debido a la gran difusión que tuvo por el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos.
- El CBR es un índice de resistencia al corte de los materiales que no toma en cuenta las propiedades elásticas de los pavimentos.
- Los pavimentos se comportan como un material elástico después de varias repeticiones de carga instantánea, como las que producen el paso del tráfico.
- Es necesario realizar análisis que incluyan este comportamiento, debido a que muchas veces los pavimentos pierden su efectividad antes de fallar por esfuerzo cortante.
- El ensayo de módulo resiliente es una técnica que simula la carga producida por el tráfico y permite aproximar el comportamiento del pavimento ante la naturaleza repetitiva de estos esfuerzos.
- Los métodos de diseño actuales se basan en el concepto de módulo resiliente y presentan una serie de correlaciones con otros ensayos, debido a la dificultad de obtener este valor directamente en algunos medios, como ocurre Ecuador.
- Debido a que las correlaciones son una medida indirecta de las propiedades resilientes de los materiales usados para la fabricación de pavimentos en

Ecuador, se vuelve de gran importancia la adquisición de estos equipos en los laboratorios locales para tener datos más confiables y apegados a la realidad. El equipo triaxial que fue acondicionado por la empresa Geosuelos constituye una herramienta fundamental en la consecución de este objetivo.

- Los primeros ensayos realizados mostraron ciertas dificultades que con la práctica fueron disminuyendo. Se pueden nombrar dificultades en el armado de la máquina, manejo del software de adquisición de datos, manejo de los datos, entre otros.
- Los elementos usados para poner en funcionamiento el equipo cumplen con las normas especificadas por la ASSHTO.
- Los resultados obtenidos son aceptables, ya que muestran coherencia con resultados encontrados en la literatura, sin embargo se necesita un mayor número de ensayos para comprobar la fiabilidad del procedimiento.

5. Recomendaciones

- Difundir e impulsar el uso de este ensayo en los diseños de pavimentos actuales en el Ecuador.
- Mejorar los sistemas de control del equipo de carga a fin de que todos los controles sean automatizados, permitiendo un trabajo más exacto y eficaz.
- Realizar un mayor número de ensayos que permitan mejorar los procedimientos y aseguren resultados más confiables de módulo resiliente.

- Se recomienda realizar trabajos que comprueben con un mayor número de ensayos las correlaciones propuestas, con el fin de que estas sean validadas o modificadas para que se ajusten mejor a la realidad nacional.

6. Bibliografía

AASHTO. “Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice”. 2008.

Brown, S. F. “Achievements and Challenges in Asphalt Pavement Engineering”. ISAP - 8th International Conference on Asphalt Pavements - Seattle, 1997.

Pérez, S. C. “Puesta a Punto de un Equipo Triaxial Cíclico para Módulo de Resiliencia”. Universidad Michoacana de San Nicolás. Morelia-México, 2008.

Croney, D, “The design and performance of road pavements”, London, HMSO, 1977.

Gutierrez, F. “Rediseño geométrico del distribuidor vial de la UDLA-P en la ruta Quetzalcóatl”. Universidad de las Américas Puebla. Puebla-México, 2004.

Huang, Y. H. “Pavement Analysis and Design”. University of Kentucky. Ed. Prentice Hall. New Jersey, 2004.

LTPP. “Protocol P46 Resilien Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils”. U.S. Department of Transportation. Virginia, 1996.

Porter, O. J. “Development of the original method for highway design”, Development of CBR flexible pavement design method for airfields - a symposium, *Trans. ASCE*, 115, 461-467, 1950.

Turnbull, W J, “Appraisal of the CBR method”, Development of CBR flexible pavement design method for airfields - a symposium, *Trans. ASCE*, 547- 554, 1950.

Yau, A y Von Quintus, H. “Study of LTPP laboratory resilient modulus test data and response characteristics: final report”. United States Federal Highway Administration (FHWA). Office of Infrastructure Research and Development. Virginia, 2002.

www.astm.org

<http://www.pavementinteractive.org>