

Comportamiento del Módulo Resiliente en Suelos Tipo A - 2 - 4 y A - 2 - 6 Considerando el Efecto del Contenido de Humedad - con Aplicación al Diseño

Arcos Casillas Jaqueline

(a) Peres Núñez Washington, washington.nunez@ufrgs.br

Recibido: 03/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

Publicado: 10/11/2024

RESUMEN

El presente documento presenta el análisis de dos tipos de suelos de subrasante A - 2 - 4 y A - 2 - 6, los cuales según su caracterización presenta comportamientos diferentes por la composición estructural perteneciente a las partículas internas del propio suelo. Este comportamiento de igual manera es afectado por el porcentaje de humedad introducido en el estudio del suelo. Se determinó el módulo resiliente por el método empírico y método experimental, el método empírico consiste en el uso de ecuaciones empíricas que están en función de la capacidad de soporte CBR, por otro lado el método experimental consiste en determinar el módulo resiliente en siete muestras para cada tipo de suelo realizado en el equipo triaxial cíclico Servo - Pneumatic Universal Testing Machine CRT-UTM-UN de la línea COOPER TECHNOLOGY que tiene incorporada en su funcionamiento los parámetros de la normativa AASHTO T307-99, las muestras para el estudio tienen porcentajes de variación de contenido de humedad, en el caso del suelo tipo A-2-4 se consideró los siguientes porcentajes de humedad: $w_{opt}+2$, $w_{opt}+1$, w_{opt} , $w_{opt}-1$, en el caso del suelo tipo A-2-6 se consideró los porcentajes de humedad: $w_{opt}+2$, $w_{opt}+1$, w_{opt} , $w_{opt}-1$, $w_{opt}-2$, observando el comportamiento de módulo resiliente al esfuerzo axial aplicado dentro de una presión de confinamiento, se verificó la deformación acumulada durante el ensayo como también la variación de módulo resiliente respecto al esfuerzo desviador. Se realizó el diseño de un pavimento flexible siguiendo el método de diseño mecánico empírico sudafricano (SAMDM), la aplicación al diseño se realizó mediante el uso de análisis de pavimento por el software EVERSTRESS 5.0 con el cual se realizó el análisis elástico en capas, determinando tensiones, deformaciones y deflexiones, introduciendo de manera adecuada los resultados de módulo resiliente a un análisis estructural de pavimentos.

Palabras clave: Módulo Resiliente, Método Empírico, Método Experimental, Análisis Elástico.

ABSTRACT

This document presents the analysis of two types of subgrade soils, A-2-4 and A-2-6, which, according to their characterization, exhibit different behaviors due to the structural composition of the internal particles of the soil itself. This behavior is also affected by the moisture content introduced in the soil study. The resilient modulus was determined using both the empirical and experimental methods. The empirical method consists of using empirical equations based on the California Bearing Ratio (CBR), while the experimental method involves determining the resilient modulus in seven samples for each type of soil using the Servo-Pneumatic Universal Testing Machine CRT-UTM-UN from COOPER TECHNOLOGY, which incorporates the parameters of the AASHTO T307-99 standard. The samples for the study have varying moisture content percentages. For A-2-4 soil, the following moisture percentages were considered: $w_{opt}+2$, $w_{opt}+1$, w_{opt} , $w_{opt}-1$. For A-2-6 soil, the moisture percentages considered were: $w_{opt}+2$, $w_{opt}+1$, w_{opt} , $w_{opt}-1$, $w_{opt}-2$. The behavior of the resilient modulus under axial stress applied within a confining pressure was observed, and the accumulated deformation during the test, as well as the variation of the resilient modulus with respect to the deviatoric stress, were verified. A flexible pavement design was carried out following the South African mechanistic-empirical design method (SAMDM). The application of the design was done using pavement analysis software EVERSTRESS 5.0, which performed the elastic layer analysis, determining stresses, deformations and deflections, and appropriately incorporating the resilient modulus results into a structural pavement analysis."

Key words: Resilient Modulus, Empirical Method, Experimental Method, Elastic Analysis.

INTRODUCCIÓN

Estructuras viales como ser: terraplenes, pavimentos y ferrovías, se hallan conformadas por diferentes capas, las cuales están dispuestas según sus características y propiedades físicas geo mecánicas para poder afrontar las exigencias de diseño. Por consecuente la subrasante según el sitio de emplazamiento de diseño va a dar lugar a diferentes tipos de materiales y características mecánicas infinitas.

La cualidad de una estructura vial es la de resistir cargas transitorias, debiendo estar en condiciones de soportar cargas de tipo dinámico cíclico y no estáticas. Sometiendo a la estructura vial a estados de esfuerzo en cada ciclo de aplicación de carga y descarga, provocando la reacción del suelo manifestado en deformaciones y desplazamientos.

Por otro lado los cambios climáticos, efecto ambiental y eventos catastróficos, influyen y afectan en consideración a las capas de la estructura vial, por lo tanto la influencia del contenido de humedad el efecto succión y la presión de poro de agua que se genera bajo cargas dinámicas, son condicionantes que pueden alterar el comportamiento de la estructura vial.

La implementación de la nueva guía mecánico - empírico para el diseño de pavimentos (MEPDG) de AASHTO en 2011, ha demostrado el rol fundamental que tienen los factores climáticos en el desempeño del pavimento, en particular los efectos de contenido de humedad.

El diseño de la estructura de pavimento fue casi exclusivamente empírico basado en la experiencia hasta aproximadamente el final de la segunda guerra mundial en 1945. La primera conferencia internacional sobre la estructura de diseño de pavimentos asfálticos fue dada por Ann Arber, en Michigan 1962, considerado el inicio de aplicación al diseño de pavimentos.

En el transcurso del tiempo se tuvieron avances de métodos de diseño las cuales conocemos ahora como mecánico – empírico (M-E).

Mecánico en atribución a la mecánica de los sólidos, que estudia los cuerpos formados por partículas que imponen restricciones de movimiento unas a otras.

Empírico debido a la asunción de parámetros de diseño basados en la experiencia.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento del módulo resiliente en suelos tipo A – 2 – 4 y A – 2 – 6, considerando efectos de humedad, con aplicabilidad al diseño de pavimentos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar las metodologías empírica y experimental para obtención del módulo resiliente.
- Realizar la evaluación del módulo resiliente por el método experimental considerando el esfuerzo de confinamiento, esfuerzo axial, esfuerzo desviador y deformaciones según los porcentajes de humedad establecidos en cada prueba.
- Calcular tensiones, deformaciones y deflexiones con ayuda del programa Everstress 5.0.
- Seleccionar los posibles modelos de estructura de pavimento, considerando el análisis en porcentaje de humedad bajo, medio y alto.
- Identificar la mejor opción para la estructura de pavimento, examinando la mejor condición de contenido de humedad.

MÓDULO RESILIENTE – MÉTODO EMPÍRICO

En nuestro medio existe bibliografía enfocada al diseño y construcción de estructuras viales, estos recomiendan modelos de correlación entre el Módulo resiliente – CBR.

Los modelos presentados a continuación $M_r = f(\text{CBR})$, son utilizados por simple estadística. No existe ninguna relación física entre el CBR y M_r , debido a que el CBR representa el índice de resistencia de los suelos y M_r representa la medida de deformación en pavimentos.

- La primera relación obtenida entre M_r – CBR fue desarrollado por Heukelom y Foster (1960). Pruebas dinámicas realizadas sobre diversos tipos de suelo. Los resultados condujeron a la siguiente relación:

$$M_r (\text{psi}) = 1565 * \text{CBR} \quad \text{Ec.A.}$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$M_r (\text{MPa}) = 10.79 * \text{CBR} \quad \text{Ec.1.}$$

- En 1962, Heukelom colaboró con Klomp. Los resultados condujeron a la siguiente relación:

$$M_r (\text{psi}) = 1500 * \text{CBR} \quad \text{Ec.B.}$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$M_r (\text{MPa}) = 10.34 * \text{CBR} \quad \text{Ec.2.}$$

- Concilio Sur Africano de Investigaciones Científicas e Industriales (CSRI), adoptó ecuaciones de $M_r = K * \text{CBR}$, modificando el factor k que depende de la prueba en campo y de laboratorio.

$$M_r (\text{psi}) = 3000 * \text{CBR}^{0.65} \quad \text{Ec.C.}$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$M_r (\text{MPa}) = 20.68 * \text{CBR}^{0.65} \quad \text{Ec.3.}$$

- Green y Hall U.S (1975). Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), presenta la siguiente correlación, comparando la medida de onda de vibración medida de propagación in situ CBR.

$$Mr (psi) = 5409 * CBR^{0.71} \quad \text{Ec.D.}$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$Mr (MPa) = 37.29 * CBR^{0.71} \quad \text{Ec.4.}$$

- Powell et al (1984), Programa Nacional de Investigación de Carreteras Cooperativas (NCHRP) (2004) y Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL).

$$Mr (psi) = 2555 * CBR^{0.64} \quad \text{Ec.E.}$$

Esta relación puede expresarse en MPa:

$$Mr (MPa) = 17.61 * CBR^{0.64} \quad \text{Ec.5.}$$

MÓDULO RESILIENTE – MÉTODO EXPERIMENTAL

El método experimental hace referencia a un ensayo de laboratorio específico que determina el módulo resiliente. En este caso el ensayo de módulo resiliente o también llamado ensayo triaxial cíclico, dinámico o de carga repetida.

La obtención de módulo resiliente a partir del ensayo triaxial dinámico de carga repetida, se encuentra bajo la norma AASHTO T 307 – 99 “Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials”.

El ensayo triaxial dinámico es el estudio de la resistencia y deformabilidad de los suelos, tiene como objeto fundamental del ensayo la obtención de módulo de resiliencia, simulando experimentalmente diferentes estados de esfuerzo variando la presión de confinamiento y esfuerzo desviador, lo que simula las cargas variantes que genera el paso de los vehículos, sobre una probeta cilíndrica.

El módulo resiliente (M_r) matemáticamente se define como la relación entre el esfuerzo desviador o dinámico (σ_d) y la deformación unitaria recuperada (ϵ_r) en una carga dinámica repetida.

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad \text{Ec.6.}$$

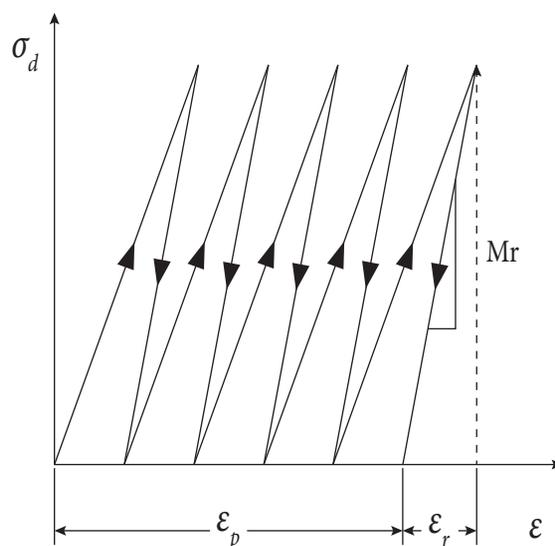
Donde:

Esfuerzo axial total (esfuerzo principal mayor).

σ_3 = Esfuerzo radial total, referido a la presión de confinamiento aplicada en la cámara triaxial (esfuerzo principal, intermedio y menor).

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = Esfuerzo desviador o dinámico, referido al esfuerzo axial repetido para este procedimiento.

ϵ = Deformación axial total debida a σ_d ; ϵ_r = Deformación axial resiliente (recuperada).



ϵ = Deformación

ϵ_r = Deformación resiliente

σ_d = Tensión desviadora ϵ_p = T Deformación resiliente

Figura 1. Comportamiento elástico – plástico, varios ciclos de carga.

(Fuente: Minaya González S., Ordóñez Huamán A.)

En la figura 1 se aprecia el comportamiento del esfuerzo desviador respecto a la deformación, a cada carga inducida se genera una deformación permanente y resiliente.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO

En este caso se utilizó el equipo Servo – Pneumatic Universal Testing Machine CRT-UTM-NU, de la línea COOPER TECHNOLOGY. Equipo que se encuentra en la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra – Bolivia.

Este equipo es una evolución de la NAT (Nottingham Asphalt Tester), desarrollada por Keith Cooper y el profesor Steven Brown en la Universidad de Nottingham. Está compuesto por un sistema triaxial para la realización de los ensayos previstos por la norma AASHTO T307 en muestras de suelo de 200 mm de alto x 100 mm de diámetro.

El equipo triaxial está conformado por:

- Cámara de compresión triaxial
- Dispositivo de aplicación de carga
- Equipo de medida de la carga

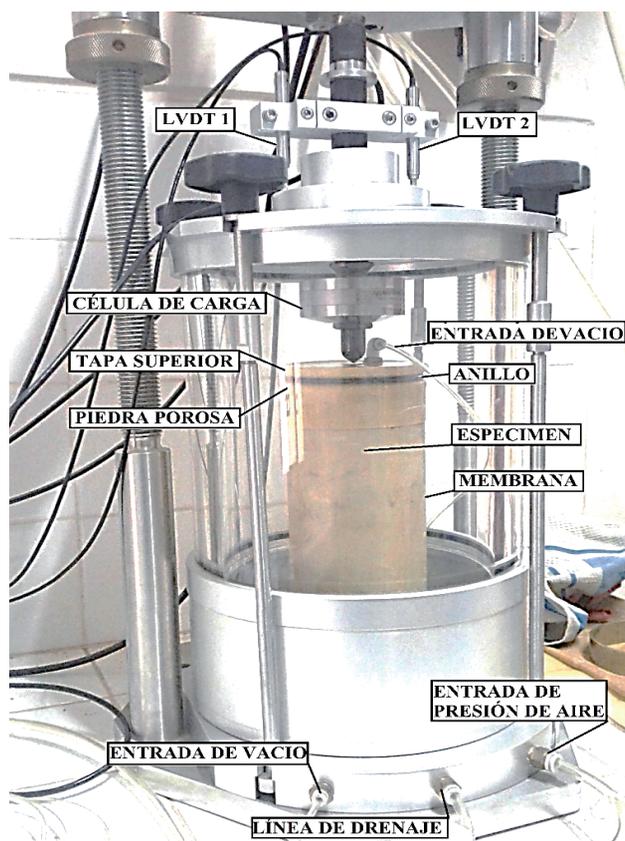


Figura 2. Montaje cámara triaxial CRT-UTM-NU.

MODELOS DE ECUACIONES PARA LA OBTENCIÓN DE MÓDULO RESILIENTE

El módulo resiliente se expresa en modelos matemáticos los cuales se utilizan para correlacionar diversos factores de esfuerzos y propiedades fundamentales del suelo, entre ellos están:

a) Modelo de esfuerzo Bulk

El modelo tiene como objetivo estimar el módulo resiliente de los suelos granulares, expresada en la siguiente ecuación:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad \text{Ec.7.}$$

Donde:

M_r = Módulo resiliente

$\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$ = Esfuerzo de Bulk

k_1 y k_2 = Constantes

Este modelo no toma en cuenta la tensión/ deformación, debido a esa deficiencia Uzan (1985), demuestra que el modelo de esfuerzo Bulk no expresa suficientemente el comportamiento resiliente en suelos granulares.

May y Witzak (1981) modificaron el esfuerzo de Bulk agregando un nuevo factor:

$$M_r = K_1 k_1 \theta^{k_2} \quad \text{Ec.8.}$$

Donde:

K_1 = Está en función de la estructura de pavimento, carga de prueba y esfuerzos.

b) Modelo de esfuerzo desviador "semi-log"

El modelo de esfuerzo desviador fue recomendado por la norma AASHTO 1992, para estimar el módulo resiliente en suelos cohesivos, en consideración que el módulo resiliente es función del esfuerzo desviador en suelos cohesivos. El modelo de esfuerzo desviador presenta la siguiente ecuación:

$$M_r = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad \text{Ec.9.}$$

Donde:

σ_d = Esfuerzo desviador

k_1 y k_2 = Constantes

c) Modelos de módulo resiliente dependiente de la succión matricial.

Los modelos matemáticos de módulo resiliente para suelos no saturados, tienen como objetivo introducir los efectos de cambio de humedad y succión debido a la variación de cambios climáticos a la obtención de módulo resiliente.

Entre algunos modelos tenemos los siguientes:

- Witzac et al (2000). Propone el modelo que incorpora un factor ambiental que presenta los cambios de contenido de humedad sobre el módulo resiliente, evaluado en para condiciones particulares de esfuerzos externos aplicados. El modelo presenta la siguiente ecuación:

$$M_r = 10^a + \frac{b-a}{1 + \text{EXP}(\beta + K_s(S - S_{opt}))} * k_1 * P_a \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$$

Ec.10.

Donde:

S = Grado de saturación.

S_{opt} = Grado de saturación bajo condiciones óptimas.

θ = Esfuerzo de Bulk.

τ_{oct} = Esfuerzo de corte octaédrico.

P_a = Presión atmosférica

k_1, k_2, k_3, a, b, k_s = Parámetros de regresión.

$$\beta = \ln(-b/a)$$

- Yang et al. (2005). Modelo se basa en la relación propuesta por Moossazadeh y Witczak (1981), donde el parámetro de Bishop representa el contenido de humedad del suelo. Proponiendo incorporar al modelo de módulo resiliente el parámetro de succión matricial mediante el uso de la teoría de esfuerzos efectivos para suelos no saturados.

$$M_r = k_1 (\sigma_d + x_m \Psi_m)^{k_2} \quad \text{Ec.11.}$$

Donde:

x_m = Parámetros de esfuerzos efectivos de Bishop.

Ψ_m = Succión matricial.

k_1 y k_2 = Parámetros de regresión.

- Liang et al. (2008). Propuso un modelo similar basado en la teoría de esfuerzos efectivos para suelos no saturados. Dicho modelo es una variación del modelo octaédrico. El modelo presenta la siguiente ecuación:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{(\Theta + x_m \Psi_m)}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right]^{k_3} \quad \text{Ec.12.}$$

Donde:

x_m = Parámetros de esfuerzos efectivos.

Ψ_m = Succión matricial.

SOFTWARE EVERSTRESS 5.0

El software Everstress 5.0 es realmente imprescindible ya que se puede variar los espesores, números de cargas, coordenadas XY del punto de carga evaluado, presión de contacto de carga aplicada, radio del área cargada, puntos de evaluación XYZ respecto al punto de carga a evaluar.

Los resultados son los siguientes:

Sxx, Syy, Szz, Syz, Sxy, Sxz: Tensiones normales en las direcciones X-Y-Z.

Exx, Eyy, Ezz, Ux, Uy, Uz: Deformaciones normales en las direcciones X-Y-Z y deflexiones.

S1, S2, S3, E1, E2, E3: Tensiones principales y deformaciones principales.

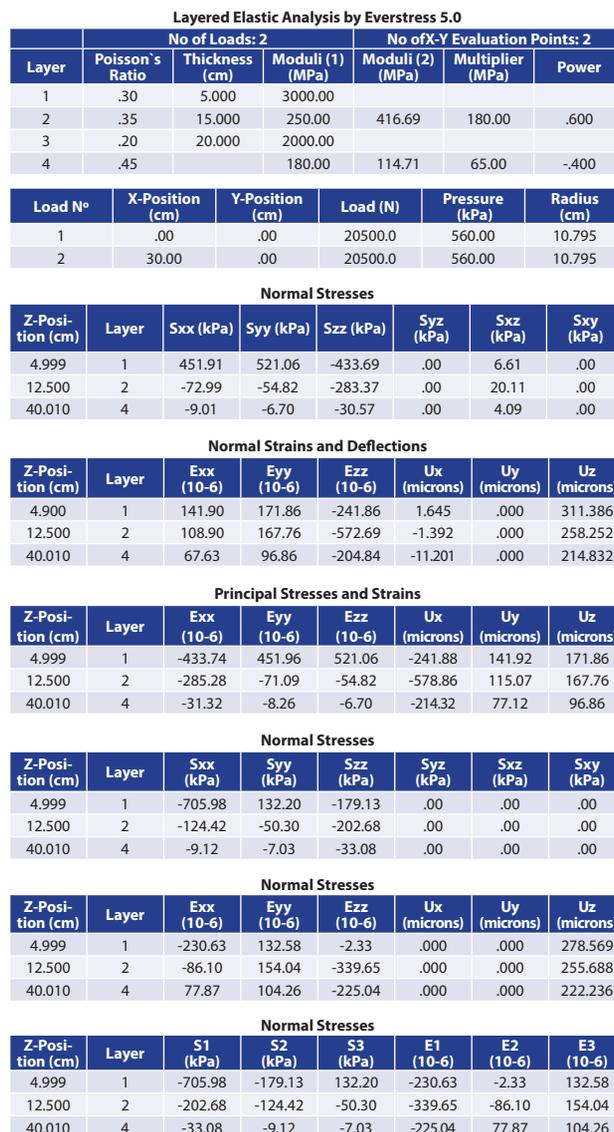


Figura 3. Resultados.

Fuente: Programa Everstress 5.0

MÉTODO DE DISEÑO MECÁNICO EMPÍRICO SUDAFRICANO (SAMDM)

SAMDM (South African Mechanistic-empirical Design Method). Este método analiza la estructura de un pavimento, considerando las respuestas estructurales que son tensiones de deformaciones y desplazamiento. Según los materiales que la constituyen a través de dos parámetros módulo de resiliencia, módulo de Young y coeficiente de Poisson's.

Las respuestas estructurales nos permiten obtener la evolución y acumulación del daño, atendiendo las exigencias de tránsito con valores de espesor admisibles.

Los modelos de daño se calibraron para cada uno de los principales grupos de materiales utilizados en la construcción de pavimentos.

Los modelos de daños actualmente previstos por la versión 1996 de SAMDM son:

Fatiga asfáltica en mezcla caliente

- Fatiga de capas superficiales delgadas (<50 mm de grosor): de forma continua y sin graduación
- Fatiga de capas de base gruesas (> 75 mm de espesor)

Base y sub base de capa granular

- Deformación permanente.

Base y sub base cementadas

- Falla de aplastamiento.
- Fatiga efectiva
- Deformación permanente.

Deformación permanente en la subrasante

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados módulo resiliente – Método Empírico

Los resultados de módulo resiliente a partir de ecuaciones empíricas se muestran en la siguiente tabla 1 y 2 para la muestra A-2-4 y A-2-6.

Tabla 1. Resultado de módulo resiliente a partir de ecuaciones empíricas – Muestra A-2-4.

Nro	Autor	Ecuación	CBR%	MR (MPa)
1	Heukelom y Foster	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR$	11.19	120.74
2	Heukelom y Klomp	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR$	11.19	115.70
3	Consilio sur Africano (CSRI)	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR^{0.65}$	11.19	233.42
4	Green y Hall	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR^{0.71}$	11.19	417.39
5	Powell	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR^{0.64}$	11.19	196.94

Tabla 2. Resultado de módulo resiliente a partir de ecuaciones empíricas – Muestra A-2-6.

Nro	Autor	Ecuación	CBR%	MR (MPa)
1	Heukelom y Foster	$Mr(MPa)=10.79 \cdot CBR$	14.23	153.54
2	Heukelom y Klomp	$Mr(MPa)=10.34 \cdot CBR$	14.23	147.14
3	Consilio sur Africano (CSRI)	$Mr(MPa)=20.68 \cdot CBR^{0.65}$	14.23	296.84
4	Green y Hall	$Mr(MPa)=37.29 \cdot CBR^{0.71}$	14.23	530.78
5	Powell	$Mr(MPa)=17.61 \cdot CBR^{0.64}$	14.23	250.45

Los valores de %CBR para ambos materiales son los correspondientes a 0.2" de penetración. Fall (1990), sugiere que la prueba de CBR es arbitraria y por lo tanto sus resultados son difíciles de vincular con el parámetro de rigidez del suelo. Angell (1988), señala que la relación de Heukelom y Klomp no es adecuada para estimar el módulo resiliente, indicando que "reduce" el modulo para un CBR menor del 5% y "mayora" el CBR mayor a 5%. Adama Dione et al. (2014), Admite que las correlaciones entre Mr – CBR deben ser usadas con cuidado por que tienden a "sobre dimensionar" y "bajo dimensionar" el módulo resiliente.

Resultados módulo resiliente – Método Experimental

El ensayo cuenta con 2000 ciclos de carga y descarga, de los cuales 500 ciclos son de acondicionamiento usando ($\sigma_3 = 41.4$ kPa - $sd = 24.8$ kPa) ayudando a la muestra a acondicionarse recuperando su historia de esfuerzos y evitar el efecto tixotrópico. Los restantes 1500 ciclos con valores de ($\sigma_3 = 41.4 ; 27.6 ; 13.8$ kPa - $sd = 12.4 ; 24.8 ; 37.3 ; 49.7 ; 62.0$ kPa), contando con 100 ciclos para cada esfuerzo desviador y presión de confinamiento.

Se realizó ensayos en 7 probetas para la muestra A-2-4 y muestra A-2-6 respectivamente, con un total de 14 probetas ensayadas a diferentes porcentajes de humedad, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Total de probetas ensayadas con su respectivo porcentaje de humedad.

Muestra 01 - tipo A-2-4				Muestra 02 - tipo A-2-6			
Nro	ID	W(%)	Densidad máxima seca (g/cm3)	Nro	ID	W(%)	Densidad máxima seca (gcm3)
1	w opt+2(1)	10.12	2.127	1	w opt+2(1)	10.53	2.072
2	w opt+1(1)	9.12	2.127	2	w opt+2(2)	10.53	2.072
3	w opt+1(2)	9.12	2.127	3	w opt+1(1)	9.53	2.072
4	w opt(1)	8.12	2.127	4	w opt(1)	8.53	2.072
5	w opt(2)	8.12	2.127	5	w opt-1(1)	7.53	2.072
6	w opt-1(1)	7.12	2.127	6	w opt-1(2)	7.53	2.072
7	w opt-1(2)	7.12	2.127	7	w opt-2(1)	6.53	2.072

El propósito de proyecto es cuantificar la variación de módulo resiliente producido al cambio de porcentaje de humedad. En las tablas 4 y 5 observamos el cambio de porcentaje de humedad producido antes y después del ensayo de módulo resiliente.

Tabla 4. Porcentaje de contenido de humedad antes y después del ensayo de Mr – muestra A-2-4.

ID	W(%)	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Antes del Ensayo		Después del Ensayo	
			W(%)	Densidad seca (g/cm ³)	W(%)	Densidad seca (g/cm ³)
w opt+2(1)	10.12	2.127	9.961	1.995	9.863	2.080
w opt+1(1)	9.12	2.127	9.806	2.097	9.578	2.163
w opt+1(2)	9.12	2.127	9.030	2.083	8.695	2.146
w opt(1)	8.12	2.127	8.849	2.161	8.462	2.206
w opt(2)	8.12	2.127	8.859	2.151	8.267	2.198
w opt-1(1)	7.12	2.127	7.518	1.900	7.545	1.960
w opt-1(2)	7.12	2.127	7.475	1.875	7.217	1.937

Los resultados de la tabla 4 obtenidos de la muestra A – 2 – 4, se aprecia el porcentaje de humedad óptimo +2 (wop +2), el cual no logro compilar al porcentaje de 10.12% de humedad, como también en las diferentes probetas podemos observar variaciones. Esto a causa del reposo de 24 hrs de homogenización de la muestra se pudo perder un porcentaje de humedad, como también en la extracción de muestra por el extractor Shelby el suelo llegó a sufrir un cambio en su estructura, por lo tanto, en su densidad. Por lo que podemos decir que el porcentaje de humedad al igual que la densidad son valores los cuales replicarlos es complicado.

Tabla 5. Porcentaje de contenido de humedad antes y después del ensayo de Mr – muestra A-2-6.

ID	W(%)	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Antes del Ensayo		Después del Ensayo	
			W(%)	Densidad seca (g/cm ³)	W(%)	Densidad seca (g/cm ³)
w opt+2(1)	10.53	2.072	10.880	2.073	10.376	2.093
w opt+2(2)	10.53	2.072	11.201	2.059	10.126	2.066
w opt+1(1)	9.53	2.072	9.823	1.990	9.292	2.099
w opt(1)	8.53	2.072	9.044	2.075	8.412	2.281
w opt-1(1)	7.53	2.072	7.933	2.109	7.260	2.118
w opt-1(2)	7.53	2.072	7.582	2.085	7.569	2.094
w opt-2(1)	6.53	2.072	6.965	2.044	6.213	2.043

En tabla 5. de la muestra A – 2 – 6, de igual forma se observa la variación de porcentaje de humedad y densidad antes y después del ensayo. Los resultados de módulo resiliente fueron obtenidos utilizando el modelo

de esfuerzo desviador “semi log” recomendado para determinar el comportamiento en suelos finos o fino granulares, por lo cual el módulo resiliente se muestra dependiente del cociente entre la tensión desviadora y la presión atmosférica. Aunque sean materiales del grupo A-2, los finos definen su comportamiento.

En las tablas 6 y 7. Se presenta los resultados de las constantes k1 y k2 de la ecuación de modelo de esfuerzo desviador “semi log”.

Tabla 6. Resultados de ecuación de módulo resiliente – muestra A-2-4.

W(%)	W(%)	K1	K2	r ²	Rango de módulo correspondiente para $\sigma_d=12-62kPa$
		(MPa)			
w opt+2(1)	10.12	56.713	-0.203	0.4969	55-97
w opt+1(1)	9.12	74.573	-0.215	0.5697	73-125
w opt+1(2)	9.12	80.739	-0.183	0.4885	78-129
w opt(1)	8.12	119.63	-0.169	0.5965	119-187
w opt(2)	8.12	115.91	-0.123	0.2570	108-167
w opt-1(1)	7.12	76.728	-0.185	0.5482	74-127
w opt-1(2)	7.12	80.814	-0.188	0.5525	79-134

Tabla 7. Resultados de ecuación de módulo resiliente – muestra A-2-6.

ID	W(%)	K1	K2	r ²	Rango de módulo correspondiente para $\sigma_d=12-62kPa$
		(MPa)			
w opt+2(1)	10.53	69.851	-0.227	0.5454	68 - 126
w opt+2(2)	10.53	68.989	-0.241	0.5418	67 - 127
w opt+1(1)	9.53	78.609	-0.195	0.4438	75 - 132
w opt(1)	8.53	102.34	-0.203	0.5529	100 - 184
w opt-1(1)	7.53	166.54	-0.12	0.4155	161 - 229
w opt-1(2)	7.53	148.12	-0.136	0.4701	142 - 206
w opt-2(1)	6.53	177.35	-0.068	0.2168	167 - 222

La constante k2 depende del estado de tensiones, valores elevados de k2 significa tensiones bajas y módulo bajo, por consiguiente, valores bajos de k2 significa tensiones altas módulo alto.

La constante k1 es el valor de módulo cuando. Los resultados de módulo resiliente en este caso se atribuyen a los resultados de k1. Se calculó el porcentaje

de variación de módulo en probetas ensayadas con el mismo porcentaje de humedad presentada en la tabla 8.

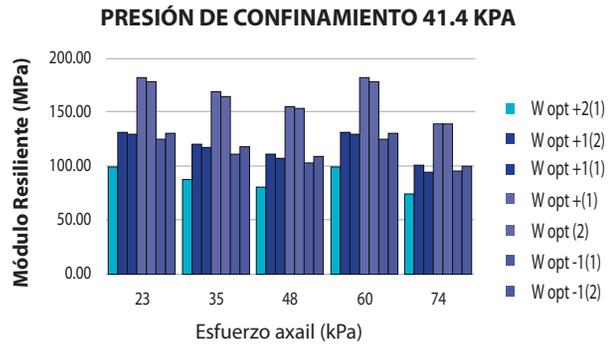
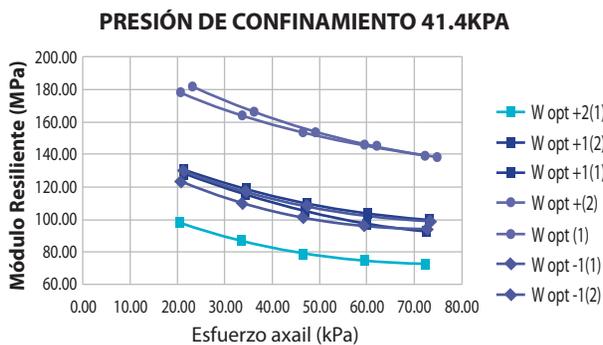
Tabla 8. Porcentaje de variación de módulo en probetas con el mismo porcentaje de humedad.

Muestra 01 - tipo A-2-4					Muestra 02 - tipo A-2-6				
Nro	ID	W(%)	KI	Variación de Mr	Nro	ID	W(%)	KI	Variación de Mr
1	w opt+2(1)	10.12	56.713	8%	1	w opt+2(1)	10.53	69.851	1%
2	w opt+1(1)	9.12	74.573		2	w opt+2(2)	10.53	68.989	
3	w opt+1(2)	9.12	80.739		3	w opt+1(1)	9.53	78.609	
4	w opt(1)	8.12	119.63	3%	4	w opt(1)	8.53	102.34	11%
5	w opt(2)	8.12	115.91		5	w opt-1(1)	7.53	166.54	
6	w opt-1(1)	7.12	76.728	5%	6	w opt-1(2)	7.53	148.12	11%
7	w opt-1(2)	7.12	80.814		7	w opt-2(1)	6.53	177.35	

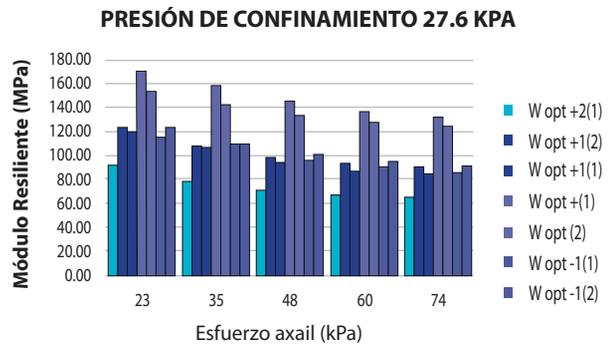
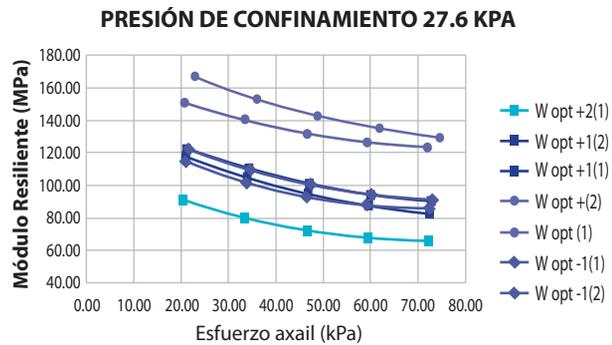
En resultados de la muestra A-2-4, apreciamos el mayor porcentaje de variación de 8 % en probetas con humedad óptima +1 (w opt + 1), concluyendo que a este porcentaje de variación debido al extractor de muestras Shelby, ya que al extraer la muestra de la probeta esta sufre un ligera presión ocasionando un empuje para que la muestra salga de la probeta y esto pudo provocar un leve cambio en la estructura de la muestra ensayada.

En resultados de la muestra A-2-6, apreciamos el mayor porcentaje de variación de 11 % en probetas con humedad óptima -1 (w opt -1), concluyendo que a este porcentaje de variación debido al extractor de muestras Shelby.

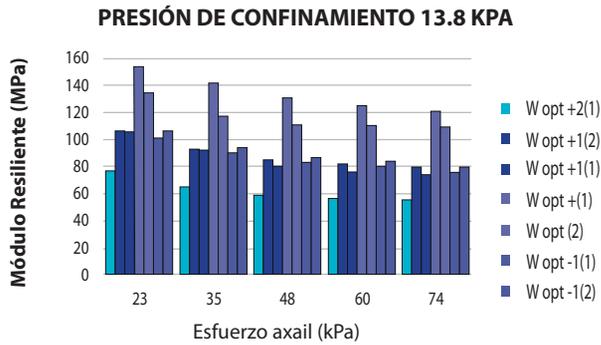
En las siguientes gráficas apreciaremos el comportamiento de la evolución de módulo resiliente con las diferentes presiones de confinamiento.



Gráfica 1. Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 41.4 kPa – Muestra A-2-4.



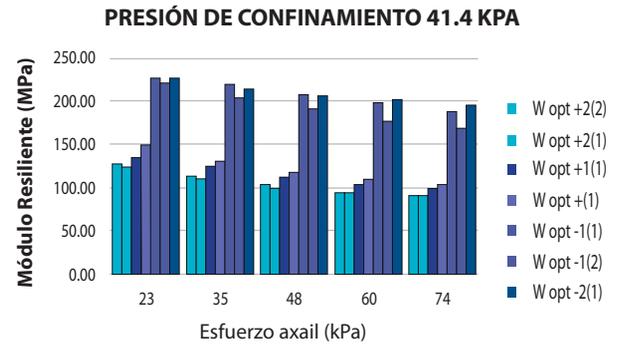
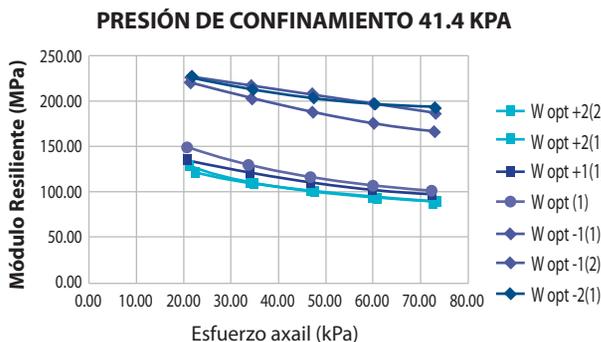
Gráfica 2. Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 27.6 kPa – Muestra A-2-4.



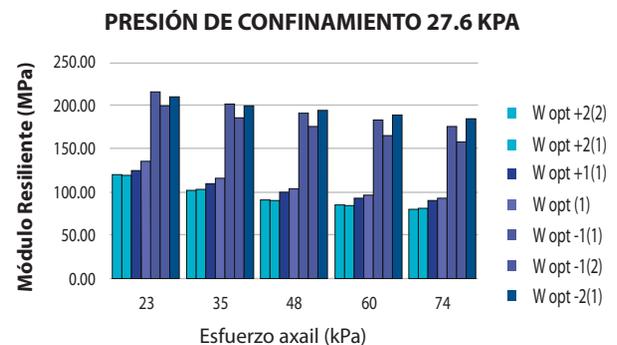
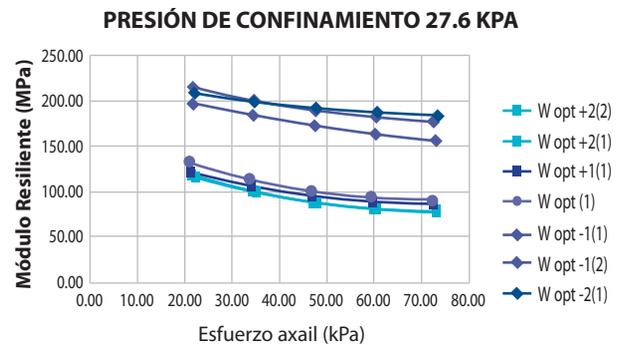
Gráfica 3. Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 13.8 kPa – Muestra A-2-4.

Las gráficas 1, 2 y 3 presentan los resultados de la muestra A-2-4. En la cual se observa un comportamiento de módulo resiliente respecto a la presión de confinamiento y esfuerzo axial, si bien el esfuerzo axial es menor al inicio del ensayo presenta mayor módulo resiliente, conforme se va incrementando gradualmente la carga se verifica que el módulo resiliente en esta muestra de suelo en una presión de confinamiento de 41.4MPa presenta una diferencia desde el inicio hasta el final del ensayo aproximadamente de 40MPa, conforme disminuimos la presión de confinamiento también se reduce la diferencia del módulo resiliente al inicio y final del ensayo pero sin mucha diferencia de respuesta de módulo resiliente, se atribuye este comportamiento a los espacios vacíos y contenido de humedad papel que juega la succión en los poros de contacto entre las partículas de suelo, haciendo que estos recuperen la deformación resiliente de una mejor manera, porque tienen ese espacio que permite su recuperación a una carga axial.

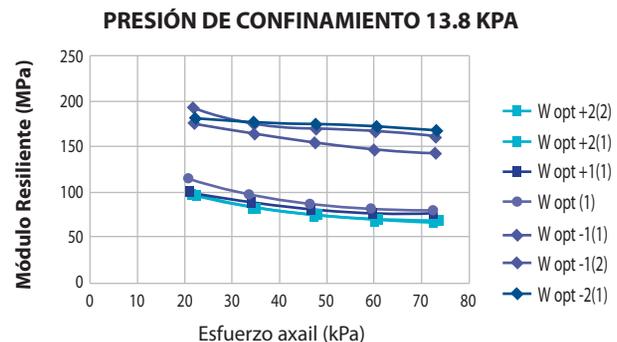
Los resultados del ensayo también indican que según la variación de contenido de humedad esta muestra tiene mejor respuesta con el contenido de humedad óptimo.

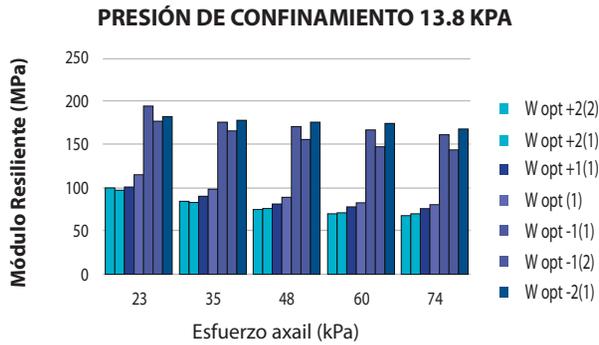


Gráfica 4. Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 41.4 kPa – Muestra A-2-6.



Gráfica 5. Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 27.6 ka – Muestra A-2-6.

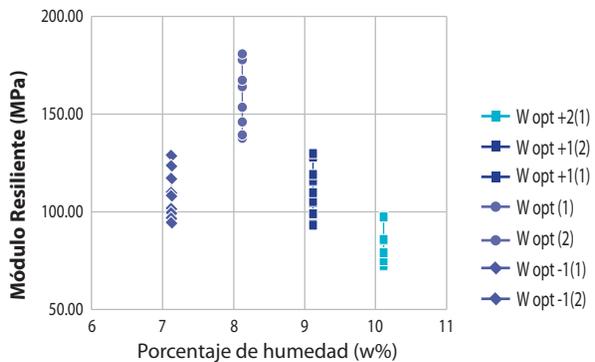




Gráfica 6. Evolución de Mr con la presión de confinamiento de 13.8 kPa – Muestra A-2-6.

Las gráficas 4, 5 y 6. Presenta los resultados de la muestra A-2-6, el punto de vista del comportamiento de la muestra A-2-4 tiene semejanza al comportamiento de la muestra A-2-6 ya que se percibe a menor presión de confinamiento mejor capacidad de recuperación de deformación resiliente respecto a las cargas axiales inducidas. Sin embargo se percibe mayores valores de módulo resiliente respecto al porcentaje de humedad al lado seco porcentaje de humedad óptimo -1 y -2, no así con el porcentaje de humedad óptimo.

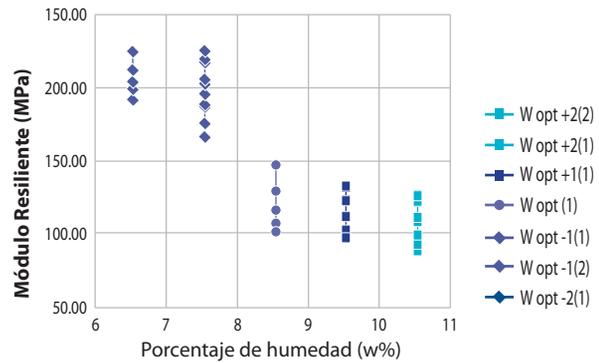
El comportamiento de módulo resiliente con respecto al contenido de humedad se refleja en las siguientes gráficas 7. y 8.



Gráfica 7. Comportamiento de Mr con respecto al contenido de humedad – Muestra A-2-4.

Se observa el comportamiento de la humedad óptima +1 (wop+1) que presenta la misma disposición de la humedad óptima -1 (w op - 1). Debido al comportamiento del suelo, como podemos observar en la curva de compactación el comportamiento es simétrico antes y después de la humedad óptima.

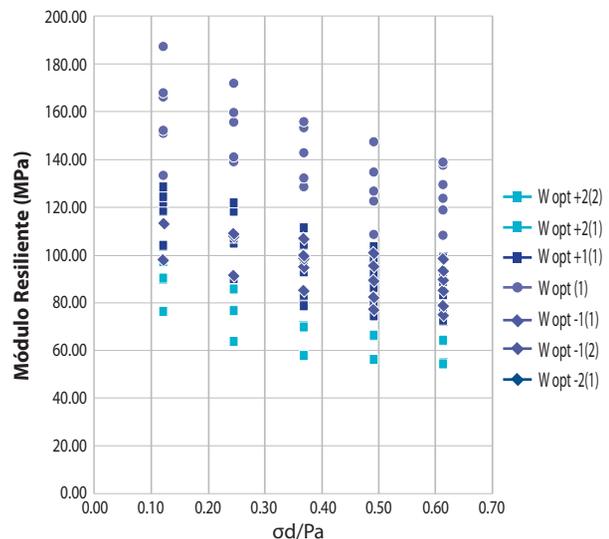
Se observa el valor máximo de módulo resiliente a la condición de humedad óptima (w op), por consiguiente al menor valor de módulo resiliente a la condición de mayor porcentaje de humedad +2 (w op + 2).



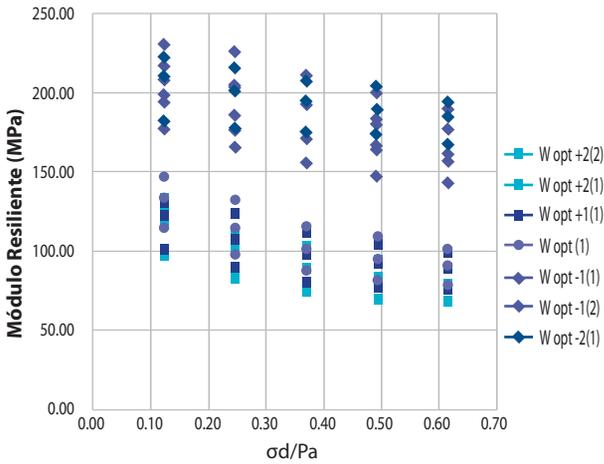
Gráfica 8. Comportamiento de Mr con respecto al contenido de humedad – Muestra A-2-6.

Se observa que los valores elevados de módulo resiliente se presentan por la humedad óptima -1 y -2 (w op -1 y w op -2) que sería el lado seco, comportamiento debido a mayor concentración de arcillas en el material estudiado ya que presentan en el lado seco un mejor comportamiento que no altera su volumen teniendo más espacios vacíos en el que la succión realiza un buen desempeño, sin embargo el lado húmedo hace que las partículas de arcilla llenen los espacios vacíos generando poca capacidad de deformación resiliente que da lugar a menores valores de módulo resiliente, dados por la humedad óptima +1 y +2 (w op +1 y wop+2).

En las gráficas 9 y 10 se presenta la incidencia de esfuerzo desviador al módulo resiliente.



Gráfica 9. Módulo resiliente vs. Esfuerzo desviador – Muestra A-2-4.



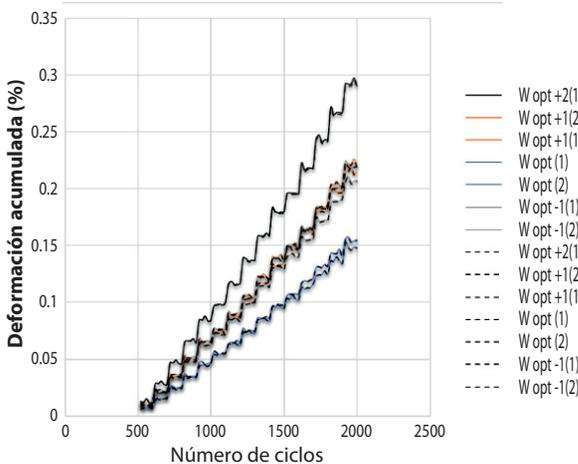
Gráfica 10. Módulo resiliente vs. Esfuerzo desviador – Muestra A-2-6.

Los dos tipos de suelos estudiados A – 2 – 4 y A – 2 – 6, presentan comportamiento de suelos fino granulares, como se observa en la gráfica 9 y 10 al aumento de esfuerzo desviador los valores de módulo resiliente decrecen. Argumento mencionado anteriormente por autores como Julián Vidal (2006), Rondó Quintana (2012).

En materiales grueso granulares el módulo resiliente aumenta conforme aumenta el esfuerzo desviador, Garnica Anguas (2002).

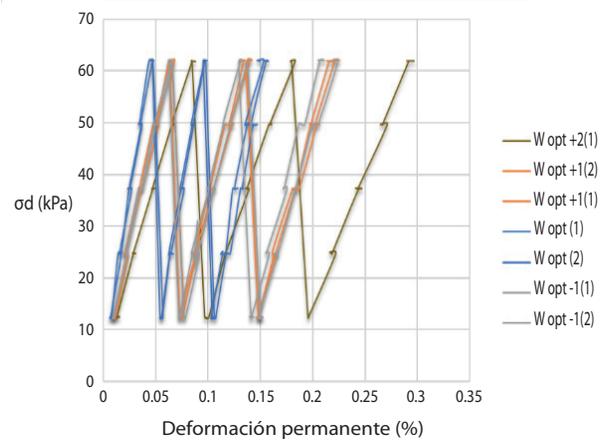
La deformación permanente presentada en los ensayos tuvo una evaluación hasta los 2000 ciclos de carga y descarga de los cuales 500 ciclos fueron de acondicionamiento.

En las gráficas 11, 12 y 13 presentan resultados respecto a la deformación permanente obtenidos en la muestra A – 2 – 4. Por otro lado las gráficas 14, 15 y 16 presentan resultados respecto a la deformación permanente obtenidos en la muestra A-2-6.



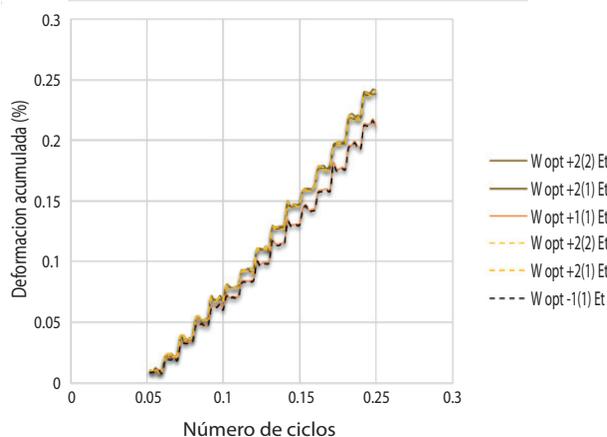
Gráfica 11. Evolución de la deformación acumulada en 2000 ciclos-Muestra A-2-4.

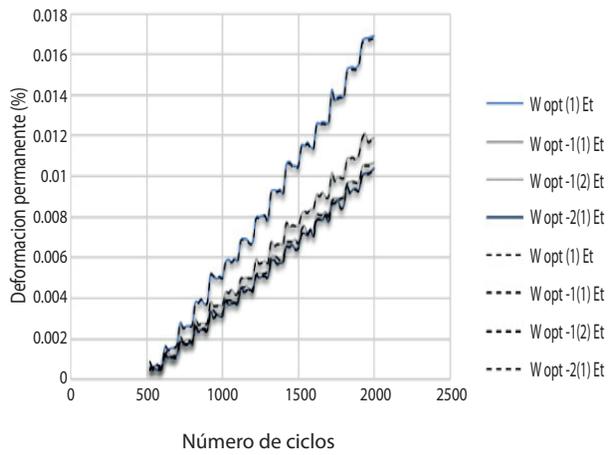
En los resultados de la muestra A – 2 – 4 de la gráfica 11, existe una diferencia mínima entre la deformación total (Et) y la deformación permanente (Ep) en todas las probetas ensayadas, esto debido a la cantidad de ciclos realizados. Las probetas con mayor porcentaje de deformación es la de humedad óptima +2 (w op + 2) con 0.28% de deformación, las probetas con humedad óptima +1 y -1 (w op +1 – w op -1) presentan deformaciones menores a la probeta con humedad óptima +2, presentando una deformación semejante aproximada de 0.2 %. En las 7 probetas estudiadas en la muestra A-2-4, se distingue el valor menor de deformación a las probetas ensayadas con humedad óptima (w op), con una deformación de 0.15%, la diferencia de deformación entre el valor mayor y menor de deformación es de 0.13%.



Gráfica 12. Evolución de la deformación total con respecto al esfuerzo desviador – Muestra A-2-4.

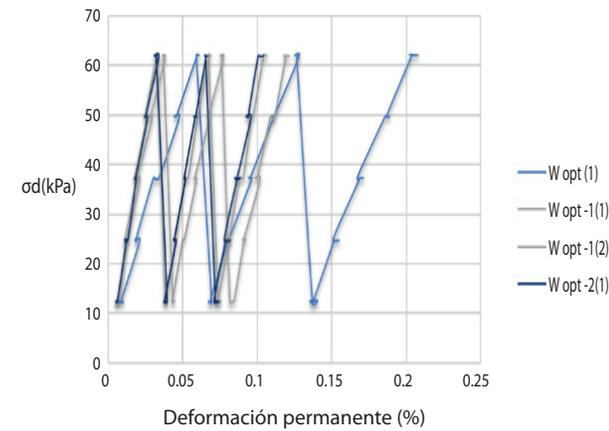
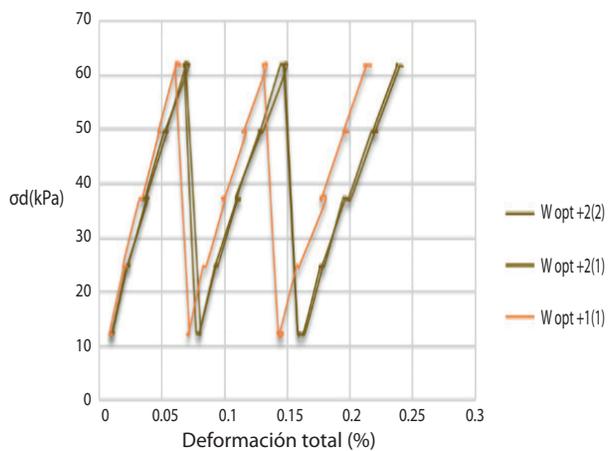
Se puede notar que la deformación en cada ciclo es acumulativo, según teorías esta acumulación va disminuyendo hasta que prácticamente desaparece llegando así a un estado de deformación recuperable, en ese momento se obtiene un comportamiento resiliente.





Gráfica 13. Evolución de la deformación acumulada en 2000 ciclos–Muestra A-2-6.

Los resultados de la muestra A-2-6 de la gráfica 13, al igual que la muestra A-2-4 existe una diferencia mínima entre la deformación total (Et) y la deformación permanente (Ep). El resultado de mayor deformación obtenida fue de las probetas con humedad óptima +2 (w op +2) con una deformación en 2000 ciclos de 0.24%, seguido de la probeta con humedad óptima +1 (w op +1) con 0.22% de deformación, grafica 13 (A). Por otro lado las probetas con humedad óptima (w op) obtuvieron una deformación de 0.02%, percibiendo la menor deformación las probetas con humedad óptima -2 (w op -2) con 0.01% de deformación, grafica 13 (B), la diferencia entre el valor de deformación mayor y menor es de 0.23%. Este comportamiento es atribuido gracias a la estructura del material fino granular, justificando que este tipo de suelo presenta mayor concentración de arcillas logrando más resistencia a una menor proporción de humedad.



Gráfica 14. Evolución de la deformación total con respecto al esfuerzo desviador – Muestra A-2-6.

En la gráfica 14 se aprecia la diferencia de deformación después de un ciclo en cada una de las probetas, con mayor humedad mayor deformación y a menor humedad menor deformación.

El módulo resiliente para propósito de diseño en los dos tipos de suelo A-2-4 (muestra 1) – A-2-6 (muestra 2), se calculó utilizando los porcentajes de humedad bajo, medio y alto en las dos muestras respectivas, por consiguiente estos porcentajes de humedad generaron valores de Mr menor, intermedio y mayor. Como se muestra en tabla 9.

Tabla 9. Valores de porcentaje de humedad y módulo resiliente, para el diseño de estructura de pavimento.

Muestra 1: Arena mal graduada con arcilla SP SC

ID	W(%)		Rango de módulo correspondiente para sd=12-62 kPa			
			k1 (MPa)	k2	r2	
w opt+2(1)	10.12	alto	70.366	0.1358	0.0819	55-97=Donde valor de Mr. menor
w opt-1(2)	7.12	bajo	98.873	0.099	0.0584	79-134=Donde valor de Mr. intermedio
w opt(1)	8.12	medio	143.87	0.0667	0.0346	119-187=Donde valor de Mr. mayor

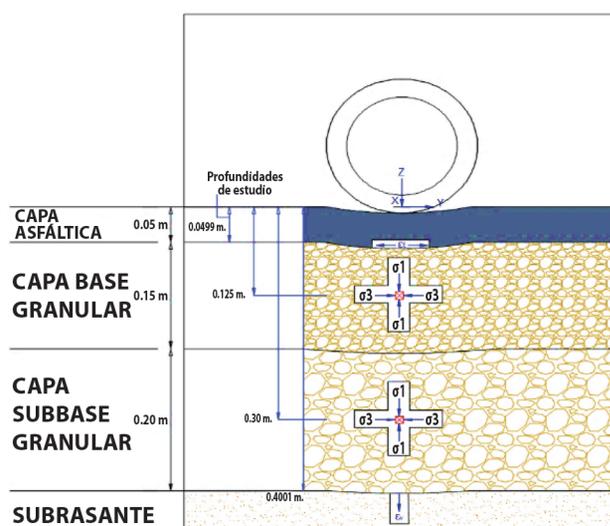
Muestra 2: Arena arcillosa SC

ID	W(%)		Rango de módulo correspondiente para sd=12-62 kPa			
			k1 (MPa)	k2	r2	
w opt+2(2)	10.53	alto	68.989	-0.241	0.5418	57-127=Donde valor de Mr. menor
w opt(1)	8.53	medio	102.34	-0.203	0.5529	100-184=Donde valor de Mr. intermedio
w opt-2(1)	6.53	bajo	177.35	-0.068	0.2168	167-222=Donde valor de Mr. mayor

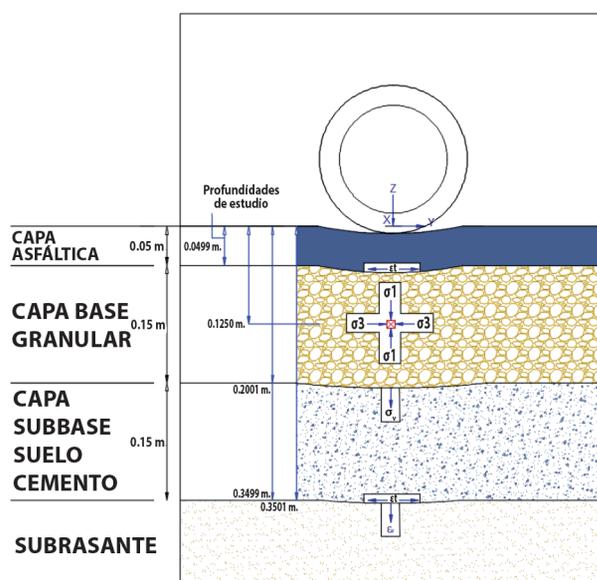
Análisis para estructura de pavimento

Para la implementación de módulo resiliente de la subrasante al diseño de una estructura de pavimento, se consideró dos opciones de diseño para ambos tipos de suelos A-2-4 y A-2-6.

1 er opción: Análisis de estructura de pavimento tradicional, con espesores normalmente utilizados.



2^{da} opción: Análisis de estructura de pavimento con subbase de suelo cemento.



- Se consideró el análisis de fatiga en capas de revestimiento. Asumiendo que las grietas comienzan en la fibra inferior de la capa y se propaga hasta la superficie.
- Se asume que las capas granulares acumulan deformación permanente a partir del corte. Las capas granulares se analizan determinando el estado de esfuerzo cortante en el centro de la capa.
- Las capas estabilizadas se analizan como capas rígidas, por lo tanto se evalúa la fatiga efectiva en la parte inferior de la capa considerando la deformación de tracción horizontal. Las grietas se propagan a la parte superior donde tiene incidencia de aplastamiento empleando la tensión de compresión vertical.

- En la subrasante se analizó la deformación permanente respecto a la deformación de compresión vertical en la fibra inferior de la capa.

Resultados de diseño estructural de pavimento

Resultados de diseño muestra A – 2 – 4 a diferentes porcentajes de humedad.

Estructura de pavimento tradicional con valor menor de Mr (wop+2(1)) - muestra 01		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
Fatiga en capa asfáltica	Nf= 78925.93(ESALs)	650049,99(ESALs)	12%
Ruptura por corte en capa base	Nf= 99676.40(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
Ruptura por corte en capa subbase	Nf= 567118.04(ESALs)	650049,99(ESALs)	87%
Deformación permanente en la subrasante	Nf= 42589.26(ESALs)	650049,99(ESALs)	7%

Estructura de pavimento con subsuelo con valor menor de Mr (wop+2(1)) - muestra 01		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
Fatiga en capa asfáltica	Nf= 2834877.01(ESALs)	650049,99(ESALs)	436%
Ruptura por corte en capa base	Nf= 47120527.11(ESALs)	650049,99(ESALs)	7249%
Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 9967687.18(ESALs)	650049,99(ESALs)	1533%
Fatiga efectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 799265.06(ESALs)	650049,99(ESALs)	123%
Deformación permanente en la subrasante	Nf= 48568973.10(ESALs)	650049,99(ESALs)	7472%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor menor de Mr (wop+2(1)) - muestra 01	Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica Nf= 10790.44(ESALs)	650049,99(ESALs)	2%
2	Ruptura por corte en capa base Nf= 99491.32(ESALs)	650049,99(ESALs)	5%
3	Ruptura por corte en capa subbase Nf= 518913.31(ESALs)	650049,99(ESALs)	80%
4	Deformación permanente en la subrasante Nf= 453686.07(ESALs)	650049,99(ESALs)	70%

Nº	Estructura de pavimento con subbase suelo cemento con valor intermedio de Mr (wop-1(2)) - muestra 01	Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica Nf= 2460384.17(ESALs)	650049,99(ESALs)	378%
2	Ruptura por corte en capa base Nf= 38310717.23(ESALs)	650049,99(ESALs)	5894%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase Nf= 9728379.61(ESALs)	650049,99(ESALs)	1497%
	Fatiga efectiva en la fibra inferior de la capa subbase Nf= 991965.44(ESALs)	650049,99(ESALs)	153%
4	Deformación permanente en la subrasante Nf= 150663186.33(ESALs)	650049,99(ESALs)	23177%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor mayor de Mr (wop(1)) - muestra 01	Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica Nf= 142511.37(ESALs)	650049,99(ESALs)	22%
2	Ruptura por corte en capa base Nf= 98927.30(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
3	Ruptura por corte en capa subbase Nf= 469959.20(ESALs)	650049,99(ESALs)	72%
4	Deformación permanente en la subrasante Nf= 6849034.36(ESALs)	650049,99(ESALs)	1054%

Nº	Estructura de pavimento con subbase suelo cemento con valor intermedio de Mr (wop-1(2)) - muestra 01		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 2137238(ESALs)	650049,99(ESALs)	329%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 30646545.62(ESALs)	650049,99(ESALs)	4714%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 9437308.36(ESALs)	650049,99(ESALs)	1452%
	Fatiga efectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 1276041(ESALs)	650049,99(ESALs)	196%
4	Deformación permanente en la subrasante	Nf= 617539589.32(ESALs)	650049,99(ESALs)	94999%

Se considera la mejor opción de diseño de estructura de pavimento, considerando la humedad óptima de diseño (wop).

Resultados de diseño muestra A – 2 – 6 a diferentes porcentajes de humedad.

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor menor de Mr (wop+2(2)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 97001(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 99589.96(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
3	Ruptura por corte en capa subbase	Nf= 536312.41(ESALs)	650049,99(ESALs)	83%
4	Deformación permanente en la subrasante	Nf= 191892.25(ESALs)	650049,99(ESALs)	30%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor menor de Mr (wop+2(2)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 2559224.08(ESALs)	650049,99(ESALs)	394%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 4065365.00(ESALs)	650049,99(ESALs)	5254%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 97999.72(ESALs)	650049,99(ESALs)	1508%
	Fatiga afectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 931016.22(ESALs)	650049,99(ESALs)	143%
4	Deformación permanente en la subrasante	107320996.50(ESALs)	650049,99(ESALs)	16510%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor intermedio de Mr (wop(1)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 129599.73(ESALs)	650049,99(ESALs)	20%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 99196.38(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
3	Ruptura por corte en capa subbase	Nf= 487655.65(ESALs)	650049,99(ESALs)	75%
4	Deformación permanente en la subrasante	Nf= 2545713.42(ESALs)	650049,99(ESALs)	392%

Nº	Estructura de pavimento con subbase suelo cemento con valor intermedio de Mr (wop(1)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 2234561.00(ESALs)	650049,99(ESALs)	344%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 32965480.73(ESALs)	650049,99(ESALs)	5071%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 9536014.64(ESALs)	650049,99(ESALs)	1467%
	Fatiga afectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 1172782.52(ESALs)	650049,99(ESALs)	180%
4	Deformación permanente en la subrasante	380174538.03(ESALs)	650049,99(ESALs)	58484%

Nº	Estructura de pavimento tradicional con valor mayor de Mr (wop-2(1)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 170396.40(ESALs)	650049,99(ESALs)	26%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 98151.44(ESALs)	650049,99(ESALs)	15%
3	Ruptura por corte en capa subbase	Nf= 432580.75(ESALs)	650049,99(ESALs)	67%
4	Deformación permanente en la subrasante	Nf= 90362454.49(ESALs)	650049,99(ESALs)	13901%

Nº	Estructura de pavimento con subbase suelo cemento con valor intermedio de Mr (wop(1)) - muestra 02		Número de ejes equivalentes de diseño	% de vida ÚTIL
1	Fatiga en capa asfáltica	Nf= 1923262.12(ESALs)	650049,99(ESALs)	296%
2	Ruptura por corte en capa base	Nf= 25524341.40(ESALs)	650049,99(ESALs)	3927%
3	Aplastamiento en el tope de la capa subbase	Nf= 9176067.12(ESALs)	650049,99(ESALs)	1412%
	Fatiga afectiva en la fibra inferior de la capa subbase	Nf= 1589980.30(ESALs)	650049,99(ESALs)	245%
4	Deformación permanente en la subrasante	2362508542.63(ESALs)	650049,99(ESALs)	363435%

Se considera la mejor opción de diseño de estructura de pavimento, considerando la humedad óptima de diseño -2 (wop-2).

Como también se observa que para un pavimento que presenta espesores prácticamente estándar se tiene % de vida útil relativamente aceptable, pero con la incorporación de una capa de suelo cemento este % de vida útil tiene una considerable mejora, considerando que el espesor de suelo cemento es 15 cm y el espesor de capa sub base estándar de 20 cm se considera aceptable el uso ya que al reducir el volumen de movimiento de tierras se gana tanto tiempo y dinero, como también se obtiene mayor vida útil al esperado.

CONCLUSIONES

- En las metodologías de obtención de módulo resiliente, queda verificado que el método empírico no es una opción segura ya que no representa ningún parámetro de esfuerzo – deformación ni ningún otro necesario para el diseño de una estructura de pavimento. Por otro lado el método experimental que corresponde al ensayo triaxial dinámico de carga repetida, se encuentra bajo la norma AASHTO T 307 – 99 “Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials”, determina todos los parámetros de esfuerzos y deformaciones requeridos para cualquier diseño de estructura de pavimento.
- Se puede apreciar que con la ayuda del Everstress y el análisis de diseño se puede realizar varios modelos de pavimentos, pudiendo de esta manera llegar al modelo óptimo para afrontar la vida de servicio requerido.

- Los resultados obtenidos del análisis de la estructura de pavimento tradicional en ambas muestras A-2-4 y A-2-6, presenta poco porcentaje de vida útil en capa asfáltica, base y sub base, en la subrasante mejora la vida útil, no es suficiente solo tomar en cuenta la subrasante todas las capas cumplen una función en la estructura de pavimento y se debe lograr el porcentaje de vida adecuado respecto al número de ejes equivalentes de diseño necesario para que la estructura se mantenga sin problemas.
- El análisis de la estructura de pavimento de subbase mejorada con cemento, tanto en la muestra A-2-4 como la muestra A-2-6 aumenta significativamente, el porcentaje de vida útil en la capa asfáltica, capa base y subbase presentando resultados de vida útil por encima del número de ejes equivalentes de diseño. Los resultados de vida útil de la subrasante con módulos resilientes obtenidos de contenido de humedad baja, media y alta, presentan resultados de vida útil sobrepasando el número de ejes equivalente de diseño.
- El punto más importante e influyente en esta investigación es el papel que juega el contenido de humedad en dos diferentes muestras, las cuales si bien parecen semejantes, presentan comportamiento muy diferentes al contenido de humedad adicionado, de este modo se pudo verificar que la curva de densidad seca máxima y porcentaje de humedad óptimo no siempre es el correcto durante la ejecución de una obra, en algunos casos con esta muestra A-2-6 se podría realizar la compactación al lado seco a diferencia de la muestra A-2-4 que si presenta buen comportamiento a una densidad seca máxima y porcentaje de humedad óptimo.

De acuerdo a lo expuesto en el presente estudio se recomienda:

- Incluir el ensayo de módulo resiliente en todos los estudios geotécnicos realizados para diseños de pavimentos en Bolivia.
- Implementar el equipo triaxial cíclico en los laboratorios de geotecnia de Universidades, instituciones encargadas de ejecución y supervisión de obras viales, Empresas constructoras, etc.
- El costo-beneficio de realizar ensayos de módulo resiliente en suelos de subrasante y capas de base y subbase son necesarios ya que se obtiene de manera eficiente los resultados y valores para el análisis de diseño, sin recurrir de manera constante al empirismo.
- Complementar el estudio con ensayos de módulo resiliente en bancos de préstamo para tener un dato real de material de cantera utilizable en base y sub base.
- Regularizar el uso del ensayo de capacidad de soporte CBR ya que no se puede seguir usando este dato como método para obtención de módulo resiliente.

BIBLIOGRAFÍA

- Zapata C.E., Andrei D., Witczak M.W. y Houston W.N. (2007). "Incorporation of environmental effects in pavement design", International Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 8, No. 4, pp. 667-693.
- Monismith, Carl, 2004. Evolution of Long-Lasting Pavement Design Methodology: A Perspective. Distinguished Lecture, Proceedings, International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, Auburn University, June 7-9, 2004.
- Garnica Anguas, P. (2004). Módulos de resiliencia de agregados provenientes de rocas altamente intemperizadas, (256), 106.
- Heukelom W. and Foster (1960) "Dynamic Testing of Pavement" ASCE, Journal of the Structural Division, N°.SM 1, 86.
- Adama D. et al., (2014). – " Implementation of Resilient Modulus – CBR relationship in Mechanistic – Empirical (M-E) Pavement Desing", CAMES – Sciences Appliquees et de l'Ingéniur, V1(2), pp.6571.
- Green, J.L. and Hall, J.W. (1975), "Non- destructive vibratory testing of airport pavement :Experimental tests results and development of evaluation methodology and procedure", FAA-RD-73-205, Federal Aviation Administration, Washington D.C.
- AASHTO, (2017). "Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials" WSDOT Materials Manual M 46-01.27.
- COOPER TECHNOLOGY (2010) "Servo – Pneumatic Universal Testing Machine User Manual", CRT-UTM-NU.
- AASHTO, (1992). "Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Sub-base Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46". AASHTO Designation: T294-92 I, Interim Specification 1992.