

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE TENIENDO COMO BASE LA  
PROPAGACIÓN DE ONDAS DE COMPRESIÓN (P) Y EL PRINCIPIO DE  
PIEZOELECTRICIDAD.**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**Presentado ante la**

**UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO**

**Como parte de los requisitos para optar el título de**

**INGENIERO CIVIL**

**Realizado Por**

**Tahiry Luques Silveira**

**Profesor Guía**

**Ing. Roberto Centeno Werner**

**Fecha**

**Junio 2015**



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

La resiliencia es aceptar tu nueva realidad, incluso si es menos buena de la que tenías antes.-

Elizabeth Edward

---



## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, Ángel Luques y Susana Silveira con todo mi corazón les doy las gracias por cada logro de mi vida, en especial por todos los días de mi carrera en los cuales me apoyaron y me motivaron a jamás rendirme y seguir siempre adelante. Tengo presente sus continuos sacrificios y enseñanzas que me facilitaron el camino.

Con gran admiración, cariño y respeto le doy las gracias a mi tutor Roberto Centeno Werner por toda su dedicación que obtuve de su parte, por su gran paciencia al buscar darme siempre la mejor explicación y por ser mi excelente guía en este arduo trabajo, sobre todo de enseñarme que siempre debo ir más allá del porqué, de enamorarme de mi trabajo y de este gran tema de investigación.

A todo el equipo de Centeno-Rodríguez y Asociados por apoyarme durante esta investigación en horas de trabajo, en especial a Ramiro Melean y al Ingeniero Alejandro Lemmo, que me brindaron su apoyo, su conocimiento y su gran ayuda día a día durante este gran trabajo, por fortalecer mis ganas de seguir investigando y de saber un porque. Por estar allí en momentos de angustia y darme todos los ánimos del mundo.

A toda mi Familia y Hermano, por comprender y apoyarme a seguir adelante, sobre todo a mi abuela Elia Simonovis que fue uno de mis grandes apoyos durante toda mi carrera, la que siempre estuvo presente en todos los sentidos, por ayudarme, por atenderme, y pensar siempre en mí.

Finalmente a todas las personas que me ayudaron a esta gran investigación, todos aquellos que aportaron su conocimiento y me brindaron un apoyo. Ing. Valentina Martin por dedicarme sus horas valiosas de su tiempo para enseñarme PLAXIS 2D, al Prof. de física Iván Escalona por sus valiosas horas de consulta, Ing electrónico Juan Andrés García por brindarme sus conocimientos para el uso de los osciloscopio, Prof. de física Demian Pereira por brindarme su conocimiento en Ultrasonido y enseñarme inspección visual de las ondas receptoras.

A todos los Ingenieros Geólogos, Geofísicos, Ingenieros Electricistas y Físicos que estuvieron allí con las manos abiertas para cualquier consulta y que aportaron todo su conocimiento para este excelente trabajo de investigación.

---



## **DEDICATORIA**

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y por estar conmigo en cada paso que doy, por darme fuerzas para levantarme firme y por haber puesto en mi camino todas aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo mi periodo de estudio.

Dedico este gran trabajo a mi tutor y amigo Roberto Centeno Werner, por ser mi gran maestro por mostrarme lo hermoso de mi carrera y hacerme enamorar cada día más de ella, sin usted este trabajo de investigación no hubiera sido posible, le doy gracias por su valioso tiempo que con todo amor y cariño me ofreció, y aun mas no tengo como agradecerle por ser mi gran maestro día a día y por enseñarme a ver de una manera distinta la Ingeniería Civil. Usted ha sido mi gran aspiración para este trabajo de grado.

A mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica como de la vida, por creer en mí. Mamá y Papá les doy gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto se lo debo a ustedes.

A Jesús Alfredo Mirabetty, por estar día a día a mi lado desde el primer semestre de nuestra carrera, por ser mi mejor amigo, confidente, compañero de vida. Gracias por toda tu colaboración, por ser tan paciente y dedicado, contigo aprendí a luchar día a día por lo que se quiere sin descansar.



## INDICE GENERAL

<b>Agradecimiento</b> .....	I
<b>Dedicatoria</b> .....	II
<b>SINOPSIS</b> .....	XIII
<b>ABSTRAC</b> .....	XIV
<b>INDICE DE CONTENIDO</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA</b> .....	3
<b>1.1.- Antecedentes y limitaciones</b> .....	4
<b>1.2.- Metodología</b> .....	5
<b>1.3.- Objetivos de la investigación</b> .....	8
1.3.1.- Objetivo General.....	8
1.3.2.- Objetivos Específicos.....	8
<b>CAPITULO II</b>	
<b>MARCO TEORICO</b> .....	9
<b>2.1.- Módulo resiliente</b> .....	9
2.1.1.- Factores que afectan el módulo resiliente.....	10
2.1.1.1.- Esfuerzo desviador.....	10
2.1.1.2.- Contenido de humedad.....	11
2.1.1.3.- Incidencia del método de compactación.....	12
2.1.1.4.- Aspectos teóricos relacionados con los suelos no saturados.....	14
2.1.2.- Diferencia entre tensión negativa y succión.....	17
2.1.3.- Método mecanicista.....	18

---



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

2.1.4.- Tipos de materiales.....	21
2.1.4.1- Suelos finos y granulares. ....	21
<b>2.2.- Ensayos de laboratorio y campo para determinar el módulo resiliente.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.- Principios de piezoelectricidad.....</b>	<b>24</b>
2.3.1.- ¿Que es un piezocristal (PZT)? .....	24
2.3.2.- Aplicaciones de los PZT.....	24
2.3.3.-Funciones de un PZT.....	24
2.3.4- Algunas constantes piezoeléctricas importantes.....	25
2.3.4.1.-Impedancia acústica (Z).....	25
2.3.4.2.-Constante de carga piezoeléctrica (d) .....	26
2.3.4.3.- Coeficiente de acoplamiento.....	26
2.3.4.4.-Temperatura de Curie $T_c$ .....	26
2.3.4.5.- Constantes de frecuencia (N).....	26
<b>2.4.- Instrumentos de medición.....</b>	<b>26</b>
2.4.1.- Osciloscopio.....	26
2.4.1.1.- Tipos de osciloscopio: Analógicos y digitales.....	26
2.4.1.2.- Términos utilizados al medir.....	27
2.4.1.3.- Medidas en la forma de onda.....	27
2.4.2.- ¿Qué parámetros influyen en la calidad de un osciloscopio?.....	28
2.4.3.- Conexión del osciloscopio importante.....	29
<b>2.5.- Influencia de White noise o ruido de sonido.....</b>	<b>29</b>
2.5.1 Concepto de ruido.....	29
<b>2.6.- Tipos de ondas.....</b>	<b>31</b>

---



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

2.6.1.- ondas primarias (P).....	31
2.6.2. Ondas secundarias (S).....	32
<b>2.7.- Leyes que gobiernan la transmisión de ondas.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.- Relación entre las ondas sísmicas y las propiedades elásticas de cada medio analizado.....</b>	<b>33</b>
2.8.1.- Los parámetros que depende las velocidades de propagación.....	34
2.8.1.1.- Coeficiente de Poisson.....	34
2.8.1.2.- Módulo de Young E.....	34
2.8.1.3 Módulo de rigidez al cizallamiento $\mu$ .....	34
2.8.2.- Transformada de Fourier.....	35
<b>2.9.- Determinación de ondas.....</b>	<b>36</b>
<b>2.10.- Relación entre velocidad de propagación p y módulo resiliente y módulo dinámico.....</b>	<b>37</b>
<b>2.11.- Modelos constitutivos del suelo.....</b>	<b>37</b>
2.11.1.-Modelo elástico y lineal.....	37
2.11.2.-Modelo Mohr- Coulomb.....	37
2.11.3.-Modelo Hardening Soils.....	38
<b>2.12.- Fundamentos teóricos del Deflectómetro de impacto (LWD).....</b>	<b>39</b>
<b>CAPITULO III</b>	
<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.- Fabricación de soldaduras de piezocristales.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.- Equipos de medición.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.- Experimentos realizados.....</b>	<b>43</b>
3.3.1.- Experimento 1: Determinación de respuesta frecuencial.....	43

---



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

3.3.2.- Experimento 2: Velocidad de propagación en el agua.....	44
3.3.3.- Experimento 3: Determinación de la frecuencia de resonancia a diferentes presiones de carga.....	47
3.3.4.- Experimento 4: Determinación de velocidad de propagación de ondas P en suelos.....	48
3.3.5.- Experimento 5: Determinación de velocidad de propagación en suelos con equipo ultrasonido.....	50
<b>3.4.- Ensayos de laboratorio y simulación PLAXIS 2D.....</b>	<b>51</b>
3.4.1.- Simulación PLAXIS 2D axisimetrica del ensayo triaxial dinámico.....	51
3.4.2.- Ensayo de compresión no confinada para estimar el módulo resiliente al 1% de su deformación.....	54
3.4.3.- Realización del ensayo TERRATEST 5000 BLU.....	56
3.4.4.- Ensayo de prueba de placa de carga estática no repetitiva para la determinación del módulo de reacción de la subrasante (k).....	57
3.4.4.1.-Procedimiento del ensayo.....	57
3.4.4.2.-Procedimiento de asentamiento del plato en la superficie del suelo.....	59
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS.....</b>	<b>61</b>
<b>4.1.-Estudio de suelos. ....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.- Resultados obtenidos del osciloscopio UNI-T UT32002C.....</b>	<b>63</b>
4.2.1.-Experimento 1: Determinación de respuesta frecuencial para los Piezocristales.....	63
4.2.2.-Experimento 2: Velocidad de propagación en el agua.....	63
4.2.3.- Experimento 4: Determinación de velocidad de propagación de ondas P en suelos.....	65

---



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

4.2.3.1.- Muestra de suelo # 1 (A-2-4) compactada con humedad óptima y densidad máxima seca.....	65
4.2.3.2.- Muestra de suelo # 2 (A-4) compactada a humedad óptima y densidad máxima seca.....	66
4.2.3.3.- Muestra de suelo # 2 (A-4) compactada a humedad óptima y dejando sin protección contra pérdida de humedad durante 3 días.....	67
4.2.3.4.-Muestra de suelo # 3 (A-6) compactada a humedad óptima y densidad máxima seca.....	68
4.2.3.5.- Suelo # 3 (A-6) compactada a humedad óptima y dejando sin protección contra pérdida de humedad durante 3 días.....	68
4.2.3.6.- Análisis de resultado.....	69
4.2.4.- Experimento 5: Determinación de velocidad de propagación en suelos con equipo ultrasonido.....	70
4.2.4.1.- Análisis de resultados.....	70
<b>4.3.-Resultados obtenidos con el ensayo de CBR.....</b>	<b>71</b>
4.3.1.- Análisis de resultado.....	71
<b>4.4.-Resultados obtenidos con compresión no confinada al 1% de Su.....</b>	<b>72</b>
4.4.1.- Análisis de resultado.....	73
<b>4.5.- Determinación del módulo elástico a partir de la velocidad de propagación en base del principio de la piezoelectricidad.....</b>	<b>73</b>
4.5.1.- Análisis de resultado.....	74
<b>4.6.-Determinacion del módulo de reacción con prueba de carga con plato.....</b>	<b>75</b>
4.6.1.- Análisis resultados.....	76
<b>4.7.-Resultados del equipo terratest.....</b>	<b>76</b>
4.7.1.- Análisis de resultado.....	76
<b>4.8.-Determinación del módulo resiliente a través de los ensayos CBR, compresión no confinada y prueba de plato.....</b>	<b>77</b>

---



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

4.8.1.-Módulo resiliente vs ensayo de CBR.....	77
4.8.2.- Análisis de resultado.....	78
4.8.3.- Módulo resiliente vs compresión no confinada.....	79
4.8.4.- Análisis de resultado.....	80
<b>4.9.- Módulo resiliente vs módulo de balasto (k).....</b>	<b>80</b>
4.9.1.- Análisis de resultados.....	81
<b>4.10.- Análisis de resultado por diseño experimental.....</b>	<b>82</b>
<b>CAPITULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>85</b>
5.1.- Las conclusiones que se derivan son las siguientes.....	85
5.2.- Recomendaciones.....	88
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>94</b>
Anexo a: Ensayos de laboratorio de estudio de suelos, de los materiales 1,2 y 3	
Anexo b: Simulación del ensayo triaxial PLAXIS 2D	
Anexo c: Análisis experimental por DESING EXPERT 7.1.6	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS.....</b>	<b>XI</b>

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> Sensores desarrollados para la determinación de la rigidez de bases granulares en función del estado de esfuerzos, (a) en laboratorio, (b) en campo.....	3
<b>FIGURA 2</b> Ciclos de histéresis presentados en el material en donde representa el módulo resiliente.....	9
<b>FIGURA 3.</b> Evolución del módulo resiliente con el esfuerzo desviador.....	10
<b>FIGURA 4.</b> (a) MR en arcillas con humedad superior al óptimo, (b) con humedad inferior al óptimo.....	11
<b>FIGURA 5.</b> Efecto de contenido de agua vs densidad máxima seca.....	12
<b>FIGURA 6.</b> Efecto de la resistencia en dos métodos de compactación.....	13
<b>FIGURA 7.</b> Envoltente de mor coulomb extendido para el caso de suelos no saturados.....	15
<b>FIGURA 8.</b> Línea de intercepción alargada al plano de falla versus succión mátrica.....	16
<b>FIGURA 9.</b> (a) Proyección de la falla envolvente. (b) línea de contorno de la falla envolvente.....	17
<b>FIGURA 10.</b> Esquema ilustrativo que demuestra en donde estamos actualmente en el método de análisis.....	18
<b>FIGURA 11.</b> Confiabilidad de los diseños estructurales que ofrecen el método mecanicista.....	19
<b>FIGURA 12.</b> Respuesta del módulo resiliente en suelos finos.....	21
<b>FIGURA 13.</b> Relación entre $M_r$ . Y $s_{u1,0\%}$ .....	23
<b>FIGURA 14.</b> Estructura perovskita de las cerámicas piezoeléctricas.....	25
<b>FIGURA 15.</b> Recorrido de un punto en una señal senoidal.....	28
<b>FIGURA 16.</b> Simulación del ruido blanco.....	30
<b>FIGURA 17.</b> Visualización de ruido de disparo (flicker noise).....	30
<b>FIGURA 18.</b> Ondas P. ....	31
<b>FIGURA 19.</b> Ondas S. ....	32
<b>FIGURA 20.</b> (A) Ondas Rayleigh. (B) Ondas Love.....	32

---



<b>FIGURA 21.</b> Superficie de fluencia del modelo Mohr- coulomb ( $c=0$ )).....	38
<b>FIGURA 22.</b> Superficie de fluencia del modelo Hardening Soils ( $c=0$ ).....	39
<b>FIGURA 23.</b> Instrumentación para las soldaduras.....	41
<b>FIGURA 24.</b> Piezocristales en hileras adheridos a la baquelita.....	41
<b>FIGURA 25.</b> Equipos utilizados para medir la velocidad de propagación de ondas P.....	42
<b>FIGURA 26.</b> Generador de señales, valor máximo de resonancia.....	43
<b>FIGURA 27.</b> Determinación de respuesta frecuencial.....	43
<b>FIGURA 28.</b> Fabricación de baquelitas.....	44
<b>FIGURA 29.</b> Colocación de dos PZT en paralelo en agua. ....	44
<b>FIGURA 30.</b> Cuadro resumen del tiempo en que el PZT recibe respuesta.....	45
<b>FIGURA 31.</b> Visualizacion de las señales emisor receptor en el osciloscopio.....	45
<b>FIGURA 32.</b> Experimento 2: velocidad de propagación en el agua.....	46
<b>FIGURA 33.</b> Visualización de aumento de amplitud con diferentes cargas. ....	47
<b>FIGURA 34.</b> Experimento 4: determinación de velocidad de propagación de ondas p en suelos. ....	48
<b>FIGURA 35.</b> Representacion del montaje de instrumentos para la determinacion de velocidad de ondas p en suelos.....	49
<b>FIGURA 36.</b> Obtención de la velocidad de propagación ondas P con PZT.....	50
<b>FIGURA 37.</b> Medición de velocidad de propagación con equipo de ultrasonido.....	51
<b>FIGURA 38.</b> Etapa Inicial. ....	53
<b>FIGURA 39.</b> Etapa inicial, construcción de mallado.....	53
<b>FIGURA 40.</b> Segunda etapa. ....	53
<b>FIGURA 41.</b> Tercera etapa. ....	53
<b>FIGURA 42.</b> Cuarta etapa ....	54
<b>FIGURA 43.</b> Etapa de descarga.....	54

---



<b>FIGURA 44.</b> Relación entre $M_r$ y $s_{u1,0\%}$ .....	55
<b>FIGURA 45.</b> Ensayo de compresión no confinada. ....	55
<b>FIGURA 46.</b> Equipo de Terratest.....	57
<b>FIGURA 47.</b> Platos de acero que oscilan entre 76 cm a 15 cm. imagen tomada en AISB.....	58
<b>FIGURA 48.</b> Equipos a utilizar para el ensayo de prueba de carga aplicada.....	59
<b>FIGURA 49.</b> Determinación del módulo de reacción en campo.....	60
<b>FIGURA 50.</b> Muestra del suelo 2, (A-2-4).....	75
<b>FIGURA 51</b> Analisis Experimental del modulo Resiliente obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio como en campo.....	83
<b>FIGURA 52.</b> (A) vista del análisis experimental de los valores de Modulo Resiliente en 2D; (B) grafico de la distribución normal de los valores obtenidos.....	84
<b>FIGURA 53</b> .Sumario estadístico del ajuste R cuadrado.....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Estudio de Suelo # 1.....	61
<b>Tabla 2:</b> Estudio del Suelo # 2.....	62
<b>Tabla 3:</b> Estudio del suelo # 3.....	62
<b>Tabla 4:</b> Respuesta frecuencial calculada en los tres tipos de suelo.....	63
<b>Tabla 5:</b> Velocidad de propagación determinada en el agua.....	64
<b>Tabla 6:</b> Velocidad de propagación en suelo # 1 a humedad óptima y densidad máxima seca.....	65
<b>Tabla 7:</b> Velocidad de propagación en suelo # 3 a humedad óptima y densidad máxima seca.....	66
<b>Tabla 8:</b> Velocidad de propagación en suelo # 2 en la rama seca.....	67

---



<b>Tabla 9:</b> Velocidad de propagación en suelo # 3 a humedad óptima y densidad máxima seca.....	68
<b>Tabla 10:</b> valores obtenidos con el equipo ultrasonido marca Controls en suelo limo-arenoso.....	70
<b>Tabla 11:</b> valores obtenidos a partir del ensayo CBR para diferentes tipos de suelos.....	71
<b>Tabla 12:</b> valores obtenidos a partir del ensayo de compresión no confinada al 1% de la deformación unitaria axial.....	72
<b>Tabla 13:</b> Suelo 1. Estimación del módulo elástico a partir de la $V_p$ en base al principio de la piezoelectricidad.....	73
<b>Tabla 14:</b> Suelo 2 Estimación del módulo elástico a partir de la $V_p$ en base al principio de la piezoelectricidad.....	73
<b>Tabla 15:</b> Suelo 3 Estimación del módulo elástico a partir de la $V_p$ en base al principio de la piezoelectricidad.....	74
<b>Tabla 16:</b> valores obtenidos de la prueba de carga en campo en el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar. ....	75
<b>Tabla 17:</b> valores obtenidos del ensayo Terratest en el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar....	76
<b>Tabla 18:</b> Relación entre el $M_r$ y %CBR para diferente tipos de suelos.....	79
<b>Tabla 19:</b> valores de módulo resiliente obtenidos a partir de la formula y el 1% de $S_u$ .....	79
<b>Tabla 20:</b> valores obtenidos a partir de la formula – y el valor de módulo de balasto.....	81

## ÍNDICE DE GRAFICOS

<b>Grafico 1.</b> Valor de $M_r$ a partir de CBR 95% y 98%.....	77
<b>Grafico 2.</b> Valor de $M_r$ a partir de CBR 95% y 98%.....	77
<b>Grafico 3.</b> Valor de $M_r$ a partir de CBR 95% y 98%.....	78
<b>Grafico 4.</b> Valor de $M_r$ a partir de CBR 95% y 98%.....	78

---



## SINOPSIS

La determinación del módulo resiliente de los suelos y de los materiales que constituyen las estructuras de un pavimento es de alta complejidad, por cuanto se requiere la ejecución de ensayos triaxiales dinámicos en el laboratorio, con instrumentación muy delicada y de alto costo. Ello ha conducido a la necesidad de emplear métodos indirectos para obtener correlaciones significativas con los ensayos de laboratorio. Entre los ensayos de campo más utilizados para lograr la estimación significativa del módulo resiliente se hará énfasis en el método de “Generación de ondas sísmica P por medio de piezocristales y mediciones con osciloscopio y generador de señales. Referencia 1 (Cortes Douglas, 2011)

En el presente trabajo se realizarán determinaciones en el laboratorio de muestras obtenidas en el aeropuerto internacional Simón Bolívar en la pista 1028. Las ventajas que se obtienen con el siguiente trabajo son:

- El bajo costo relativo del procedimiento piezoeléctrico en relación con el procedimiento original (ASTM TRIAXIAL).
- Rapidez y versatilidad en la determinación del módulo en sitio por cuanto el valor obtenido en el laboratorio no siempre reproduce las condiciones de campo.
- Dado que en Venezuela predominan las estructuras de pavimento flexible conformadas principalmente por capas de base y/o sub-bases de materiales granulares, resultaría muy útil la determinación del módulo resiliente para esas capas a la hora de diseñar y rehabilitar estructuras de pavimento.

El desarrollo del TEG implica la consulta de varios trabajos de investigación realizados en universidades norteamericanas, latinoamericanas y europeas que me han sido facilitado por el tutor y que han sido obtenidos en visitas realizadas por él a los centros universitarios donde se han desarrollado estos trabajos (Universidad Georgia Tech y Escuela de Caminos de la Universidad de Madrid).

---



## **ABSTRAC**

Determining the resilient modulus employing soils and materials constituting a pavement structures is highly complex, as the implementation of dynamic triaxial tests is required to be performed in the laboratory, and this demands a frail and expensive instruments. This has led to the need to use indirect methods for significant correlations with laboratory tests. Among the tests used to achieve more robust estimation of resilient Modulus field, we will emphasize the method of "Generation P seismic waves by means of piezocrystals and measurements with an oscilloscope and a signal generator. Reference (Cortes Douglas, 2011).

In this project, calculations will be conducted in the laboratory ,from samples taken at the Simon Bolivar International Airport on track 1028. The advantages obtained with this project are:

- The low relative cost of the piezoelectric procedure in relation to the original procedure (ASTM TRIAXIAL).
- Speed and flexibility in the determination of Modulus in place since the Value Obtained in the laboratory are not always reproduce under field conditions
- Given that in Venezuela is common to find flexible pavement structures mostly formed by base layers and/or sub-base granular materials, could be useful to determine the result of resilient Modulus for these layers, which can play an important role at the design stage will be also useful to rehabilitating pavement structures.

The development of this thesis involves research of various projects performed in North American, Latin American and European universities, the papers were given to me by my thesis tutor, and were obtained by visits to universities where they have developed these research projects such as the Georgia Tech School of Civil Engineering and the University of Madrid.



## INTRODUCCIÓN

La determinación del módulo resiliente de los suelos y de los materiales que constituyen las estructuras de un pavimento es de alta complejidad, por cuanto se requiere la ejecución de ensayos triaxiales dinámicos en el laboratorio, con instrumentación muy delicada y de alto costo. Ello ha conducido a la necesidad de emplear métodos indirectos para obtener correlaciones significativas con los ensayos de laboratorio.

Entre los ensayos de campo más utilizados en el presente, para lograr la estimación significativa del módulo resiliente se encuentran los siguientes:

- Ensayo del deflectómetro de impacto conocido como FWD (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER).
- Ensayo dinámico de plato de carga lo cual implica consumo de tiempo y equipo voluminoso.
- Viga Benkelman modificada.
- Prueba de carga con plato de 30 pulgadas.
- Terratest 5000 BLU
- Generación de ondas sísmicas P por medio de piezocristales y mediciones con osciloscopio y generador de señales.

De todos estos ensayos los que utilizaremos en el caso que nos ocupa serán los dos últimos, empleando para ello equipos de propiedad de Centeno Rodríguez y Asociados, Ingenieros Consultores S.C sin costo alguno para la UCAB ni para quien Suscribe.

Es por ello que nos enfocamos en un nuevo método, el cual nos presenta las siguientes ventajas:

- El bajo costo relativo de los equipos para la generación, amplificación y recepción de señales eléctricas requeridas para la estimación del Módulo Resiliente (lo cual aumenta la factibilidad de su uso).
-



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

- Rapidez y versatilidad en la determinación del módulo en sitio por cuanto el valor obtenido en el laboratorio no siempre reproduce las condiciones de campo.
- Los buenos resultados reportados para el caso de los pavimentos invertidos analizados por el Georgia Tech, incentivan la realización de los ensayos para la determinación del Módulo Resiliente.
- Dado que en Venezuela predominan las estructuras de pavimento flexible conformadas principalmente por capas de base y/o sub-bases de materiales granulares y materiales finos, resultaría muy útil la determinación del módulo resiliente para esas capas a la hora de rehabilitar estructuras de pavimento.

A su vez se realizaran ensayos de laboratorio comunes para poder correlacionar los valores obtenidos por este último ensayo.

Entre los ensayos realizados en el laboratorio el cual relacionaremos con el módulo resiliente son:

- Ensayo de C.B.R de tres puntos y 15 puntos.
- Ensayo de compresión no confinada en suelo compactado a humedad óptima obtenida por el método AASHO T-180-84 para determinar el valor del módulo resiliente al 1% de la deformación unitaria de la muestra.

A su vez se lograra realizar simulaciones del ensayo triaxial para obtener el módulo resiliente empleando para tal fin el software desarrollado por PLAXIS 2D, por cuanto se trata de un modelo axisimetrico al cual se le aplica cargas de tipo dinámico en un cabezal rígido en el tope de la muestra. La simulación incluye la generación de esfuerzos principales y la aplicación de 200 repeticiones de carga y descarga para tres condiciones de esfuerzos desviador diferente. El módulo resiliente se obtiene en la última fase de descarga observando la gráfica de deformación unitaria en el tercio central del espécimen simulado.

---



## CAPITULO I

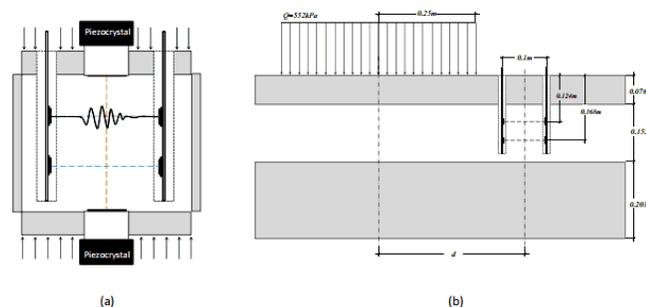
### PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

En pavimentos, las deformaciones interesan desde dos puntos de vista: por un lado, las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla, y por otro, porque es sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho (Rico A., Del Castillo H., 1992).

Es de gran importancia estudiar los comportamientos de los pavimentos, para el diseño del mismo. Unas de las propiedades más importantes es el módulo resiliente que según la norma AASHTO T294-921 nos define.

“Es un parámetro que se utiliza para comprobar el estado de una capa de firme. Nos da una idea de la calidad de la capa y de la durabilidad, ya que se obtiene al aplicar cargas cíclicas.” (AASHTO T294-921).

La mayoría de los ensayos para la medición del módulo resiliente se consideran complejos y de alto costo para un uso rutinario es por ello que se presenta una nueva metodología para determinar la relación entre la rigidez y el estado de esfuerzos en bases granulares, este método se basa en medir velocidades de propagación de ondas P. usando cristales piezoeléctricos que sirven de receptores de las ondas elásticas, estos son instalados en serie en dos hileras y también se puede realizar en campo.



**FIGURA 1.** Sensores desarrollados para la determinación de la rigidez de bases granulares en función del estado de esfuerzos, (a) en laboratorio, (b) en campo. Tomadas de: [http://pmrl.ce.gatech.edu/papers/Cortes\\_2011.pdf](http://pmrl.ce.gatech.edu/papers/Cortes_2011.pdf)



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

Para cada señal se determina el tiempo para generar la velocidad de propagación de onda (P), se computa teniendo en cuenta la distancia entre los sensores. Este método hace posible la medición directa del módulo de ondas P, y permite comparar los resultados de mediciones en el laboratorio como en el campo, Este método hace posible la obtención del módulo resiliente mediante la generación de ondas sísmicas en el suelo y recepción de la respuesta del mismo, en forma de energía eléctrica para su transformación en energía mecánica, que luego es procesada a través de formulaciones matemáticas.

Esta metodología de Georgia Tech ha sido verificada en “pavimentos invertidos” es decir pavimentos de alta capacidad estructural aportada principalmente por capas de suelos de alto espesor, conformados por piedra picada o estabilizados con cemento hidráulico sobre las que finalmente se conforman capas asfálticas de relativo bajo espesor debido a la gran rigidez de su base.

La base granular cementada de un pavimento rígido cumple una gran función en la transferencia de cargas inducidas por el tráfico. Ya que este se basa en tener un gran espesor de base, con una pequeña capa asfáltica. Es por ello que se propone inducir el empleo de este método en los pavimentos convencionales, para determinar el módulo resiliente y a su vez una nueva estrategia para disminuir costos en rehabilitaciones como ofrecer mayor durabilidad empleando pavimentos invertidos.

### **1.1.- Antecedentes y limitaciones.**

Todos los diseños de pavimentos en la actualidad se fundamentan en lo que se denominan métodos mecanicista, lo cual implica la necesidad de determinar el módulo resiliente de los materiales futuros del pavimento incluyendo el suelo de la subrasante. La mayoría de los trabajos de investigación que se realiza en los centros universitarios en los países del primer mundo buscan obtener correlaciones que permitan estimar el módulo resiliente con alta significación estadística.

El alto costo de los materiales de construcción y la incidencia de la producción de concreto asfáltico en las desmejoras del ambiente, han conducido a la necesidad de emplear procesos de construcción de tipo invertido en la que el empleo del cemento asfáltico se ha tratado de reducir en lo mínimo. Esta técnica ha sido desarrollada con éxito por la universidad Georgia Tech y ha generado

---



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

tramos experimentales de pavimento cuyo comportamiento ante las sollicitaciones de las cargas dinámicas de los vehículos han resultado excelente.

El principal usuario de las estructuras invertidas del pavimento es el estado Venezolano por cuanto se logra una reducción considerable de costos de mantenimiento anual de las carreteras al evitar el reflejo de grietas en las carpetas asfálticas superficiales. Como ya se ha expresado la principal ventaja es la poca contaminación ambiental y la disminución de costos que produce esta solución al reducir notablemente el empleo de mezclas asfálticas en calientes, como también el mejoramiento técnico de las nuevas construcciones y de las reconstrucciones de pavimentos, se le ofrece al país una nueva estrategia de aplicación y utilización de pavimentos invertidos, para mejorar la durabilidad y evitar típicas fallas comunes que hoy en día se ve muy a menudo en los pavimentos del país.

La obtención del módulo resiliente con el método del principio de piezoelectricidad nos beneficia en cuanto el tiempo mínimo de obtención del mismo, como también mejoras en las vías de comunicación de nuestro país, evitando futuros agrietamientos, asentamientos y alargando el tiempo de vida útil de los pavimentos convencionales en Venezuela.

### **1.2.- Metodología**

En el presente trabajo se empleará lo que se entiende por metodología experimental lo cual significa que será de tipo semi empírico; es decir experimentando en muestras de suelo y derivando conclusiones por método inverso al analizar los resultados obtenidos en la experimentación. El término semi empírico se utiliza para indicar que se hace uso de un marco teórico para orientar la investigación empírica.

En primer lugar se explica lo relacionado con el aprendizaje del uso de técnica relacionada con mediciones electrónicas y con la descripción del equipo de medición requerido para realizar las mismas, toda vez que tanto la metodología de medición como sus resultados serán utilizados principalmente por ingenieros civiles y por técnicos que solo tienen nociones muy someras sobre ingeniería electrónica y sobre el significado de la piezo-resistencia como método de medición en la mecánica de los suelos.

---



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

De seguidas se explica lo relacionado con la ciencia de la fabricación de los piezocristales, insistiendo en la necesidad del uso de los mismos, garantizando su calidad, para generar ondas de compresión (Onda de tipo P), que al viajar a través del material que constituye la estructura de un pavimento, permitan ser evaluadas para medir en sitio, y en el laboratorio, el módulo de resiliencia de estos materiales estructurales.

Se hace hincapié en la ventaja de utilizar este método indirecto de medición del módulo resiliente teniendo en consideración lo costoso y lo difícil de la obtención de un método directo de medición que simule la condición física de resiliencia de los suelos y agregados en sitio y las condiciones impuestas al método directo utilizado en el laboratorio con el empleo del ensayo triaxial dinámico instrumentado de forma tal que 'permita medir la deformación "no permanente" del material de la estructura del pavimento que será excitado por la sollicitación dinámica que imponen las ruedas de los vehículos que circularan sobre el pavimento.

Se explica lo relacionado con las corrientes parásitas y con los ruidos electrónicos que dificultan la interpretación de los resultados de las mediciones que arroja al osciloscopio dotado de un generador de señales y de un filtro que elimine frecuencias mayores que las que producen los piezocristales. Además se explica lo relacionado con el significado de la producción de los armónicos que dificultan la medición del tiempo de llegada de la primera onda compresional de tipo P, expresado generalmente en micro segundos.

Se hace referencia a las relación que existe entre las velocidades de viaje de las ondas de compresión (tipo P) y de la demás ondas que con menor velocidad viajan a través del medio en el que se lleva a cabo la medición de dichas velocidades y en la ventaja de utilizar la onda de compresión por ser la que más rápido viaja entre los piezocristales de emisión y de recepción, ubicados a una distancia predeterminada fija y óptima, entre ellos, en el medio en el cual se requiera determinar el módulo resiliente.

Con la finalidad de garantizar la validez de las mediciones de la velocidad de las ondas de compresión que se miden con el método de los piezocristales; se procede a la medición de la velocidad

---



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

de la onda P en el agua destilada a una temperatura de 20 grados Celsius, a sabiendas que dicha velocidad es 1443 metros por segundo. El valor obtenido se emplea como valor de calibración del sistema de medición.

La presentación de la metodología y de los resultados se hace en una forma didáctica, sin el uso de matemática muy complicada que traiga como consecuencia un impacto negativo entre los usuarios de formación civil, quienes no reciben entrenamiento especial en el empleo de la electrónica y de la teoría asociada a la misma en la medición indirecta de las propiedades elásticas de los materiales de construcción.

Ejecutar personalmente ensayos comparativos, empleando equipo disponible, de propiedad del tutor del presente trabajo espacial de grado, para determinar el valor del módulo resiliente la pista internacional del Aeropuerto Simón Bolívar de Maiquetía, Venezuela, con el empleo del ensayo de plato de 30 pulgadas de diámetro (Módulo Estático en Sitio), el equipo TERRATEST 5000 BLU, conocido como Deflectómetro Liviano de Impacto fabricado en Alemania y empleado en las líneas de trenes de alta velocidad de Francia, Suiza y Alemania; ensayos de CBR y el ensayo de Compresión No Confinada (CNC) para una deformación Unitaria del 1 %.

Se presentan tabla y graficas que permiten hacer la comparación con los valores de los módulos resilientes determinados en los mismos materiales por otros procedimientos como el ensayo triaxial dinámico realizado en laboratorios de conocida seriedad internacional, como el deflectómetro dinámico ligero de impacto (LWID), modernamente en uso en Europa y en América para tal fin, el ensayo de compresión no confinada en muestras de suelo compactado a humedad óptima y a densidad máxima seca (ASSHTO T-180-83) para una deformación unitaria del 1 % y finalmente con valores reportados con la correlación entre el valor CBR y el Mr.



### **1.3.- Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1.- Objetivo General**

- Obtener una metodología para determinar el módulo resiliente ( $M_r$ ) de un suelo areno limoso, areno arcilloso y limo arcillosos la cual permita la medición in situ del mismo y su comprobación a la reportada en la literatura técnica arbitrada publicada en referencias de validez indudable de uso internacional.

#### **1.3.2.- Objetivos Específicos**

- Comparar los valores obtenidos por la medición indirecta del Módulo Resiliente (MR) con los valores publicados en los trabajos realizados por el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Georgia como también valores obtenidos a través de los ensayos de CBR, Triaxial U.U, DCP y ensayo de compresión no confinada.
  - Comparar la relación entre módulo dinámico y módulo resiliente a través del ensayo de TERRATEST 5000 BLU y de la prueba de carga realizada personalmente con plato de 30 pulgadas propiedad de la empresa Centeno Rodríguez y Asociados Ingenieros Consultores, de la que mi tutor es Director Principal.
  - Mejorar la calidad técnica de las nuevas construcciones de pavimentos flexibles convencionales utilizando el principio de piezocristales y el generador de ondas P.
  - Simular ensayo triaxial para obtener el módulo resiliente empleando para tal fin el software desarrollado por PLAXIS 2D, por cuanto se trata de un modelo axisimétrico al cual se le aplica cargas de tipo dinámico en un cabezal rígido en el tope de la muestra. La simulación incluye la generación de esfuerzos principales y la aplicación de 200 repeticiones de carga y descarga para tres condiciones de esfuerzos desviador diferente. El módulo resiliente se obtiene en la última fase de descarga observando la gráfica de deformación unitaria en el tercio central del espécimen simulado.
-



## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

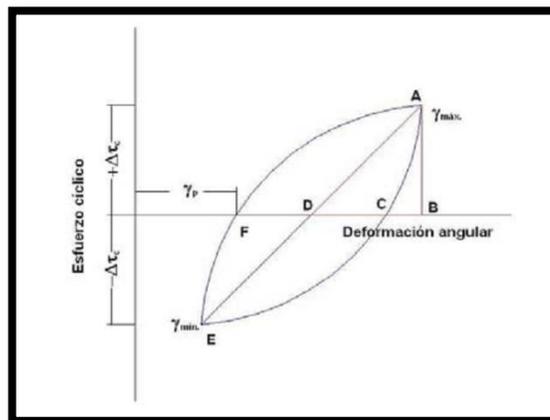
#### 2.1.- MÓDULO RESILIENTE

La determinación del módulo resiliente en los materiales que conforman los pavimentos flexibles es de gran importancia ya que estos se ven sometidos a diferentes cargas dinámicas de grandes magnitudes transmitidas por el tránsito vehicular.

El concepto de módulo resiliente se define, según ASTM y AASHTO como:

“La relación entre el esfuerzo desviador axial repetitivo después de 200 repeticiones de carga axial dinámica y la deformación unitaria axial recuperable en el paso de la última etapa de descarga” (E.J YODER Y M.W.WITCZAK segunda edición, 1975. P. 262).

La deformación permanente se acumula y para cada ciclo de carga va disminuyendo produciendo menor histéresis en la relación esfuerzo- deformación, hasta que desaparece en los ciclos finales, el material llega a un estado en el cual la deformación se recupera y es en este momento cuando se obtiene un comportamiento resiliente, (Figura 2). Donde es definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación recuperable (Garnica Anguas, et al 2001).



**FIGURA 2** Ciclos de histéresis presentados en el material en donde representa el módulo resiliente. Imagen tomada de: <http://dyna.unalmed.edu.co/en/ediciones/184/articulos/v81n184a10/v81n184a10.pdf>



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

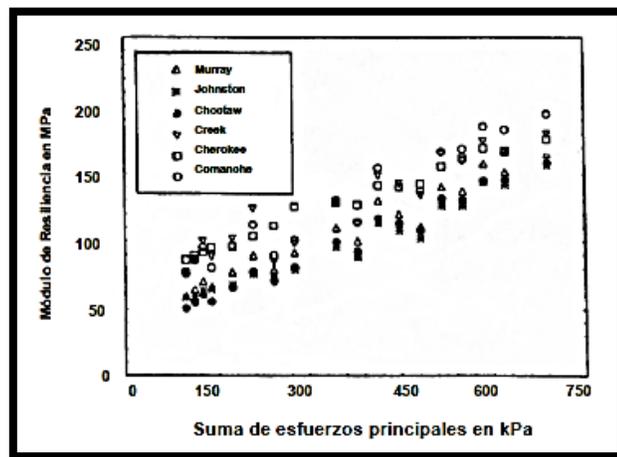
Así pues, el módulo resiliente depende de muchos factores como el número de aplicaciones del esfuerzo y magnitud del mismo, tixotropía en las arcillas cercanas al grado de saturación, método de compactación y las condiciones de compactación como la humedad el cual afecta notablemente el valor del módulo resiliente, Es por ello que el ingeniero encargado del diseño, construcción y conservación de los pavimentos flexibles deben tener en cuenta este valor, como también los factores que hay que considerar para la selección de este parámetro para el diseño adecuado.

### 2.1.1.- Factores que afectan el módulo resiliente

Debemos tener en cuenta que el valor del módulo resiliente no es un valor constante para cada material, sino que depende al 100% de muchos factores. Los principales se discuten a continuación:

#### 2.1.1.1.- Esfuerzo desviador

A medida que el esfuerzo desviador aumenta, el módulo resiliente tiende a disminuir hasta poder llegar un valor constante, este valor depende de los ciclos de carga y del tipo del material en este caso las arcillas, en materiales granulares sucede lo contrario, el MR aumenta con el incremento de esfuerzos. Es por ello que la granulometría en suelos granulares tiene una importancia significativa ya que esto depende que las bases granulares sean deficientes o de buena calidad. (Zaman et. Al 1994).



**FIGURA 3.** Evolución del módulo resiliente con el esfuerzo desviador. Imagen tomada de: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/15059/1/RojasQuinteroLauraMarcela2014.pdf>



### 2.1.1.2.- Contenido de humedad

El contenido de humedad es uno de los factores de gran importancia que influye notablemente en el valor del módulo resiliente, en los suelos finos al aplicar ciclos de carga se genera presión de poros el cual disminuye los esfuerzos efectivos del suelos y aumenta la deformación permanente. Es decir a mayor contenido del agua el módulo resiliente disminuye. (Khoury & Zaman, 2004).

Se ha tenido en consideración que a variaciones de humedad entre el 3 y 5% se produce una reducción del módulo resiliente entre el 50 y 70% sin importar el tipo del material (Andrei. et al, 2009)

Este factor afecta directamente la densidad máxima seca, el cual está relacionada con el contenido de la humedad óptima, que se obtiene a través del ensayo de compactación proctor modificado, en suelos compactados que se encuentren por debajo de la humedad óptima el valor del módulo resiliente será mayor que aquellos que se encuentren por encima de la humedad óptima el cual disminuye notablemente este valor.

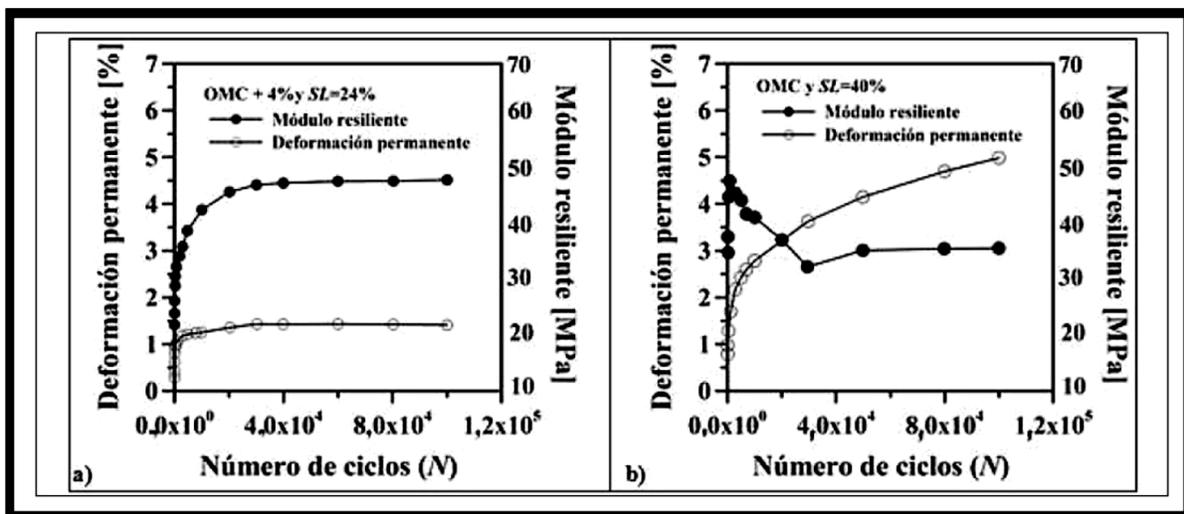


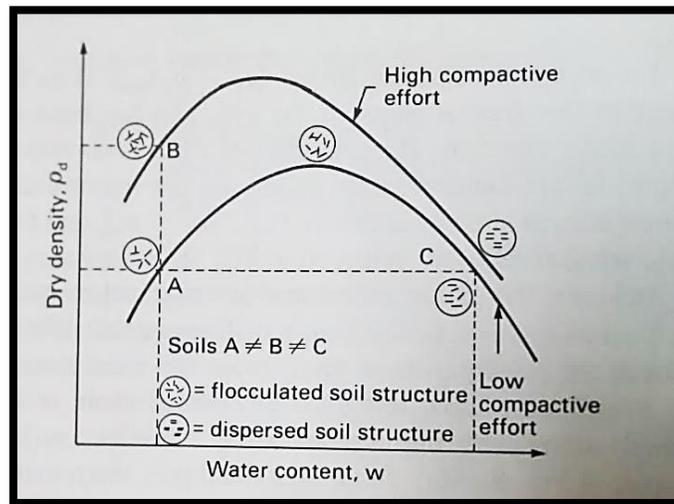
FIGURA 4. (a) MR en arcillas con humedad superior al óptimo, (b) con humedad inferior al óptimo. Tomada de: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/15059/1/RojasQuinteroLauraMarcela2014.pdf>



### 2.1.1.3.- Incidencia del método de compactación

El método de compactación que se utilice en el campo o en el laboratorio tiene una alta incidencia en el resultado de los ensayos de resistencia al corte de los suelos, y en especial en los casos de los limos arcillosos y de los limos muy pasticas, cuando estos suelos se compactan en la rama húmeda, las partículas laminales que corresponden a los coloides tienden acomodarse de manera paralela como se muestra en la figura 5.

Estos cambios en la estructura depende del grado de saturación, cuando son bajos los suelos finos se reacomoda al azar, y no existe una deformación apreciable, en cambio cuando se compacta con un grado de saturación alto, este se acomoda de manera paralela generando una estructura dispersa. (Rico Rodríguez & Del castillo Mejía, 1992).



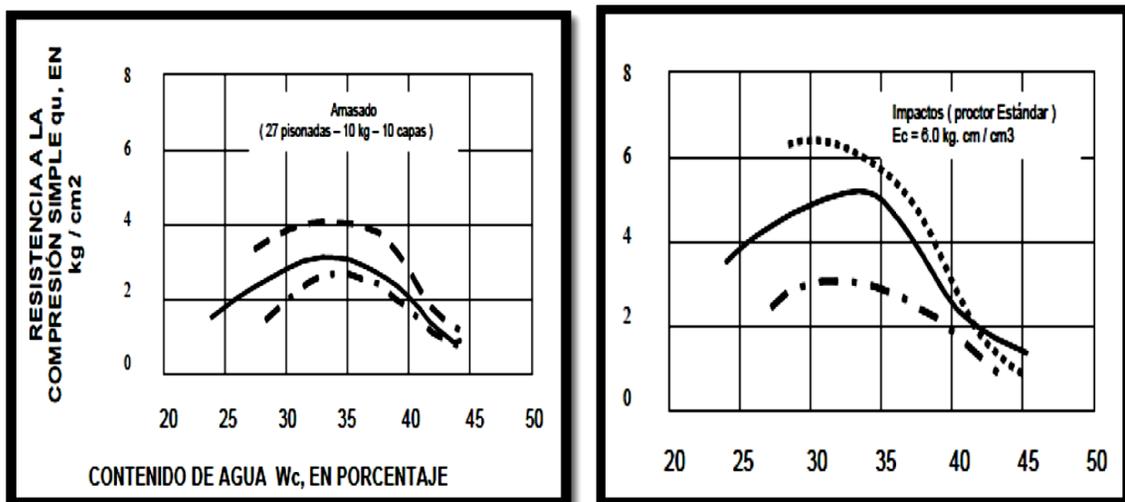
**FIGURA 5.** Efecto de contenido de agua vs densidad máxima seca. Imagen tomada de: Principles of Pavement Design, second edition, New York, 1975.

Por el motivo antes explicado cuando los suelos son compactados en la rama húmeda, tienden a presentar una estructura laminada y la medición de su módulo resiliente resulta errática cuando se realizan los ensayos de determinación de la velocidad de la onda P empleando los piezocristales. (Ver resultados de laboratorio obtenidos por nosotros.)



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

En cuanto se refiere a los sistemas de compactación empleados en el laboratorio o en campo, estos tienen notable influencia en la obtención de la densidad máxima seca y en especial en la humedad óptima, como se puede observar en la figura 6, el método de amasado, obtenido con el empleo de pata de cabra para la compactación de suelos arcillosos tiende a representar mejor la realidad en cuanto resistencia de compresión simple se refiere, mientras el método de impacto tiende a sobrevaluar dicha resistencia cuando se está empleando el mismo equipo. El método de impacto (martillo de 10 libras con 18 pulgadas de caída libre) no representa bien el método de compactación de campo que emplea el rodillo vibrador, por tal motivo se obtienen valores erráticos del módulo resiliente.



**FIGURA 6.** Efecto de la resistencia en dos métodos de compactación. Tomada de:

<http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/15059/1/RojasQuinteroLauraMarcela2014.pdf>, Imagen original de Rico Rodríguez & del Castillo, 1992

Cuando empleamos los suelos areno-limosos o las mezclas de limo y arcilla el equipo vibratorio simula mejor el ensayo de impacto ejecutado en el laboratorio por el método AASHTO T180-83.

Lo expresado en los párrafos precedentes significa que se debe utilizar el equipo de compactación de campo y laboratorio más adecuado a las características del suelo que se utilizan.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

Es decir pata de cabra para arcillas y arcillas limosas por su efecto de amasado y tampers vibradores para las arenas limo-arcillosas con bajo contenido de arcilla por su efecto fundamental de impacto.

El empleo indiscriminado del equipo de rodillo o tampers vibradores en el caso de los suelos arcillosos tienden sin lugar a duda a causar laminación lo cual implica que la resistencia al corte se vea afectado y que la permeabilidad horizontal tienda a ser mayor que la permeabilidad vertical.

En consecuencia la escogencia del método de compactación empleado tanto como laboratorio como campo debe ser objeto de un claro raciocinio por parte del ingeniero proyectista y por los inspectores de la obra.

### **2.1.1.4.- Aspectos teóricos relacionados con los suelos no saturados**

el comportamiento de los suelos no saturados, ya sea en lo que se refiere en la resistencia del corte o a la deformación de los mismos, bajo la sollicitaciones de carga difieren notablemente a los suelos en estado saturado; y si bien existe una tendencia a utilizar las teorías que corresponden a los suelos saturados por motivos de seguridad, ello no se justifica si se han realizado inversiones monetarias para garantizar el buen comportamiento de sistemas de drenajes superficiales y de subdrenajes para evitar la saturación de los suelos.

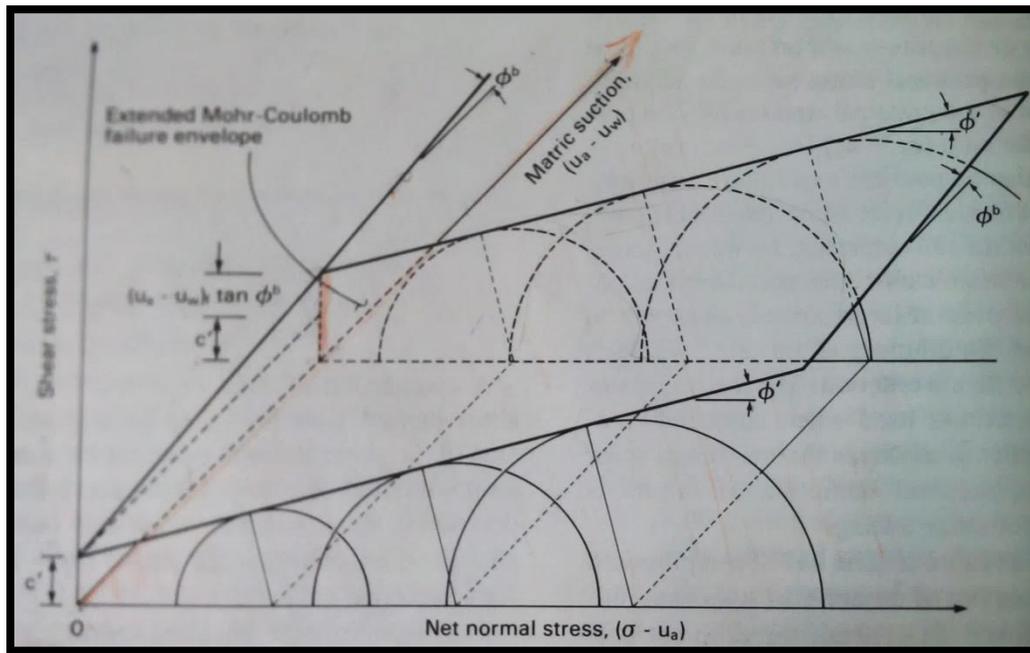
Los suelos saturados se comportan como sistemas trifásicos; es decir, fase sólida, fase líquida y fase gaseosa. Mientras tanto los suelos no saturados se comportan como sistemas cuatrfásicos por cuanto es necesario añadir a las fases anteriormente citadas la correspondiente a la membrana contráctil (ver Fredlund y Rahardjo, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, pág. 14. 1.6.2, 1993).

En el caso de los suelos saturados la resistencia al corte viene expresada en términos del ángulo de fricción, de la cohesión en estado saturado y del peso unitario; mientras que en el caso de los suelos no saturados la resistencia al corte viene expresada en función de la cohesión aparente la cual es función de la succión mátrica y del ángulo  $\phi^b$ , el cual representa la inclinación del plano en tercera dimensión en donde se muestra la influencia de dicha succión mátrica en la cohesión del suelos.

---



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.



**FIGURA 7.** Envolvente de mor coulomb extendido para el caso de suelos no saturados. Imagen tomada de: Fredlund y Rahardjo, Soil Mechanics for Unsaturated soils, pág. 228, 1993).

La resistencia al corte fundamentado en los criterios anteriormente expuestos viene dada por:

$$\tau_{ff} = c + (\sigma_f - u_w)f. \text{ Tan } \phi' \text{ (para esfuerzos efectivos, suelos saturados). F\u00f3rmula 1}$$

En el caso de los suelos nos saturados viene dado por la expresi\u00f3n:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)f. \text{ Tan } \phi' + (u_a - w)f. \text{ Tan } \phi^b. \text{ F\u00f3rmula 2}$$

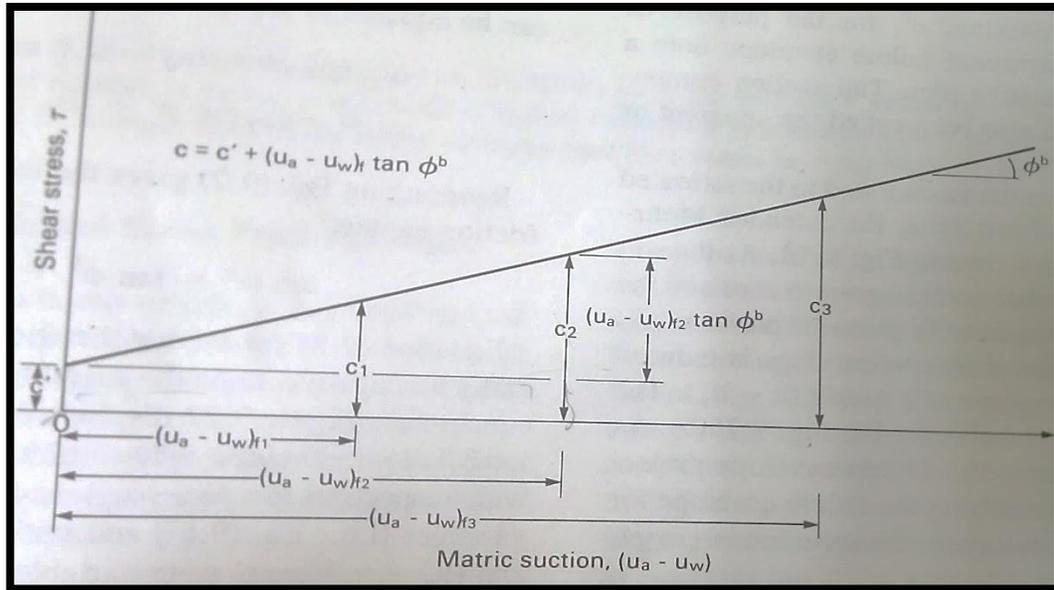
Se entiende por cohesi\u00f3n aparente el valor obtenido de sumar a la cohesi\u00f3n efectiva del suelo saturado el valor de la succi\u00f3n m\u00e1trica por  $\tan \phi^b$ , lo cual genera la expresi\u00f3n:

$$C = c' + (u_a - w) \tan \phi^b. \text{ F\u00f3rmula 3}$$



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

La figura 8. Representa en forma gráfica la expresión anterior.



**FIGURA 8.** Línea de intercepción alargada al plano de falla versus succión mátrica. Imagen tomada de: Fredlund y Rahardjo, Soil Mechanics for Unsaturated soils, pág. 229, 1993).

Como se puede observar en la figura 8 el ángulo de fricción interna es idéntico para el caso de los suelos saturados y no saturados por cuanto no tiene relación con la succión mátrica, y como se puede ver en forma clara la influencia de la succión mátrica solo afecta a la cohesión, por tal motivo es muy importante garantizar que la succión mátrica no varíe por efectos de saturación del suelo tomando todas las prevenciones necesarias para que el sistema de drenaje funcione adecuadamente.

Es evidente que en el caso de los suelos no saturados, el módulo resiliente es mayor que en el caso de los suelos saturados, y de hecho la norma AASHTO T 274 y la INV 156-07 exige realizar el ensayo en suelos con humedad óptima.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

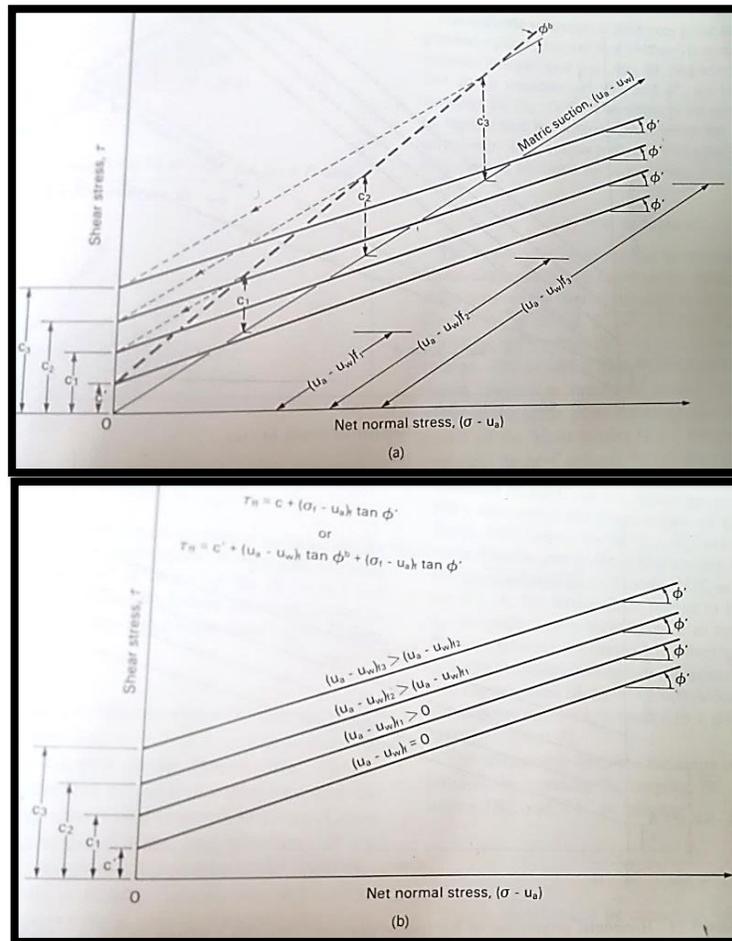


FIGURA 9. (a) Proyección de la falla envolvente. (b) línea de contorno de la falla envolvente. Tomada de: Fredlund y Rahardjo, Soil Mechanics for Unsaturated soils, pág. 231, 1993).

### 2.1.2.- Diferencia entre tensión negativa y succión

La succión es una deficiencia de presión que se produce en el suelo sin deformaciones ni solicitaciones del suelo de ninguna especie mientras que la presión de poros negativa o tensión negativa es una deficiencia de presión cuando al suelo se le aplica un esfuerzo o una deformación.



### 2.1.3.- Método mecanicista

El método mecanicista se fundamenta en que un pavimento puede ser modelado como una estructura sobre una cimentación elástica, para que sea posible calcular los esfuerzos, deformaciones o deflexiones debido a la carga dinámica aplicada, sin embargo hay factores que no pueden ser modelados y se recurre hacer calibraciones de modelos con observaciones de campo. (Garnica et al, 2004).

La figura 10 nos demuestra en donde nos encontramos en cuanto el método de análisis estructural y diseños de pavimentos, donde se respalda en el valor de CBR y en las propiedades físicas del suelo, aunque en algunos países ya se opta y se manejan conceptos mecánico- empírico y mecanicista como lo es el módulo de resiliencia pero correlacionándolos con los valores del CBR y no como propiedad fundamental del suelo.

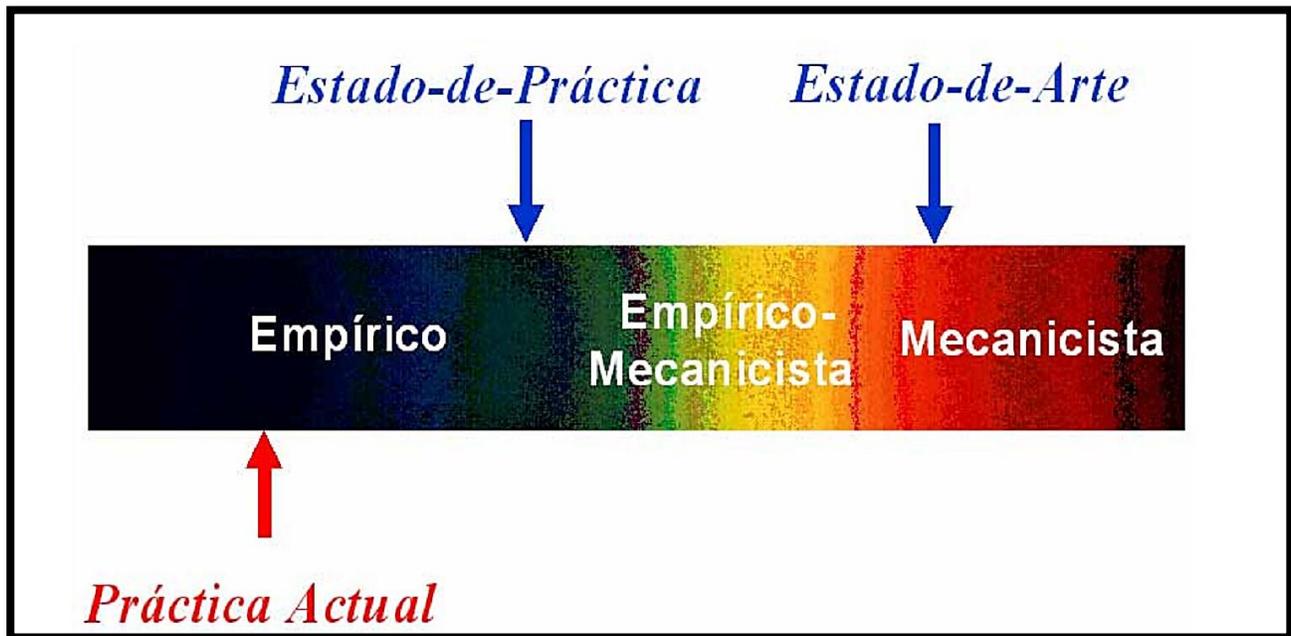
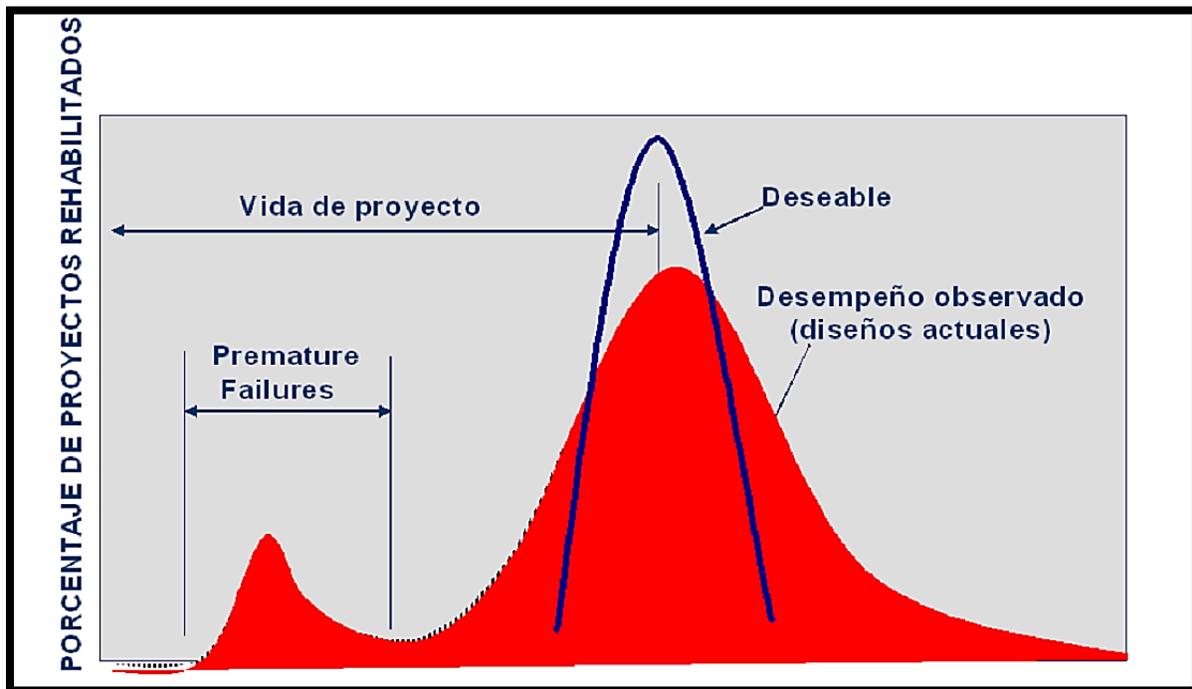


FIGURA 10. Esquema ilustrativo que demuestra en donde estamos actualmente en el método de análisis. Imagen tomada de: Publicación técnica N° 258, Sanfandila, Qro, 2004. “conceptos mecanicistas de pavimentos”.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

Los métodos mecanicistas tienden a tener un rumbo científico que nos puede llegar a permitir a tener un análisis sobre el comportamiento del pavimento ante el clima y la carga aplicada sobre él, como es el caso de tránsito vehicular o aéreo. Esta metodología nos facilitaría la evolución de los deterioros en el tiempo y generando mayor confiabilidad de los diseños. Ver figura 11.



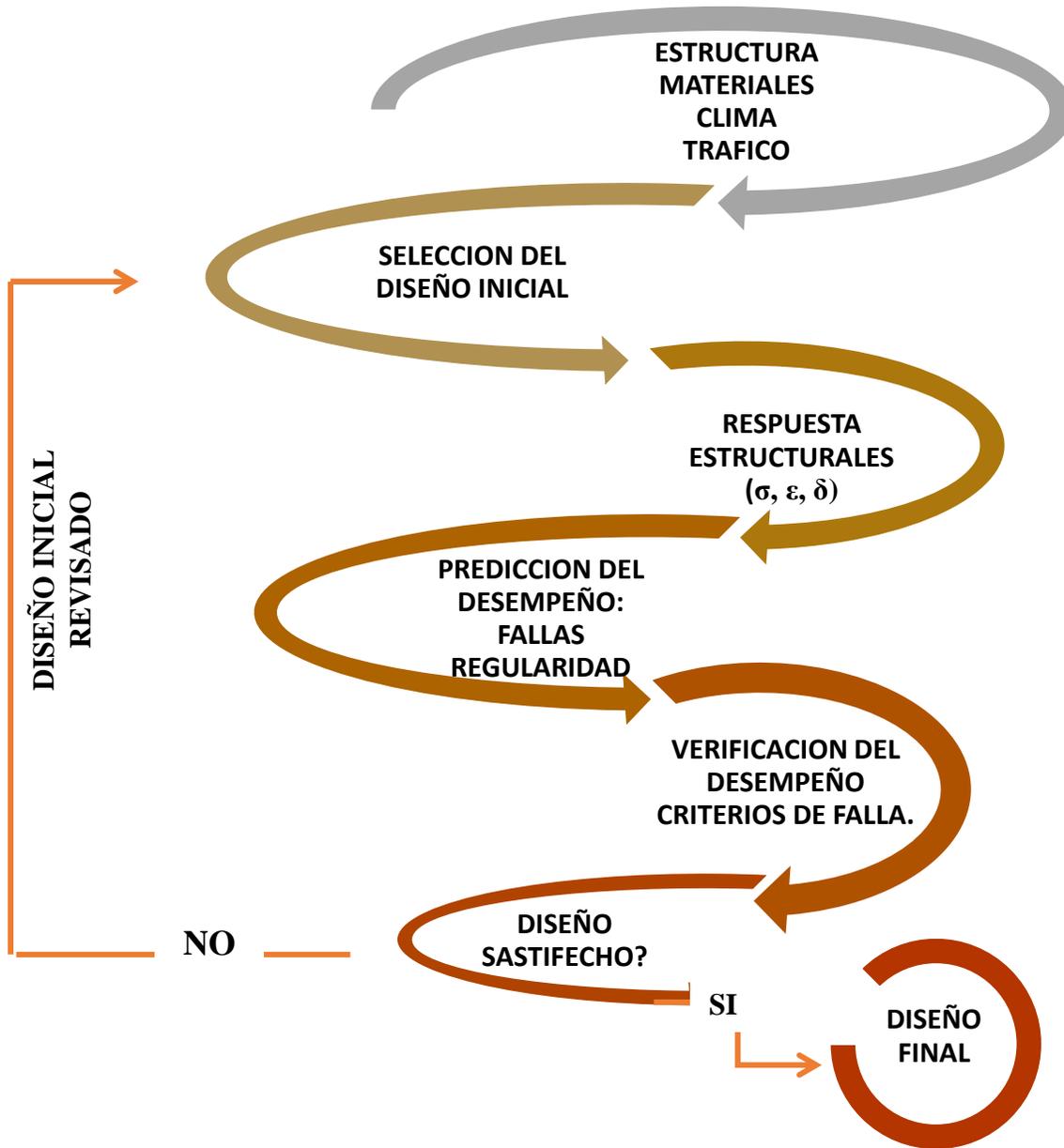
**FIGURA 11.** Confiabilidad de los diseños estructurales que ofrecen el método mecanicista. Imagen tomada de: Publicación técnica N° 258, Sanfandila, Qro, 2004. “conceptos mecanicistas de pavimentos”.

Este método consta de ciertos componentes claves el cual se refiere a la geometría de la estructura, las propiedades y tipos de materiales, el tipo de clima el cual está involucrado la precipitación y la temperatura, el nivel y tipo de carga, estos componentes son básicos para una primera estimación en la selección de diseño inicial.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

### Componentes claves para el método mecanicistas.



Mapa conceptual # 1. Fuente: Elaboración propia.



## 2.1.4.- Tipos de materiales

### 2.1.4.1- suelos finos y granulares.

Como ya se ha mencionado anteriormente que el módulo resiliente varía y depende de ciertos factores también los tipos de materiales influyen en el valor de los parámetros del módulo resiliente.

En el caso de los suelos finos, el módulo de resiliencia decrece con el incremento del esfuerzo desviador, se define como:

$$\sigma^d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Fórmula 4}$$

En la figura 12 se muestra la relación entre el módulo de resiliencia y el esfuerzo desviador para suelos obtenidos en pruebas de laboratorio. Las constantes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  depende del tipo de suelo y su estado geo mecánico,  $k_1$  y  $k_2$  establece el punto de intersección de las pendiente de la recta  $k_3$  y  $k_4$ .

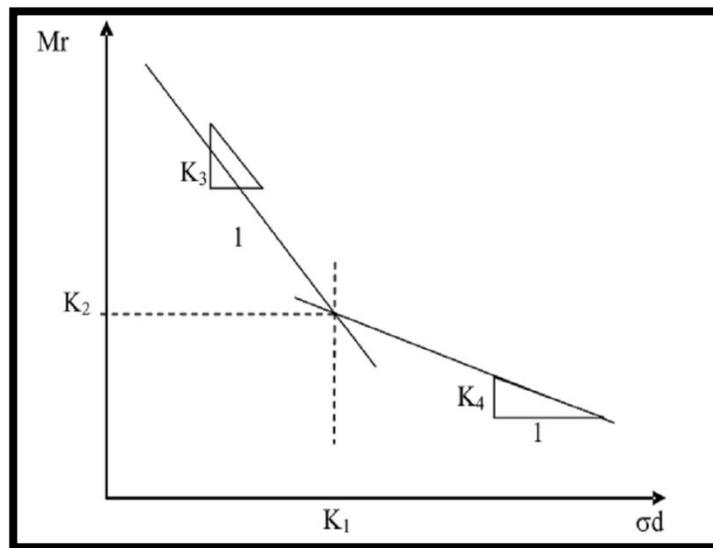


FIGURA 12. Respuesta del módulo resiliente en suelos finos. Imagen tomada de: witzack, (1975).” Principles of pavement desing”.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

En el año 1979, Yoder y Witzak (1975) recomendaron utilizar el modelo bilineal el cual consiste en las siguientes ecuaciones matemáticas.

$$M_r = K_2 + K_3 (K_1 - \sigma_d) \text{ para } K_1 > \sigma_d \text{ **Fórmula 5**}$$

$$M_r = k_2 + k_4 (\sigma_d - K_1) < \sigma_d \text{ **Fórmula 6**}$$

Luego en 1981 adoptaron un nuevo modelo en el cual se obtuvieron excelentes resultados en tipos de suelos en San Diego, Illinois y Maryland este modelo se expresó con la siguiente ecuación.

$$M_r = K \sigma_d^n \text{ **Fórmula 7**}$$

En donde k y n son parámetros que dependen del tipo y del estado del suelo.

En el caso de los suelos granulares según Witzak (1975), adoptó la siguiente ecuación:

$$E = K_1 \cdot \theta^{K_2} \text{ **Fórmula 8**}$$

En el cual es una relación entre el módulo de resiliencia y la suma de esfuerzos principales.

En donde el valor de k1 y k2 se obtienen experimentalmente y  $\theta$  es la suma de los esfuerzos principales.

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \text{ **Fórmula 9**}$$



## 2.2.- ENSAYOS DE LABORATORIO y CAMPO PARA DETERMINAR EL MÓDULO RESILIENTE

Para determinar el módulo resiliente en el laboratorio y en el campo existen varios tipos de ensayos en el cual se relacionan entre si entre los ensayos de laboratorio encontramos: Ensayo triaxial, ensayo de CBR y compresión no confinada al 1%. Entre los ensayos de campo podemos determinar el módulo resiliente a través de la prueba de plato repetida y no repetida, el Terratest (LFW), CBR en campo entre otros.

Sin embargo cabe destacar que el módulo resiliente obtenido en laboratorio no es completamente representativo, debido a los factores que influyen a este valor.

El método de AASHTO de 1993, estima el módulo resiliente a partir del CBR de la siguiente formula:

$$Mr \text{ (psi)} = 1500 \times \text{CBR} \text{ Fórmula 10}$$

Woojin lee, et al (1997) realizó un estudio el cual consistió en unas pruebas de laboratorio de compresión no confinada de suelos típicos de Indiana, Estados Unidos. Y se concluyó que existe una buena correlación entre el módulo resiliente y las pruebas de compresión no confinada tal cual como se demuestra en la figura 13 para suelos arenosos arcillosos, limo arcillosos, este se obtiene a partir de la resistencia en compresión simple al 1% de deformación.

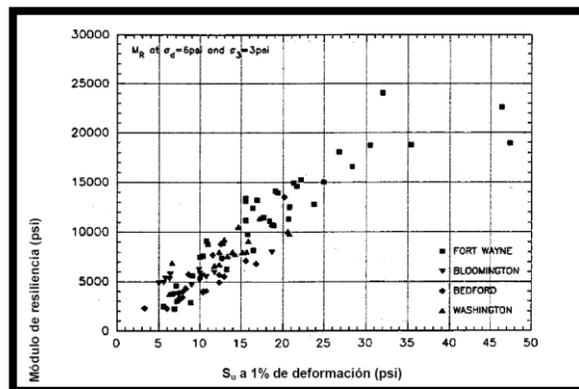


FIGURA 13. Relación entre  $M_r$ . Y  $S_{u1,0\%}$ . Imagen tomada de: Journal of geotechnical and geonvironmental engineering(1997)



### **2.3.- PRINCIPIOS DE PIEZOELECTRICIDAD.**

El principio de la piezoelectricidad comenzó a finales del siglo XVIII, en donde Coulomb afirmaba que la piezoelectricidad se generaba cuando se aplicaba presión. El fenómeno de la piezoelectricidad fue descubierto en 1880 por los hermanos Jacques y Pierre Curie quienes observaron que los cristales de cuarzo se polarizaban cuando eran sometidos a presiones de carga, se observó que en estos elementos de cristales de cuarzo se generaban voltajes de polaridad opuesta y proporcional a la fuerza aplicada, esto implica que funciona como generadores de electricidad, (Imhoff et al 2010). Más tarde se comprobó que el efecto piezoeléctrico también muestra el efecto contrario dando como origen el efecto piezoeléctrico inverso.

#### **2.3.1.- ¿Que es un piezocristal (PZT)?**

En los años 40 y 50 se empezaron a construir las primeras cerámicas piezoeléctricas de titanio de bario y de titanio con zirconato de plomo en el instituto tecnológico de Tokio, estas cerámicas piezoeléctricas tienen la gran ventaja que su fabricación es muy económica, son muy fuertes y es químicamente inerte.

#### **2.3.2.- Aplicaciones de los PZT**

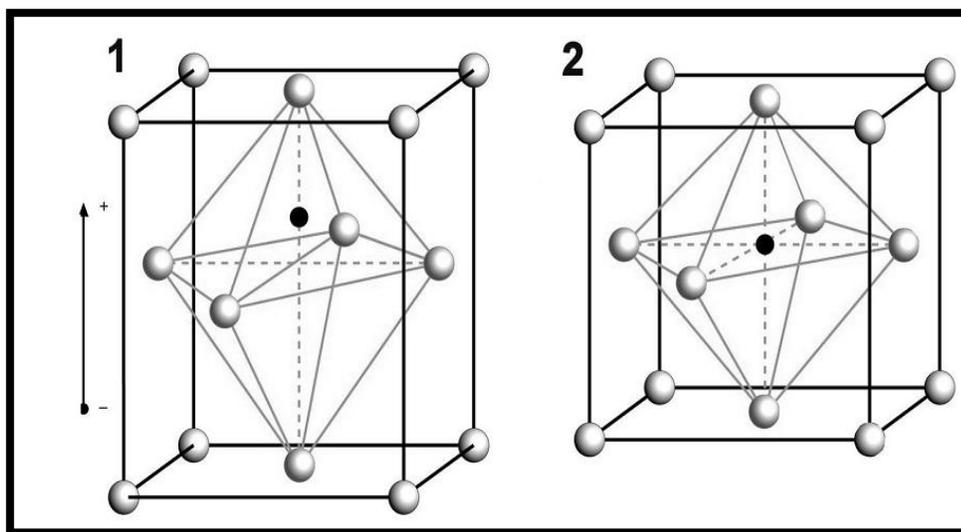
Las primeras piezas eléctricas se utilizaron en la primera guerra mundial para servir como detectores ultrasonidos (sonares), años después se utilizaron para medir presión transitoria, propagaciones de ondas ultrasónicas, para estudiar las combustiones internas de un motor, y se utilizaron para las primeras fabricaciones de micrófonos, acelerómetros, relojes internos de ordenadores entre otros. Hoy en día estos elementos se utilizan en muchos equipos como medidores de nivel, Sensores de vibraciones, máquinas de soldadura por ultrasonidos, transductores para ensayos no destructivos, motores piezoeléctricos y también se utilizan con mucha frecuencia en las tarjetas navideñas musicales.



### 2.3.3.-Funciones de un PZT

Los piezocristales al ser sometidos a cargas, los átomos ionizados se desplazan haciendo aparecer nuevas cargas en la superficie del material, en donde se suman y se produce una acumulación de la carga eléctrica, produciendo una diferencia de potencial eléctrico entre determinadas caras del cristal que puede ser muchos voltios.

Estos cristales tienen una estructura cristalina tipo perovskita, la cual es una asimetría en las cargas que le da lugar a los dipolos, el hecho de que existan dipolos, al aplicar un campo eléctrico sobre el material, la estructura cristalina sufre una deformación mecánica, expandiéndose o contrayéndose dependiendo de la temperatura que el material se encuentra, si se encuentra en la temperatura crítica, llamada temperatura de Curie, esta presenta la simetría tetragonal donde el centro de simetría de las cargas eléctricas positivas no coincide con el centro de simetría de las cargas negativas. (Alves Pereira et al, 2010). Como se observa en la figura 14.



**FIGURA 14.** Estructura perovskita de las cerámicas piezoeléctricas. (1) debajo de la temperatura de Curie, (2) por encima de la temperatura de Curie. Imagen tomada de: <http://www.atcp.com.br/ha@atcp.com.br> São Carlos – Brasil. “application note RT-ATCP-01 Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades ATPC Engenharia Física”.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

### **2.3.4- Algunas constantes piezoeléctricas importantes**

**2.3.4.1.-Impedancia acústica (Z):** Es la manera que la energía mecánica se propaga por el medio. Su unidad es MRayls ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ). Este valor es importante para el diseño de dispositivos ya que emite ultrasonido o vibraciones mecánicas.

**2.3.4.2.-Constante de carga piezoeléctrica (d):** Esta constante nos estima la proporción entre la variación dimensional del material piezoeléctrico (metros) y la fuerza aplicada del material (newton). Este valor es indispensable en el diseño de sensores de fuerza vs deformación.

**2.3.4.3.- Coeficiente de acoplamiento:** Es la eficiencia del material en la conversión de energía eléctrica a energía mecánica y viceversa. Es un valor adimensional y es indispensable en el diseño de dispositivos en que no se desea la conversión de energía cruzada.

**2.3.4.4.-Temperatura de Curie Tc:** Es la temperatura donde la estructura cristalina del material sufra transición de fase, al sobrepasar la temperatura óptima este pierde la polarización remanente inducida, tornándose inservible para ser utilizado como transductor de energía eléctrica a mecánica, es indispensables para el diseño de dispositivos que deben funcionar a altas temperaturas y potencias.

**2.3.4.5.- Constantes de frecuencia (N):** Es un factor importante que permite estimar la frecuencia de resonancia de los dispositivos piezoeléctricos, se requiere en el diseño de dispositivos que funcionan en resonancia.

## **2.4.- INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

### **2.4.1.- Osciloscopio.**

Los osciloscopios son instrumentos que pueden llegar a medir una gran cantidad de fenómenos, determinar, valores de períodos y voltajes de una señal, frecuencias, localizar averías de un circuito, determinar el valor de una presión, ritmo cardiaco entre otros.



#### 2.4.1.1.- Tipos de osciloscopio: Analógicos y digitales.

Los osciloscopios analógicos son aquellos que trabajan con la señal aplicada, una vez amplificada desvía un haz de electrones en sentido vertical proporcional a su valor, en cambio los digitales utilizan un conversor analógico-digital(a/d) para almacenar la señal y ofreciéndola en la pantalla. Hoy en día los osciloscopios analógicos quedaron atrás por la nueva tecnología y lo fácil de manejar los osciloscopios digitales, y estos brindan la oportunidad de almacenamiento de señales en una memoria como puntos de señal, estos se utilizan para reconstruir la señal en pantalla.

#### 2.4.1.2.- Términos utilizados al medir

Para medir en el osciloscopio existe el termino de onda, están ondas de sonido, oceánica, ondas cerebrales, y ondas de tensión, una onda de tensión se representa tanto en el eje horizontal como en el vertical, el cual nos proporciona la información de la señal.

Entre los tipos de ondas, encontramos senoidal, cuadradas, rectangulares, triangulares, pulso y flancos.

Las ondas más utilizadas son las ondas senoidal, ya que tienen unas propiedades matemáticas que se adaptan a cualquier forma de onda, las ondas cuadradas son aquellas que pasan de un estado a otro de tensión, se utilizan para probar amplificadores, como la radio , tv, relojes, entre otros.

#### 2.4.1.3.- Medidas en la forma de onda

- **Periodo y frecuencia:** La frecuencia que se mide en Hertz(Hz), es la cantidad de veces que la señal se repite en un segundo. Es decir  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ ciclo por segundo}$ , y el período es el tiempo que tarda la señal en completar un ciclo. Estos dos términos se relacionan entre sí.

$$F = \frac{1}{T} \quad \text{Formula 11}$$

- **Voltaje:** Es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito. El voltaje se mide pico a pico de una señal, como la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la señal.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

- **Amplitud:** Llamamos amplitud la diferencia anteriormente mencionada, del valor máximo y mínimo de una señal.
- **Fase:** Una fase es el recorrido de un punto. La fase se explica mejor en una señal senoidal ya que esta es el recorrido sobre una circunferencia en 360 grados.

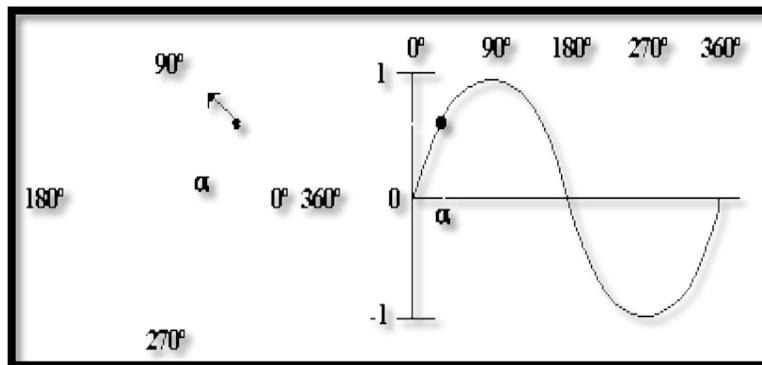


FIGURA 15. Recorrido de un punto en una señal senoidal. Imagen tomada de: <http://prof.usb.ve/mirodriguez/osciloscopio.pdf>.

En el caso de dos señales que se muestren simultáneamente, estas pueden no coincidir con el tiempo en el recorrido, se puede decir que estas señales están desfasadas.

### 2.4.2.- ¿Qué parámetros influyen en la calidad de un osciloscopio?

Los términos que se definen a continuación en esta sección nos permitirán comparar diferentes modelos de osciloscopio disponibles en el mercado.

- **Ancho de Banda:** Es el rango de frecuencia en el cual un osciloscopio puede medir con mayor precisión. Este valor se ajusta hasta que la frecuencia muestra la señal a un 70 %.
- **Tiempo de subida:** Este parámetro es muy importante si queremos medir pulsos, ya que estos generan transiciones de tensión muy rápidas, este hace que nos de la máxima frecuencia de la señal, un osciloscopio no puede visualizar pulsos con tiempo de subida más rápidos que el suyo.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

- **Sensibilidad vertical:** Este parámetro nos facilita la amplitud de las señales, y van desde 5 mV/div (llegando hasta 2 mV/div).
- **Velocidad de muestreo grande:** Para velocidades de muestreo grande este parámetro es importante para poder llegar a visualizar pequeños períodos de tiempo, en cambio en velocidades de muestreo bajos se utiliza para poder visualizar señales de variación lenta.

### 2.4.3.- Conexión del osciloscopio importante

- Poner a tierra la conexión a tierra es de suma importancia para poder realizar las medidas en el osciloscopio y poder visualizar las señales que queremos. En caso contrario podemos estar leyendo señales erradas. Ello se debe a que el aterramiento está mal concebido y se genera mucho ruido blanco.
- Se debe conectar el osciloscopio a una fuente de poder de 110 v o 220 v, para poder filtrar correctamente la energía eléctrica doméstica.
- Todas las conexiones deben estar limpias, tener aislantes del medio para evitar el White noise (ruido) que perturben la medida.
- Tener cuidado con las sondas que traen el osciloscopio, pues están trae un atenuador pasivo que minimiza la amplitud de la señal

## 2.5.- INFLUENCIA DE WHITE NOISE O RUIDO DE SONIDO

### 2.5.1.- Concepto de ruido.

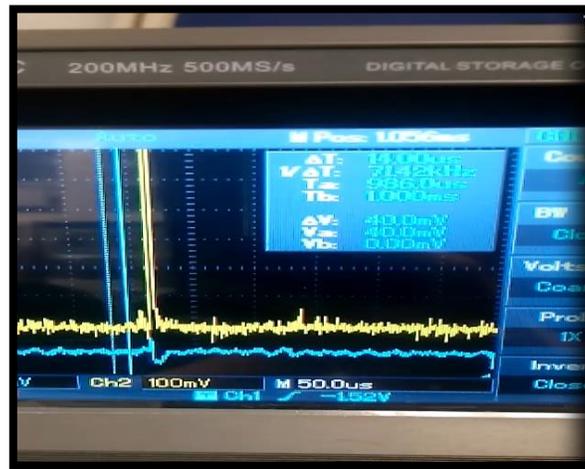
Se entiende por ruido toda aquella tensión indeseada que afecta el proceso de medida. Existen varios tipos de ruido, el más común es aquel que se produce naturalmente de los dispositivos electrónicos, y el que es causado por el hombre. El ruido puede ser minimizado a través de la fuentes con blindajes, reorientación de las conexiones o diseños de filtros denominado paso alto o paso bajo dependiendo de las frecuencia que queremos minimizar.

---



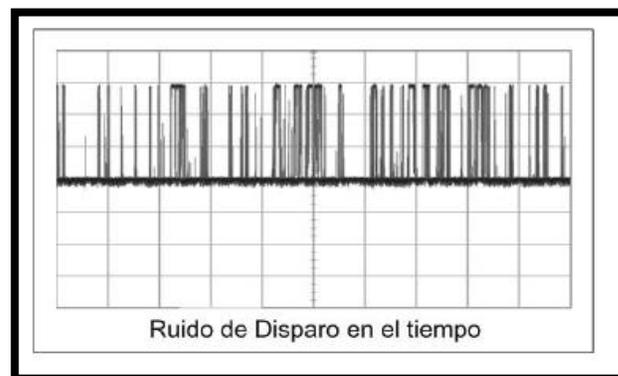
## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

El ruido blanco es de manera aleatoria y es el más inofensivo y controlable ya que se presenta de manera constante para todas las frecuencias.



**FIGURA 16.** Simulación del ruido blanco. Imagen tomada en: Laboratorio Centeno Rodríguez y asociados, osciloscopio digital UNI-T

Existe otro tipo de ruido el cual también es importante mencionar ya que este es el más nocivo, ya que se debe a un comportamiento impulsivo, este se debe a tormentas eléctricas, es decir al ruido atmosférico y en fluctuaciones aleatorias de la corriente eléctrica a través de un conductor.



**FIGURA 17.** Visualización de ruido de disparo (flicker noise) imagen tomada de: <http://mireyaisela.tripod.com/modulo1.html>.



## 2.6.- TIPOS DE ONDAS

Como definición de ondas se puede decir que “Una onda es una señal reconocible que puede ser transferida de un lugar a otro de un medio con una velocidad de propagación reconocible”. (G.B Whithman, 1999, p. 10).

Una onda es aquella que se propaga en el tiempo manteniendo ciertas características, para poder distinguirlas y clasificarlas. Las ondas sísmicas o elásticas, son aquellas perturbaciones que se propagan y generan movimientos en un medio. Estas pueden ser generadas por movimientos naturales o artificialmente como es el caso de explosiones.

En el caso de nuestra investigación tiene como objeto la determinación del módulo resiliente a través del comportamiento de las ondas sísmicas. Es por ello que haremos hincapié en las ondas sísmicas primarias y secundarias.

### 2.6.1.- ondas primarias (P)

Estas ondas son ondas longitudinales o compresionales, es decir que el suelo esta comprimido y dilatado en dirección de la propagación, estas ondas viajan a una velocidad 1.73 veces mayor que las ondas secundarias (s) y son aquellas que llegan primero a un sismógrafo.

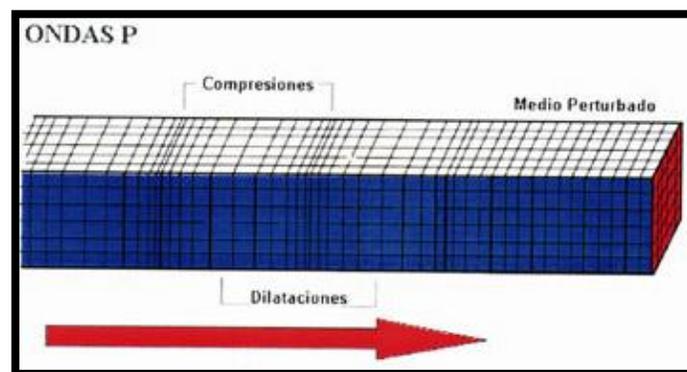


FIGURA 18. Ondas P. imagen tomada de: [www.funvisis.gob.ve](http://www.funvisis.gob.ve)



### 2.6.2. Ondas secundarias (S)

Estas ondas son ondas de corte, lo que significa que el suelo se desplaza perpendicularmente a la dirección de propagación, estas ondas solo pueden viajar en sólidos ya que en líquidos no soportan esfuerzo de corte.

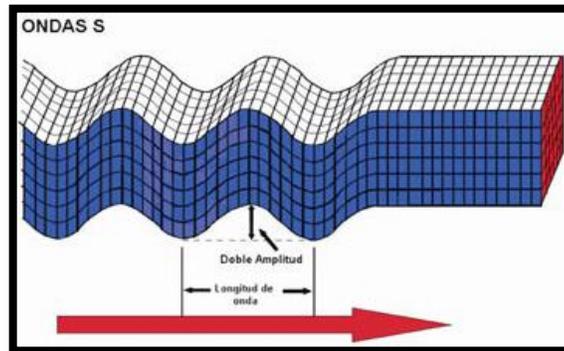


FIGURA 19. Ondas S. imagen tomada de: [www.funvisis.gob.ve](http://www.funvisis.gob.ve)

Las ondas superficiales se desplazan a menor velocidad que las ondas elásticas, pero estas son las más destructivas ya que estas provocan resonancia en edificios debido a su baja frecuencia. Existen dos tipos de ondas superficiales, las ondas rayleigh y ondas love.

Las ondas rayleigh son ondas que viajan como ondulaciones similares a la superficie del agua, en cambio las ondas love, provocan cortes horizontales en la tierra, y son muchas más lentas que las rayleigh.

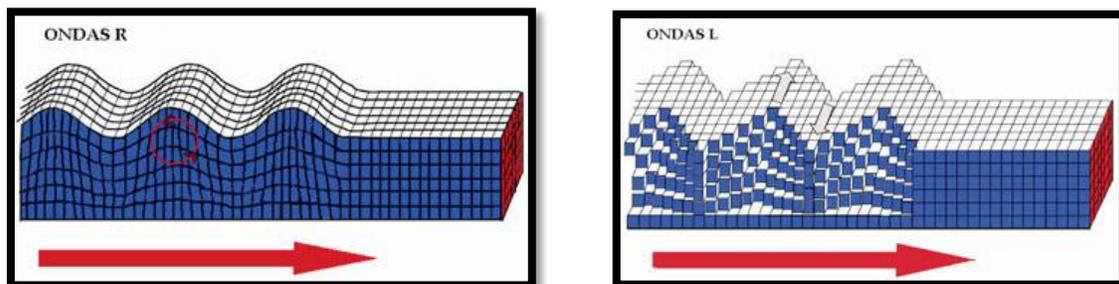


FIGURA 20. (A) Ondas Rayleigh. (B) Ondas Love. Imagen tomada de: [www.funvisis.gob.ve](http://www.funvisis.gob.ve)



## 2.7.- LEYES QUE GOBIERNAN LA TRANSMISIÓN DE ONDAS

Existen diferentes formas para poder proyectar la propagación de ondas en diferentes medios. Estos son la teoría del rayo, leyes de reflexión y refracción.

La teoría del rayo es aquel donde la velocidad se propaga por medio de rayos, se puede aplicar las mismas propiedades que a la luz solo y cuando no aparezca la difracción.

Consideramos como difracción, la interacción entre las ondas sísmicas y las anomalías que dependen del tamaño de las mismas, y de la longitud de onda de propagación. (Imhoff, 2004).

En las leyes de reflexión y refracción, las ondas sísmicas el cual es separada entre dos medios, una parte es reflejada y otra parte son refractadas. Las leyes de reflexión es aquel en donde el Ángulo de incidencia es igual al Ángulo de refracción.

Para la refracción vale la ley de SNELL el cual el Ángulo de incidencia alcanza un valor crítico y se genera una onda que se propaga con la velocidad de la onda de la segunda superficie, es decir:

$$\frac{\text{sen } \theta \text{ inc}}{\text{sen } \theta \text{ refraccion}} = \frac{v1}{v2} \quad \text{Formula 12}$$

v1: velocidad de la onda en el estrato1, v2: velocidad de la onda en el estrato 2

## 2.8.- RELACIÓN ENTRE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DE CADA MEDIO ANALIZADO

La velocidad de propagación de ondas sísmica (P) y (S) depende de los parámetros elásticos del medio en que se propaga la onda.

---



### 2.8.1.- Los parámetros que depende estas velocidades son las siguientes:

**2.8.1.1.- Coeficiente de Poisson:** Es la relación entre la deformación longitudinal y la deformación transversal del medio en el que viajan las ondas.

$$\nu = \frac{\epsilon a}{\epsilon l} = \frac{\Delta a/a}{\Delta l/l} \text{ Formula 13}$$

Este coeficiente tiene valor máximo de 0,5 cuando una tensión actúa sobre el cuerpo en una dirección y posee un volumen constante. Es decir, cuando no hay cambio volumétrico.

**2.8.1.2.- Módulo de Young E:** Es un parámetro que describe el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza, en el caso de compresiones o tracciones que originan deformaciones pequeñas, la magnitud de esta deformación es proporcional a la tensión, cuando este valor es alto la deformación es mucho más pequeña a los módulo de Young menores.

$$E = \frac{\Delta F/L}{\Delta L/L} \text{ Formula 14}$$

Donde  $\Delta f$  es la presión o fuerza por unidad de área,  $L$  = longitud original y  $\Delta L$  = cambio de longitud.

**2.8.1.3 Módulo de rigidez al cizallamiento  $\mu$ :** Es la razón del esfuerzo de cizalla a la deformación angular producida por esta y se expresa por el ángulo de deformación  $\Phi$ , este ángulo se forma por la superficie original del área y la superficie deformada debido a la fuerza que se ejerce paralelamente al área. Para los líquidos vale  $\mu = 0$ , y para los demás materiales  $\mu$  es  $E/2$ .

Las ondas sísmicas se propagan en las sustancias sólidas de tal modo, que la deformación de las partículas, que constituyen la sustancia sólida, pasa por la sustancia con una velocidad, que depende de sus propiedades elásticas y de su densidad.(Griem et al, 2004, “exploraciones mineras”.p.1).



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

Las velocidades de ondas P se pueden expresar en función de los módulos dinámicos de la siguiente manera:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad \text{Formula 15}$$

Dónde:  $k$  = compresibilidad,  $\mu$  = módulo de rigidez,  $\rho$  = densidad del medio, en que se propaga la onda p.

Las velocidades S se expresa:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{Formula 16}$$

Muchas de estas determinaciones de los parámetros dinámicos, son empíricos por la gran variación que presenta las propiedades de los suelos y medios.

### 2.8.2.- Transformada de Fourier

Es una transformación matemática reversible que transforma señales entre el tiempo y la frecuencia. La transformada de Fourier se expresa de la siguiente forma:

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx \quad \text{Formula 17}$$

Donde  $g$  se encuentra en función de  $f$  de valores complejos y definida en la recta. Las variables  $x$  y  $\xi$  están asociadas al tiempo y frecuencia respectivamente.

En ingeniería se aplica en el procesamiento de señales en electrónica, en teorías de probabilidad, estadística, y sobre todo en la propagación de ondas, la rama matemática que estudia la transformada de fourier se denomina análisis armónico. El análisis de fourier permite obtener un espectro de respuesta

---



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

de la función que representa la salida del osciloscopio, y además permite evaluar el ruido. Este espectro relaciona la frecuencia con la amplitud en forma más evidente. Tal y como se hace con los sismogramas o salidas de acelerogramas en el caso de terremotos.

No es que represente una panacea que todo lo puede resolver, pero si es una manera de simplificar el análisis inverso; es decir sacar conclusiones de la observación de una pantalla de salida de un osciloscopio digital.

### **2.9.- DETERMINACIÓN DE ONDAS**

Existen diferentes metodologías para poder determinar la salida de onda en la pantalla de un osciloscopio, entre ellas se encuentran:

- Inversión de polaridades: el cual se invierte la polaridad de emisión, se suman las señales en donde se anula las ondas s y se dejan las ondas p.
- Automático: consiste en tomar la primera llegada que supere el ruido umbral como un primer arribo, este método es riesgoso ya que se debe conocer con exactitud el patrón de emisión, y la relación que tiene la señal con el ruido, para este método se necesita un especialista.
- Correlación: se toma la señal de entrada y de salida y se re relaciona entre sí, midiendo el desplazamiento del tiempo entre las dos, este método no funciona cuando la frecuencia de ambas señales es notoria.
- Inspección visual: El intérprete debe reconocer las primeras llegadas de arribo en base a su experiencia, solo se requiere conocimiento del comportamiento de la onda, y el ruido generado, ya sea flicker o White.

En el presente trabajo de grado se utilizará el último procedimiento, debido que los anteriormente señalados necesitan de un especialista matemático para realizar evaluaciones, especialmente en el caso de la obtención de un espectro de respuesta. Afortunadamente existen programas modernos (2015) que permiten convertir salidas de osciloscopio o salidas de frecuencímetros en espectros de respuesta.

---



## 2.10.- RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN P Y MÓDULO RESILIENTE Y MÓDULO DINÁMICO

Como habíamos mencionado en las formulas anteriores (15) y (16) la relación que existe entre el modulo elástico y las velocidades de propagación P y S, estas dependen del módulo de Young, módulo de cizallamiento, el coeficiente de Poisson y el valor de k (compresibilidad).

El módulo resiliente ( $M_r$ ) está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida, es la respuesta al ensayo dinámico el cual se define como la tensión desviadora axial repetida entre la deformación unitaria axial recuperable.

$$M_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_0} \quad vs \quad M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_0} \quad \text{Formula 18}$$

## 2.11.- MODELOS CONSTITUTIVOS DEL SUELO

### 2.11.1.-Modelo elástico y lineal

Este modelo se basa en la ley de Hooke, ya que queda expuesta a dos parámetros elásticos, como lo son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, este se trata de una formulación adecuada para modelar el comportamiento de elementos estructurales y macizos rocosos, no existe límite para las tensiones, lo que da lugar a resistencia infinita, es por ello que se debe tener cuidado con los estados de tensiones generados al emplearlo.

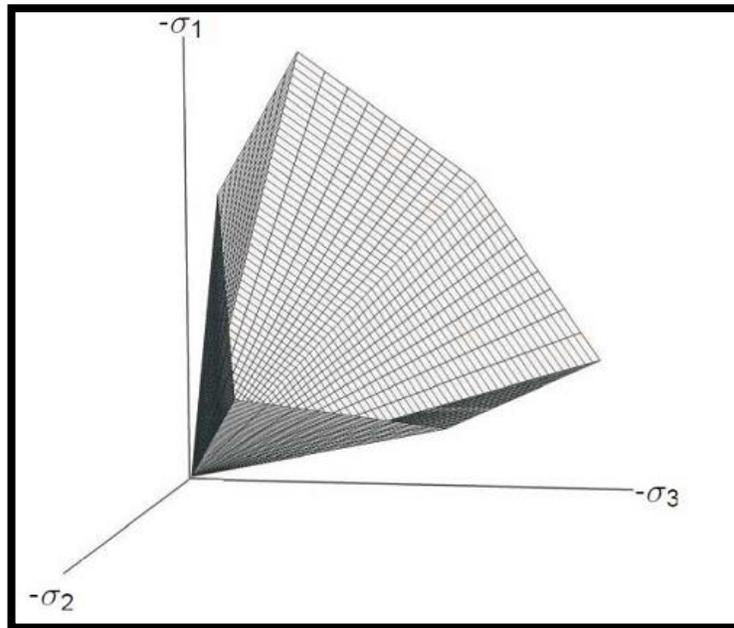
### 2.11.2.-Modelo Mohr- Coulomb

Este modelo se utiliza para medir valores estimados de deformaciones, este modelo no depende de la tensión ni de la deformación, a pesar de que permite el aumento de la rigidez, es un modelo elástico- plástico lineal, y está definida por varios parámetros elásticos, que son módulo de Young, y

---



coeficiente de Poisson, cohesión como parámetro plástico, y Angulo de dilatancia. Este modelo posee una limitación donde la rigidez no depende de la tensión.



**FIGURA 21.** Superficie de fluencia del modelo Mohr- coulomb ( $c=0$ ). Imagen tomada de: Manual PLAXIS 2D

### 2.11.3.-Modelo Hardening Soils

Es un modelo capaz de simular el comportamiento de suelos cohesivos como granulares, corresponde a una función que depende de esfuerzos considerados y de la rigidez, constituye una variante elasto-plástica del modelo hiperbólico, este modelo hace uso de la teoría de plasticidad, y de la elasticidad. Incluye parámetros como la dilatancia, y la cohesión, este modelo es mucho más preciso ya que presenta las tres rigideces ( $E_{50}$ ) rigidez de carga al 50% de la carga de rotura. ( $E_{ur}$ ) la rigidez de la descarga triaxial, y  $E_{oed}$  rigidez de la carga del edómetro. Este modelo si toma en cuenta la dependencia con la tensión del módulo de rigidez en donde esta aumenta con la presión.

---

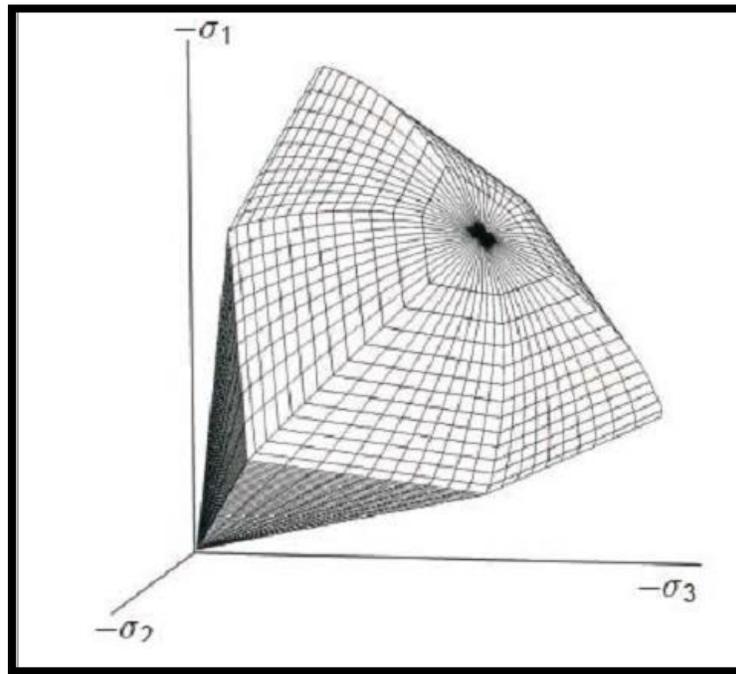


FIGURA 22. Superficie de fluencia del modelo Hardening Soils (c=0). Imagen tomada de: Manual PLAXIS 2D

## 2.12.- FUNDAMENTOS TEORICOS DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (LWD)

El deflectómetro de impacto es un equipo el cual nos permite evaluar las capas de un terreno, aplicando cargas dinámicas a través de un plato de diámetro 30 cm que genera una fuerza máxima de 7.070 kN a la capa evaluada y registrando las deformaciones a través de sensores, luego éste muestra valores del módulo resiliente tanto en capas granulares como en la subrasante de un pavimento.

El ensayo de TERRATEST 5000 BLU calcula el módulo resiliente a través de la siguiente formula:

$$Evd = 1.5 * r * \frac{\sigma_{max}}{s_{max}} \quad \text{Fórmula 19}$$

En donde:

$s_{max}$  es el promedio de las tres deformaciones producida por el plato de 30 cm;  $\sigma_{max}$  es el esfuerzo normal bajo la carga de plato el cual es 0.1 MN/m<sup>2</sup>; r es el radio del plato que es igual a 15 cm.

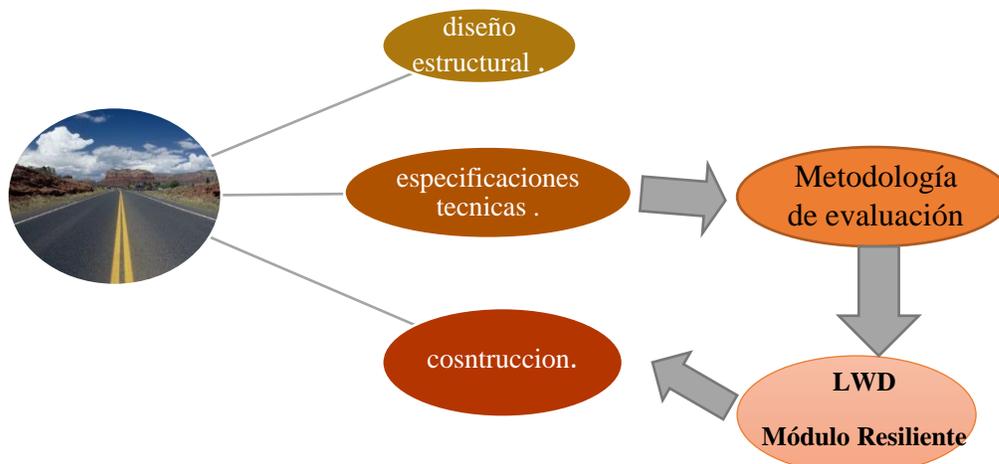


## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

El valor del módulo resiliente que se obtiene en el laboratorio depende de muchos factores, en campo este valor puede ser menor o mayor dependiendo módulo de la capa subyacente.

Este equipo ha sido validado en varios países para ser utilizado con un alto grado de confiabilidad para evaluar las estructuras de un pavimento. El módulo resiliente es un concepto experimental eminente ligado a un ensayo de laboratorio mientras que el módulo dinámico que arroja el TERRATEST (LWD) está asociado a una humedad de campo y densidad de campo que no coincide con el laboratorio.

Esta nueva metodología nos estima el módulo resiliente in situ, el cual nos genera una ventaja de establecer la configuración adecuada en la estructura de un pavimento en cada caso en particular, esto nos ayudaría a resolver la problemática entre la etapa de diseño, especificación y construcción (ver mapa #2).



**Mapa #2.** Ciclo de diseño de un pavimento. (Fuente: Elaboración propia)



## CAPITULO III

### MARCO METODOLÓGICO.

#### 3.1.- FABRICACIÓN DE SOLDADURAS DE PIEZOCRISTALES.

Para calcular la velocidad de propagación de ondas P y determinar el módulo resiliente a través del principio de la piezoelectricidad se implementa el uso de un circuito y conexiones de 3 piezocristales de 15 mm de diámetro y con una respuesta frecuencial de 2.1 kHz conectados en hilera. Se necesita de ciertos instrumentos para soldar y adherir los piezocristales a la baquelita. Los instrumentos utilizados son: soldador tipo lápiz térmico, cables simples, pasta para soldar y epoxi-cristal para adherir el piezocristal a la baquelita y protegerlos de elevadas presiones. Ver imagen 23 y 24.



FIGURA 23. Instrumentación para las soldaduras

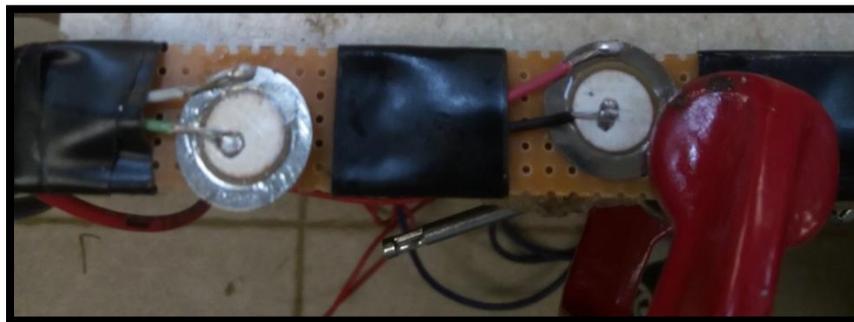


FIGURA 24. Piezocristales en hileras adheridos a la baquelita.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

A fin de evitar el contacto eléctrico con el suelo se recubrieron estos y los cables simples con una capa de barniz y un capa de aislante.

### 3.2.- EQUIPOS DE MEDICIÓN

Los equipos de medición para determinar la velocidad de propagación son:

- Osciloscopio digital UNI-T UT3202C.
- Generador de señales, en el rango de 0.1 a 2 MHz.
- Se coloca un equipo de ultrasonido, la cual tiene como función ser filtro paso alto de la señal receptora el cual ayuda a minimizar las bajas frecuencias y atenuar las altas, este equipo nos ayuda a evitar el ruido White noise y flicker noise (ruido de disparo) y el acoplamiento entre ambos piezocristales. este equipo de ultrasonido emite señales tipo pulsátil.



**FIGURA 25.** Equipos utilizados para medir la velocidad de propagación de ondas P.

Antes de empezar a medir las velocidades de propagación de ondas P en suelos, se procede a calibrar todos los equipos. Se realizan varios experimentos antes de medir las velocidades de ondas p en suelos. Entre ellos están determinar la frecuencia de resonancia de los piezocristales, velocidad de propagación en el agua, se someten los PZT a presiones efectivas y por ultimo determinar las velocidades de propagación en arenas limosas con el principio de la piezoelectricidad.

---



### 3.3.- EXPERIMENTOS REALIZADOS

#### 3.3.1.- Experimento 1: Determinación de respuesta frecuencial

Consiste en estudiar el conjunto de los PZT (emisor y receptor) la respuesta frecuencial en donde el cristal empieza a resonar desde 900 Hz a 2.5 kHz. Cuando se aumenta la frecuencia a más de 3 kHz este deja de hacer resonancia. Este experimento es de suma importancia y se debe realizar antes de empezar a determinar la velocidad de propagación P en los suelos, ya que determina si los piezocristales responden perfectamente y nos ayuda a verificar su funcionamiento y que no haya despolarización.



FIGURA 26. Generador de señales, valor máximo de resonancia.



FIGURA 27. Determinación de respuesta frecuencial.



### 3.3.2.-Experimento 2: Velocidad de propagación en el agua.

Este experimento consiste en sumergir los PZT en agua en forma paralela a una distancia de 150 mm. para permitir el desplazamiento axial de uno de ellos (receptor). Se debe tomar en cuenta las conexiones ya que estas deben estar limpias y con su respectivo aislante, esto nos ayuda a disminuir y minimizar los ruidos que se generan debido al medio ambiente.

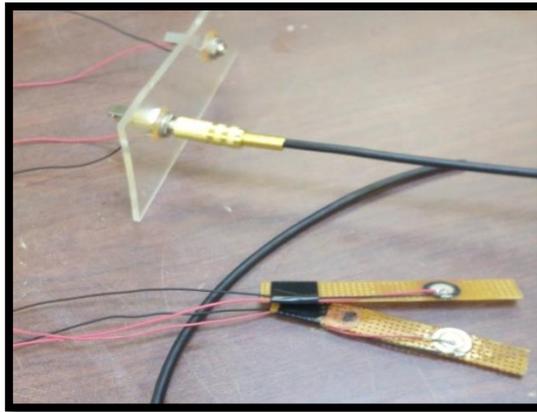


FIGURA 28. Fabricación de baquelitas.

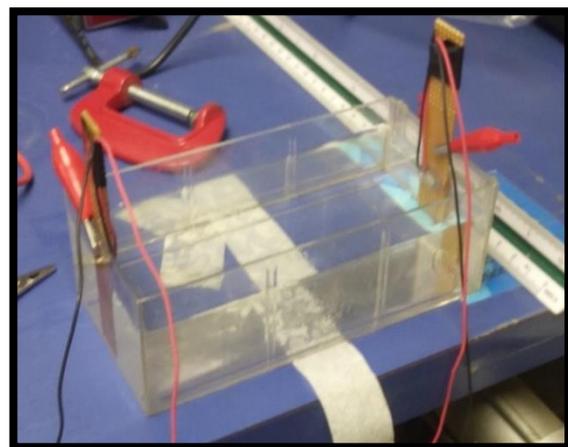
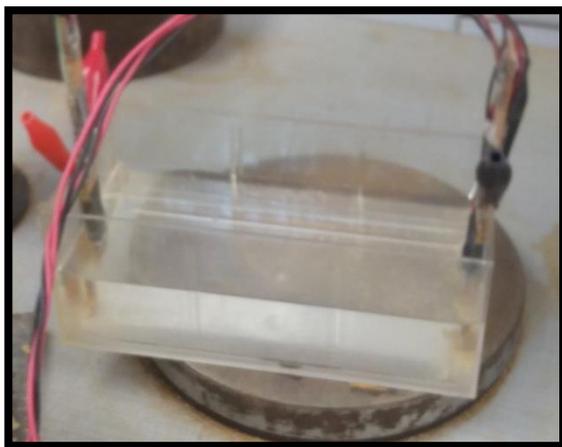


FIGURA 29. Colocación de dos PZT en paralelo en agua.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

Se procede a determinar la velocidad de propagación de ondas P en el agua, en donde el osciloscopio nos arrojó un valor de  $\Delta T = 104 \mu s$  (figura 30).

En la figura 31 se observa las señales emisoras de color amarillo de forma cuadrática, se produce dos señales una generada por el generador de señales y otra de la misma naturaleza generada por el equipo de ultrasonido esta es pulsátil, la señal color azul que se muestra en la misma figura es la señal receptora en donde muestra los picos altos y bajos de la respuesta del piezocristal.

La interpretación de estas señales se basó en la inspección visual en donde se solapan ambas señales y se toma en cuenta los picos altos y bajos de la señal receptora en el eje horizontal (tiempo).

La velocidad de propagación queda definida a través de la siguiente ecuación:

$$V = \frac{D}{t} \text{ Formula 20}$$

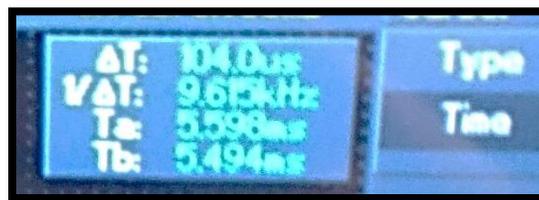


FIGURA 30. Cuadro resumen del tiempo en que el PZT recibe respuesta



FIGURA 31. Visualización de las señales emisor receptor en el osciloscopio.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

En la figura 32 se muestra la determinación de Velocidad de Propagación medida en el agua a partir del principio de piezoelectricidad.

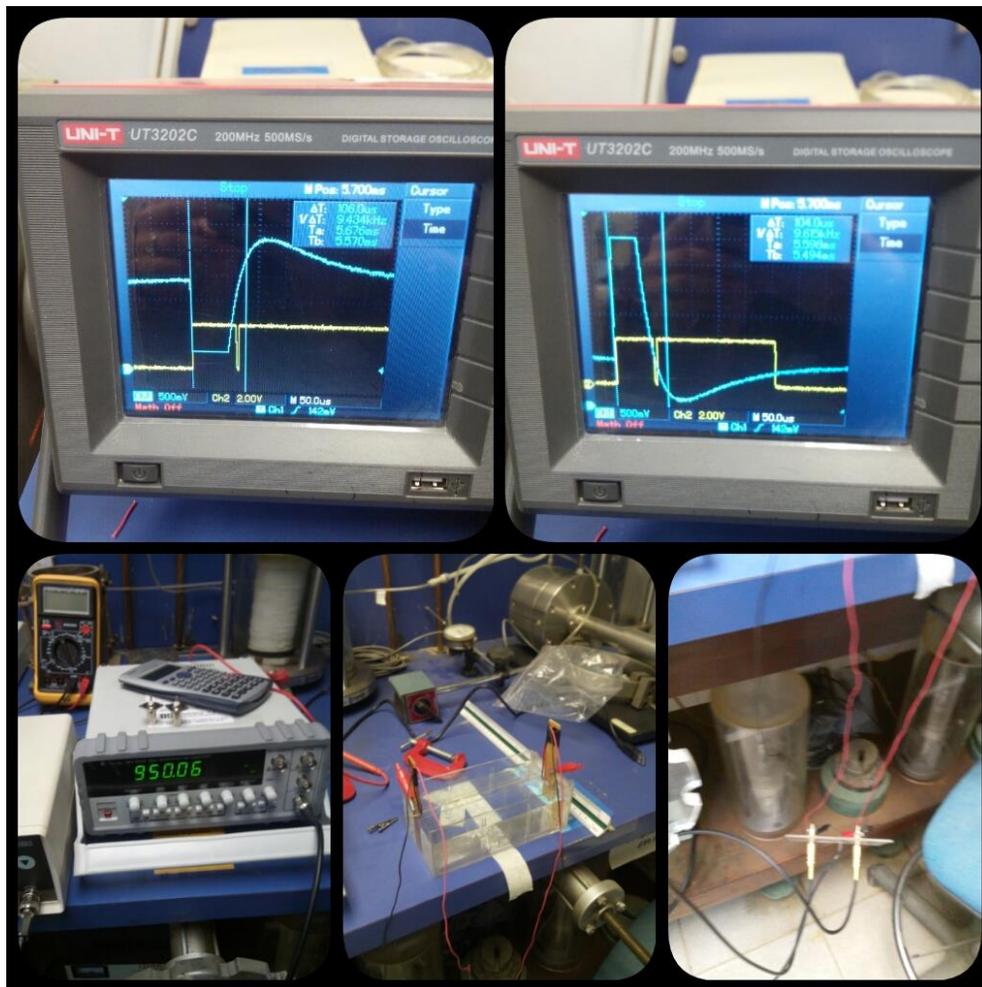


FIGURA 32. Experimento 2: velocidad de propagación en el agua.



### 3.3.3.- Experimento 3: Determinación de la frecuencia de resonancia a diferentes presiones de carga.

En este experimento se observó que a diferentes cargas que se le aplicaba desde 0 hasta 580 KPa (1078 kg) a la masa de suelo en el cilindro se iba registrando un aumento en la amplitud de la onda recibida desde 580 mv a 1.38 v, luego sin carga se volvió a registrar la amplitud para conocer el comportamiento una vez que se le aplica la carga total.

Como se puede observar en la figura 33 un incremento de amplitud al ejercer presión.



FIGURA 33. Visualización de aumento de amplitud con diferentes cargas.

No cabe duda que este fenómeno antes descrito se debe al cambio de la estructura intergranular cuando existe un aumento de compactación en la muestra estudiada el cual disminuye el volumen de vacíos y existe un mejor acoplamiento entre los PZT y el suelo. La frecuencia de resonancia incrementa a medida que aumenta las presiones de confinamiento en intervalos, cuando se le quita la



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

carga aplicada este disminuye notoriamente y de manera abrupta, esto se debe a las fracturas parciales de los granos, la reacomodación en el interior de la probeta en donde aumenta el volumen de vacíos.

### 3.3.4.- Experimento 4: Determinación de velocidad de propagación de ondas p en suelos.

Para la determinación de la velocidad de propagación de ondas p, se debe compactar el suelo en un cilindro con volumen conocido (ensayo de Proctor modificado), variando la humedad del material.

Se procede a abrir dos agujeros a una distancia de 10 cm. Esto es muy importante ya que si al colocar los PZT a una distancia inferior a la mínima, la señal puede alterar la propagación de la onda debido al efecto Rayo, es por ello que tomamos 10 cm, como una distancia estándar, en donde la señal no será distorsionada.

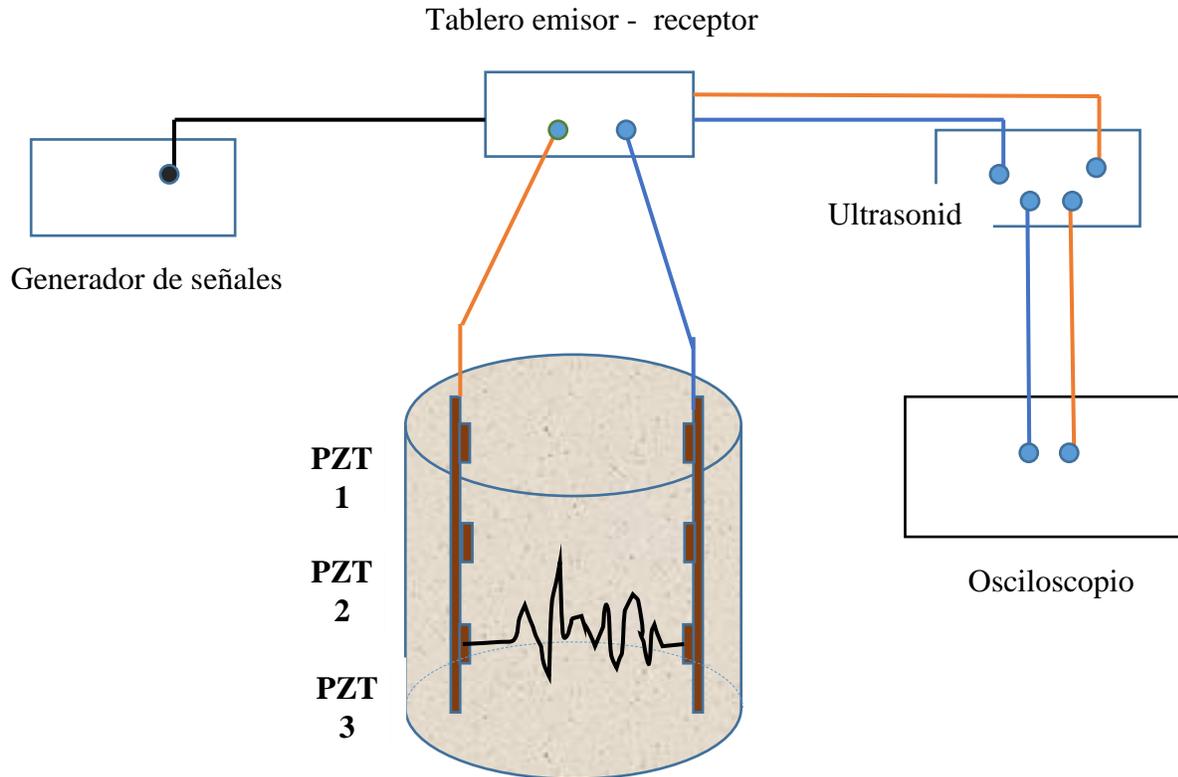


**FIGURA 34.** Experimento 4: determinación de velocidad de propagación de ondas p en suelos.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

En la figura 35, representa el montaje de la instrumentación electrónica.



**FIGURA 35.** Representación del montaje de instrumentos para la determinación de velocidad de ondas p en suelos.

Luego de iniciar con el montaje de la instrumentación, Se conectan los PZT 1 (E-R), el generador de señales se conecta a tierra al emisor y a tierra al receptor en el tablero fabricado en C-R & A y de allí los emisores y receptores se conectan al ultrasonido y luego éste se conecta con el osciloscopio en donde se visualiza el comportamiento de las señales.

Hay que tener en cuenta que el generador de señales como el ultrasonido generan señales y hay que tener cuidado a la hora de relacionar la señal recibida con la emitida de ambos equipos. Para evitar valores errados al medir el tiempo.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

Se va variando la frecuencia resonante desde 100 kHz a 1 MHz para ver si existe algun comportamiento en los piezocristales.

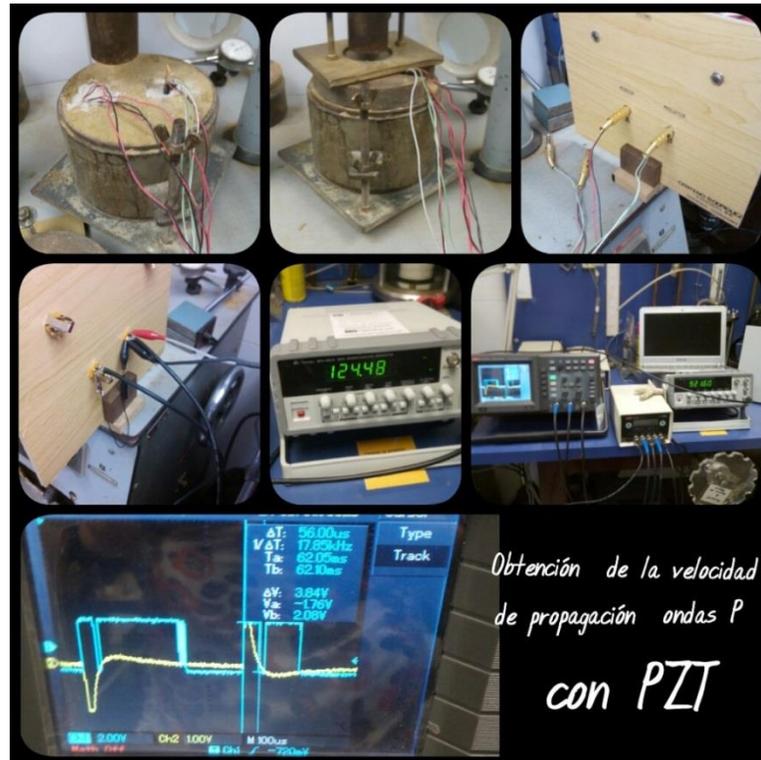


FIGURA 36. Obtención de la velocidad de propagación ondas P con PZT

### 3.3.5.- Experimento 5: Determinación de velocidad de propagación en suelos con equipo ultrasonido.

En este ensayo se procedió a compactar muestras en cilindro de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura a humedad óptima y densidad máxima seca, una vez compactada se le aplicó un capping de yeso en ambas caras para poder tomar mediciones con los transductores de 54 kHz. Y el equipo de ultrasonido marca Controls. (Ver figura 37).



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.



FIGURA 37. Medición de velocidad de propagación con equipo de ultrasonido

### 3.4.- ENSAYOS DE LABORATORIO Y SIMULACIÓN PLAXIS 2D

Para determinar el módulo resiliente se hizo énfasis a varios ensayos de laboratorio con el objetivo de comparar los resultados de estos ensayos con el ensayo de determinación de velocidad de propagación con el principio de piezoelectricidad, los ensayos que se realizaron son:

CBR de 3 puntos y de 15 puntos, ensayo de compresión no confinada al 1% de deformación, ensayo de TERRATEST y prueba de plato, estos dos últimos ensayos se realizaron en campo en el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar Umbral 28.

#### 3.4.1.- Simulación PLAXIS 2D Axisimetrica del Ensayo triaxial Dinámico

Se logró hacer la simulación del ensayo triaxial U.U dinámico empleando para ello, el software desarrollado por PLAXIS en su versión 2D, utilizando la axisimetria por el eje vertical que pasa por el centro del cilindro y modelando el suelo como Hardening Soils (endurecimiento de suelo) con el fin de



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

obtener una malla bidimensional de elementos finitos con la cual se logró obtener la deformación unitaria elástica de rebote tal y como se establece en la Norma del ensayo AASHTO T274 -82.

Esta simulación en PLAXIS 2D consta de 4 etapas, una etapa inicial en la cual se aplica la presión hidrostática (all around pressure) con agua, con lo cual se logra la aplicación de esfuerzo de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  idénticos, tal y como lo indica la norma anteriormente indicada.

Como segunda etapa, se mantiene el esfuerzo hidrostático en 2 psi (14 KPa) y se hace variar el esfuerzo desviador a 3 psi (21 KPa), para lo cual el esfuerzo  $\sigma_1$  debe alcanzar 5 psi (35 KPa). En esta etapa se aplican 200 repeticiones sinusoidales al esfuerzo  $\sigma_1$  al término de las cuales se pasa a la siguiente etapa.

Como tercera etapa se aplica un esfuerzo desviador de 6 psi (42 kPa) para lo cual el esfuerzo  $\sigma_1$  debe alcanzar 8 psi (56 KPa). En esta etapa se vuelve aplicar 200 repeticiones sinusoidales al esfuerzo  $\sigma_1$  al término de las cuales se pasa a la siguiente etapa.

Como cuarta etapa se aplica un esfuerzo desviador de 9 psi (63 KPa) para lo cual el esfuerzo  $\sigma_1$  debe alcanzar 11 psi (77 KPa). En esta cuarta y última etapa de carga se vuelven aplicar 200 repeticiones sinusoidales al esfuerzo  $\sigma_1$  al término de las cuales se pasa a la etapa de descarga exigida en la norma.

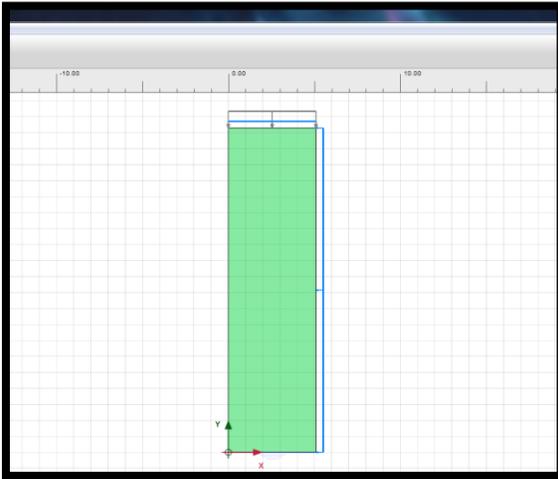
En la etapa de descarga (quinta etapa) se disminuye el esfuerzo principal vertical a 6 psi (42 KPa) y se mide en los dos puntos de integración ubicada en el tercio central del espécimen simulado para obtener la deformación resiliente (elástica).

Finalmente se obtiene el módulo resiliente dividiendo el valor del esfuerzo desviador de 6 psi (42Kpa) entre el valor de la deformación resiliente medido en la malla que representa el espécimen deformado simulado.

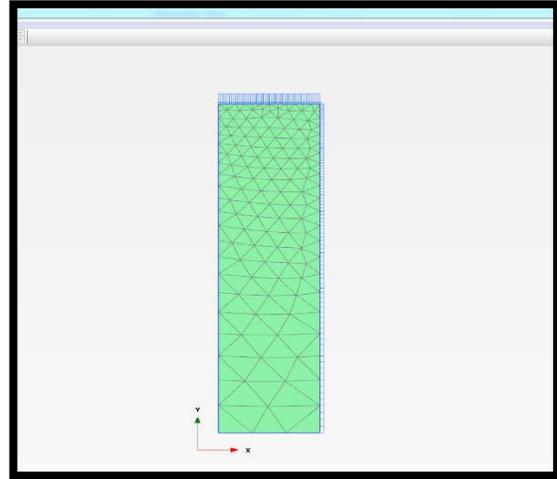


## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

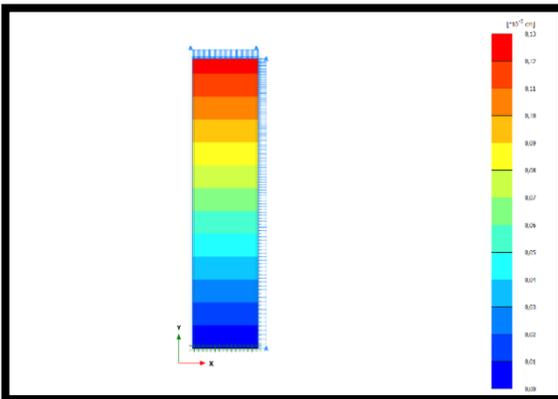
En las figuras siguientes se observa paso a paso la simulación del ensayo triaxial U.U. Fuente: la autor



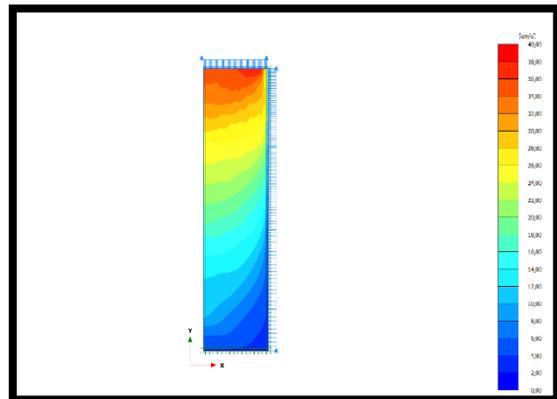
**FIGURA 38.** Etapa Inicial.



**FIGURA 39.** Etapa inicial, construcción de mallado



**FIGURA 40.** Segunda etapa.



**FIGURA 41.** Tercera etapa.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

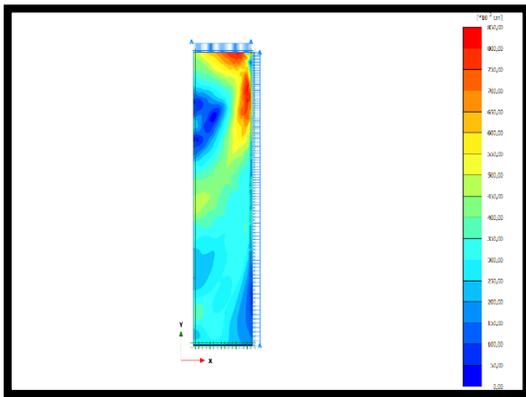


FIGURA 42. Cuarta etapa

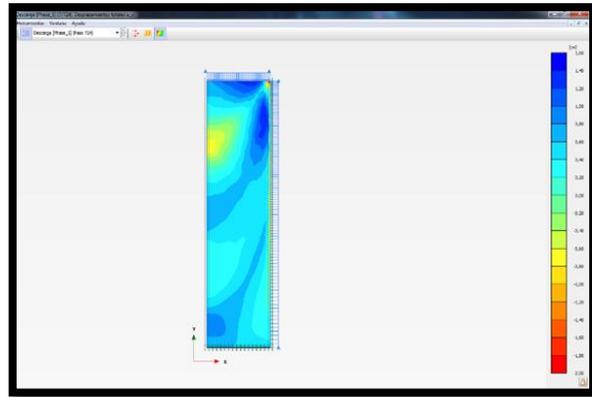


FIGURA 43. Etapa de descarga

### 3.4.2.- Ensayo de compresión no confinada para estimar el módulo resiliente al 1% de su deformación.

Se realizan ensayos de compresión no confinada en muestras no saturado de suelo compactado a humedad óptima para lo cual las muestras se colocan en recipientes herméticos para garantizar una humedad homogénea cuyo valor de succión matriz este comprendido entre valores  $pF$  de 2.98 a 3.02, correspondiente a la referida humedad y se deja en reposo durante 48 horas.

Al cabo de las 48 horas se procede a realizar el ensayo de compresión no confinada usando una rata de deformación de 0,025 mm/segundo y se va midiendo la deformación unitaria axial hasta ligeramente sobrepasar el 1% de la misma.

Una vez alcanzada la deformación del 1% estimada por interpolación en la gráfica esfuerzo vs deformación se determina el esfuerzo vertical que causa dicha deformación del 1% y al valor obtenido se introduce en la formula obtenida por Woojin Lee (1997) para determinar el módulo resiliente.

$$Mr = 695.4(s_{u\ 1.0\%}) - 5.93 (s_{u\ 1.0\%})^2 \quad \text{Formula 21}$$

Es de hacer notar que la forma obtenida por Woojin Lee muestra un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.97 equivalente a un coeficiente de correlación de 0.984, lo cual no quiere decir que la



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

estimación llegue a ser vecina a la perfección por cuanto al analizar detenidamente la figura 44 se observa que para el valor de 25 psi para el 1% de deformación unitaria, los suelos A-6 y A-7-6 pueden reportar un módulo resiliente que varía entre 10000 psi a 20000 psi con un valor promedio de 13500 psi, es decir que se cometería un error 6500 psi (45.5 Mpa) aproximadamente.

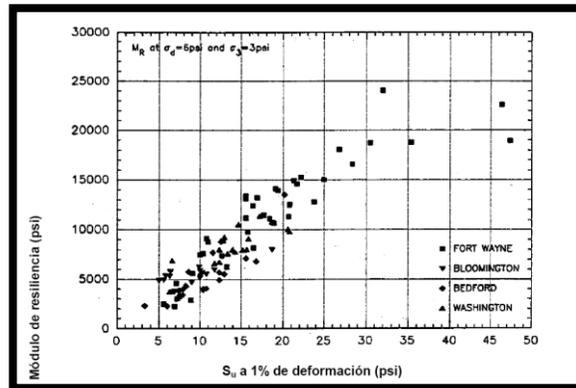


FIGURA 44. Relación entre  $M_r$  Y  $S_{u1,0\%}$ . Imagen tomada de: Journal of geotechnical and geonvironmental engineering (1997)



FIGURA 45. Ensayo de compresión no confinada. Tomada en laboratorio de suelos Centeno-Rodríguez y asociados



### **3.4.3.- Realización del ensayo TERRATEST 5000 BLU**

Se realizaron pruebas de terratest en los suelos que constituyen la subrasante de la estructura del pavimento del umbral 26 del Aeropuerto Internacional Simón Bolívar de Maiquetía.

Como se explicó en el marco teórico el ensayo TERRATEST 5000 BLU consiste en la aplicación de impactos repetitivos sobre un plato de 30 cm de diámetro empleando para tal fin un mazo de 10 kg para suelos finos y 15 kg para suelos granulares, este ensayo es de muy sencilla y rápida ejecución. Consiste en situar el plato antes citado en la zona donde se va a determinar al módulo resiliente del suelo o agregado de la estructura del pavimento, y dejar caer seis (6) veces el citado mazo, Las tres (3) primeras de ellas para garantizar el buen y homogéneo apoyo del plato en la superficie del suelo y las tres 3 finales para obtener tres (3) valores de deformación consecutivas con el fin de utilizarlas para calcular el modulo dinámico del suelo, cuyo valor va a ser muy similar al del módulo resiliente ( $M_r$ ) del suelo “in situ”, por cuanto se trata de deformaciones elásticas de rebote, tal y como se establece en la denominación de dicho módulo, haciendo notar que el valor que se obtiene en el campo puede diferir ligeramente del que se obtiene en el laboratorio como consecuencia de la diferencia entre los métodos de compactación empleados en ambos casos.

Este equipo está provisto de una computadora digital, como parte integral del mismo, la cual muestra los valores de deformación elástica del medio, la velocidad de caída del mazo y el tiempo en el que se produce la deformación, generando una salida impresa en papel térmico en forma inmediata de los citados valores y del cálculo del valor del módulo expresado en mega pascales (Mpa).

El equipo cuenta con acceso a bluetooth para la transmisión de la data obtenida en el campo en tiempo real al teléfono celular y de allí de allí comunicarla vía internet a cualquier oficina del ente ejecutor de la obra o de sus ingenieros consultores ubicada a larga distancia, evitando retardos para la toma de decisiones.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.



FIGURA 46. Equipo de Terratest

### 3.4.4.- Ensayo de prueba de placa de carga estática no repetitiva para la determinación del módulo de reacción de la subrasante (k)

#### 3.4.4.1.-Procedimiento del ensayo

Este ensayo se realizó en la pista principal, Umbral 28 del Aeropuerto Internacional Simón Bolívar, se procede hacer excavaciones de 20 cm. de profundidad con el objeto de asegurar el asentamiento del plato en el sitio, se utilizan unos juegos de placa de acero de diferentes diámetros que oscilan entre 15 cm. a 76 cm. que están confeccionadas de manera que pueda ser colocada de forma piramidal para asegurar su rigidez, es muy importante destacar el diámetro mayor de la primera placa de carga a la hora de ensayar el suelo debido que para grandes cargas como el estudio del diseño de pavimentos para un aeropuerto se debe usar el diámetro de 76 cm. (ver figura 47.)



**FIGURA 47.** Platos de acero que oscilan entre 76 cm a 15 cm. imagen tomada en AISB

En la figura 48 se observa todos los equipos que se utilizaran para determinar el módulo de balasto o reacción (k) en la subrasante de un aeropuerto.

Entre ellos tenemos:

- Elementos de reacción: un camión para poder aplicar la carga al suelo.
  - Conjunto hidráulico de carga capaz de permitir la máxima carga.
  - Celda con precisión de 5 kN que registrara la magnitud de la carga aplicada al suelo.
  - 3 diales capaces de registrar las deflexiones acumuladas con una precisión de 0,025 mm, cuyos vástagos se apoyen sin movimiento lateral en el plato inferior formando un triángulo equilátero.
  - Sistema de vigas porta diales, en el cual se fijan firmemente los tres diales de deformacion, empleando tyraps plásticos para tal fin.
-



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

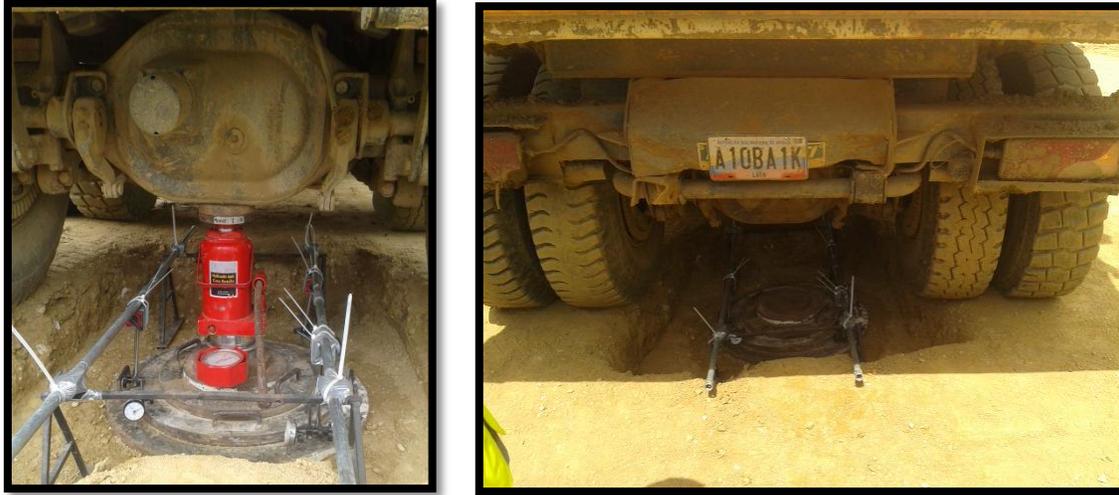


FIGURA 48. Equipos a utilizar para el ensayo de prueba de carga aplicada.

#### 3.4.4.2.-Procedimiento de asentamiento del plato en la superficie del suelo.

Para asentar el equipo en la excavación, según ASSHTO T 222-81 se dispone de dos procedimientos, en el caso que nos compete se utilizó el procedimiento 2 de dicha norma.

Se debe asentar los platos con una rápida aplicación de carga y descarga hasta que se produzca una deflexión comprendida entre 0,25 cm (2,5 mm) a 0,50 cm (5 mm).

Al obtener los valores antes indicados se realiza una descarga completa y se vuelve a reasentar las placas con la mitad de la deflexión que se produjo anteriormente, y de inmediato se procede a colocar los diales de deformación en la posición cero.

Se aplica dos incrementos sucesivos de carga de 16 kN (35 kPa) y se mantiene cada uno de ellos hasta que la deformación final producida en cada uno de ellos sea inferior a 0,025 mm/min. Se registran los valores de los diales al final de cada incremento, al completar los 70 KPa y se determina la deflexión promedio obtenida con los valores registrados por los tres diales. Con la finalidad de obtener el valor bruto del Módulo de Balasto  $k$ , se divide 70 KPa entre la deflexión promedio total expresada en mm.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

Si el valor de  $(k)$  resulta menor a 56 KPa/mm el ensayo está terminado y se puede retirar el equipo de carga, por contrario si  $k_u$  es mayor o igual a 56 KPa/mm se debe aplicar incrementos de cargas de 35 KPa hasta alcanzar 210 KPa tomando en cuenta la restricción del inicio.

Se realizó en Microsoft Excel una planilla el cual se utilizó en campo, donde se iba registrando las deformaciones y se calculaba el valor de  $(k)$  sin corrección.

Luego se procede a realizar la corrección del valor  $K$ , por efecto de posible saturación del suelo y por efecto de la rigidez del plato, para lo cual se emplea la metodología recomendada por la AASHTO T222-78



**FIGURA 49.** Determinación del módulo de reacción en campo.



## CAPITULO IV

### Resultados y Análisis de los mismos

Para la determinación de velocidades de propagación ondas P y determinación del Mr. Se hicieron ensayos en tres tipos de suelo a humedad óptima y densidad máxima seca.

#### 4.1.-ESTUDIO DE SUELOS.

**Tabla 1:** Estudio de Suelo # 1

Proveniencia: Calicata excavada en el Aeropuerto internacional simón Bolívar, Plataforma remota.	
Color	Amarillo
Gravedad específica	2.78
Humedad óptima	8.6%
Densidad máxima seca	2145 kg/m <sup>3</sup>
Límite de Atterberg	LL= 22
	LP= 15.3%
	IP= 6.7%
Clasificación según H.R.B	HRB: SUELO A-2-4(0)
	S.U.C.S: SM- SC
	Arena limosa de baja plasticidad

Se realizaron ensayos de laboratorio para el estudio de este suelo. En anexo se puede apreciar detalladamente los valores obtenidos para cada ensayo de laboratorio.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

**Tabla 2:** Estudio del Suelo # 2

Proveniencia: Calicata excavada ene el Aeropuerto internacional simón Bolívar, umbral 28	
Color	Amarillo
Gravedad especifica	2.73
Humedad optima	8.4%
Densidad máxima seca	2172 kg/m <sup>3</sup>
Límite de Atterberg	LL= 26.3%
	LP= 18.8%
	IP= 7.5%
Clasificación según H.R.B , S.U.C.S	HRB: SUELO A-4(0)
	S.U.C.S: SM- SC
	(CL-ML)
	Arena limosa de baja plasticidad

**Tabla 3:** Estudio del suelo # 3

Proveniencia: Préstamo Canes (Fuerzas Armadas)	
Color	rojizo
Gravedad especifica	2.86
Humedad optima	9.1%
Densidad máxima seca	2165 kg/m <sup>3</sup>
Límite de Atterberg	LL= 29.4%
	LP= 18.2%
	IP= 11.2%
Clasificación según H.R.B , S.U.C.S	HRB: SUELO A-6(2)
	S.U.C.S: SC
	(CL)
	Arena arcillosa de mediana plasticidad con permeabilidad baja a nula.



## 4.2.- RESULTADOS OBTENIDOS DEL OSCILOSCOPIO UNI-T UT32002C

### 4.2.1.- Experimento 1: Determinación de respuesta Frecuencial para los piezocristales.

**Tabla 4:** Respuesta frecuencial calculada en los tres tipos de suelo.

Frecuencia de resonancia (fabrica)	Frecuencia de resonancia calculada
2.5 kHz	2.20 kHz

Estas frecuencias de resonancia se determinan escuchando con sumo cuidado y empleando un amplificador de sonido cuando los piezocristales se encuentran colocados en la baquelita y están rodeados de arena fina en las cavidades perforadas en la briqueta de ensayo. Su determinación es muy importante a los fines de la comparación con el valor reportado por la fábrica, al cual debe acercarse el valor obtenido en la briqueta.

### 4.2.2.-Experimento 2: Velocidad de Propagación en el agua.

Se realizaron 5 ensayos para calcular la propagación de ondas P. el primero de ellos consistió en medir con el ultrasonido, empleando los transductores de alta frecuencia resonante, la velocidad de la onda P se midió en el agua dentro de un recipiente transparente rectangular de plástico de 100 mm de largo. El valor obtenido para el tiempo de recorrido de la mencionada onda fue  $69.3 \mu\text{s}$ , originando una Velocidad de propagación ( $V_p$ ) de 1443 m/s. Este valor resultó muy preciso, si se compara con el valor reportado en la literatura técnica existente.

En el caso de los siguientes cuatro ensayos, realizados en un recipiente rectangular de 150 mm de largo, lleno de agua, se colocaron los piezocristales previamente impermeabilizados y aislados unos de otros, a una distancia de 150 mm. El tiempo transcurrido para cada uno de los 4 ensayos es el que se reporta en la tabla 5:

---



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

**Tabla 5:** Velocidad de propagación determinada en el agua.

Ensayo 1: $V_p$ con ultrasonido	
Tiempo recorrido	$t = 69.3 \text{ m/s}$
Velocidad de propagacion	$V_p = 1443 \text{ m/s}$
Ensayo 2: $V_p$ con osciloscopio y PZT	
Tiempo recorrido	$t = 103.9 \text{ } \mu\text{s}$
Velocidad de propagacion	$V_p = 1443 \text{ m/s}$
Ensayo 3: $V_p$ con osciloscopio y PZT	
Tiempo recorrido	$t = 103.9 \text{ } \mu\text{s}$
Velocidad de propagacion	$V_p = 1443.69 \text{ m/s}$
Ensayo 4: $V_p$ con osciloscopio y PZT	
Tiempo recorrido	$t = 104 \text{ } \mu\text{s}$
Velocidad de propagacion	$V_p = 1442.30 \text{ m/s}$
Ensayo 5: $V_p$ con osciloscopio y PZT	
Tiempo recorrido	$t = 104.1 \text{ } \mu\text{s}$
Velocidad de propagacion	$V_p = 1441 \text{ m/s}$

Como se puede apreciar, los valores obtenidos para la velocidad de la onda P resultaron muy precisos y coincidentes con el que reporta la literatura técnica de calidad inobjetable.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

#### 4.2.3.- Experimento 4: Determinación de velocidad de propagación de ondas p en suelos.

##### 4.2.3.1.- Muestra de suelo # 1 (A-2-4) compactada con humedad óptima y densidad máxima seca:

Tabla 6: Velocidad de propagación en suelo # 1 a humedad óptima y densidad máxima seca.

Numero de PZT	Tiempo recorrido	Tiempo promedio	Velocidad de propagación
PZT 1	NO HUBO MEDICIONES		
PZT 2	t= 46.4 $\mu$ s	45.82 $\mu$ s	2182 m/s
	t = 46.2 $\mu$ s		
	t= 44 $\mu$ s		
	t = 46.5 $\mu$ s		
	t= 46 $\mu$ s		
PZT 3	t= 40.66 $\mu$ s	40.1 $\mu$ s	2497 m/s
	t= 40.60 $\mu$ s		
	t= 40 $\mu$ s		
	t = 39 $\mu$ s		
	t= 39.95 $\mu$ s		



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

#### 4.2.3.2.- Muestra de Suelo # 2 (A-4) compactada a humedad óptima y densidad máxima

seca:

**Tabla 7:** Velocidad de propagación en suelo # 3 a humedad óptima y densidad máxima seca

Numero de PZT	Tiempo recorrido	Tiempo promedio	Velocidad de propagación
PZT 1	t= 76.0 $\mu$ s	76.1 $\mu$ s	1315 m/s
	t = 76.0 $\mu$ s		
	t= 76.2 $\mu$ s		
	t = 76.2 $\mu$ s		
	t= 76.4 $\mu$ s		
PZT 2	t= 56 $\mu$ s	56.25 $\mu$ s	1778 m/s
	t = 56.3 $\mu$ s		
	t= 56.3 $\mu$ s		
	t = 56.8 $\mu$ s *		
	t= 56.4 $\mu$ s		
PZT 3	t= 54.8 $\mu$ s	54.58 $\mu$ s	1832 m/s
	t = 54.6.3 $\mu$ s		
	t= 54.5 $\mu$ s		
	t = 54.5 $\mu$ s		
	t= 54.5 $\mu$ s		

(\*) Valor descartado debido a un valor muy alto y efectos de ruido.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

**4.2.3.3.- Muestra de suelo # 2 (A-4) compactada a humedad óptima y dejando sin protección contra pérdida de humedad durante 3 días.**

**Tabla 8:** Velocidad de propagación en suelo # 2 en la rama seca.

Numero de PZT	Tiempo recorrido	Tiempo promedio	Velocidad de propagación
PZT 1	NO HUBO MEDICIONES		
PZT 2	t= 36.2 $\mu$ s	35.88 $\mu$ s	2787 m/s
	t = 35.8 $\mu$ s		
	t= 35.6 $\mu$ s		
	t = 35.8 $\mu$ s		
	t= 36 $\mu$ s		
PZT 3	t= 32 $\mu$ s	32.25 $\mu$ s	3100 m/s
	t= 32.33 $\mu$ s		
	t= 32.40 $\mu$ s		
	t = 32.30 $\mu$ s		
	t= 34 $\mu$ s *		



**4.2.3.4.- Muestra de Suelo # 3 (A-6) compactada a humedad óptima y densidad máxima seca:**

No se pudieron tomar valores debido a que las arcillas presentan un conjunto de propiedades plásticas y cohesivas con cargas eléctricas en forma no uniforme, el cual le da una respuesta conductiva pero a humedad óptima este presenta mayor superficie de vacíos el cual el PZT presenta problemas de acoplamiento y no genera señales factibles .

**4.2.3.5.- Suelo # 3 (A-6) compactada a humedad óptima y dejando sin protección contra pérdida de humedad durante 3 días**

**Tabla 9:** Velocidad de propagación en suelo # 3 a humedad óptima y densidad máxima seca

Numero de PZT	Tiempo recorrido	Tiempo promedio	Velocidad de propagación
PZT 1	NO HUBO MEDICIONES		
PZT 2	t= 29.32 $\mu$ s	30.36 $\mu$ s	3293 m/s
	t= 31.10 $\mu$ s		
	t= 29.32 $\mu$ s		
	t = 31.10 $\mu$ s		
	t= 31 $\mu$ s		
PZT 3	t= 28.40 $\mu$ s	28.56 $\mu$ s	3508 m/s
	t= 28.40 $\mu$ s		
	t=28.80 $\mu$ s		
	t = 28.40 $\mu$ s		
	t= 28.80 $\mu$ s		



#### **4.2.3.6.- Análisis de resultado:**

Como se puede observar en las tablas anteriores la velocidad de propagación de ondas P aumenta a medida que es más profunda la ubicación de cada piezocristal dentro del molde de compactación. Ello se debe al efecto que tiene la capa superior sobre la capa inferior durante el proceso de compactación, por cuanto la capa inferior recibe energía de compactación al compactar la capa superior.

Por otra parte al comparar las diferentes muestras, se observa que al disminuir la humedad se produce una de saturación del suelo con el respectivo aumento de la succión matriz y ello trae como consecuencia que la velocidad de propagación de la onda aumente a medida que disminuye la saturación del suelo.

Lo expresado en los párrafos precedentes indica que la resistencia al corte del suelo no saturado tiende a ser mayor que la resistencia al corte a mayor saturación, y que, en consecuencia, es conveniente garantizar mediante técnicas constructivas adecuadas el impedimento de la entrada del agua de lluvia hacia la subrasante de los pavimentos. Esto se logra dando a la superficie de la subrasante una pendiente propicia para lograr desalojar las aguas de lluvia después de compactar la capa superior de dicha subrasante al final de cada jornada, de manera que las aguas se dirijan hacia un sitio desde donde puedan ser evacuadas. Esta recomendación pudo ser comprobada fehacientemente en campo en el caso de las mediciones de la humedad después de haber ocurrido una intensa precipitación pluvial.



#### 4.2.4.- Experimento 5:

**Tabla 10:** valores obtenidos con el equipo ultrasonido marca Controls en suelo limo-arenoso

Ensayo 1:	
Suelo # 1 (A-2-4) a humedad optima y DMS	T = 110.7 $\mu$ s
Altura de muestra: 11 cm.	Vp = 993.67 m/s
Ensayo 2:	
Suelo # 1(A-2-4) en la ram seca	T= 60.2 $\mu$ s
Altura de muestra: 6 cm.	Vp = 996.68 m/s
Ensayo 3:	
Suelo # 2(A-4) a humedad optima y DMS	T = 92.8 $\mu$ s
Altura de Muestra: 11 cm.	Vp = 1184.70 m/s

##### 4.2.4.1.- Análisis de resultados:

Es de hacer notar que en este caso las muestras de suelo compactado fueron preparadas en un molde de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, empleando un martillo cuyo peso y caída han sido diseñados para producir aproximadamente la misma energía con el método AASHTO T-99 -83. Por el motivo antes expuesto, los valores de la velocidad de propagación en el caso de estas briquetas cilíndricas de menor diámetro resultaron inferiores a los que se obtienen en el caso del molde de 6 pulgadas de diámetro empleando el martillo de 10 libras para una caída de 18 pulgadas para generar una energía equivalente a la del ensayo AASHTO T-180.

La razón de haber utilizado una energía equivalente al AASHTO T 99 -83 no fue otra que poder verificar si con una energía menor se lograba obtener una respuesta de la velocidad de propagación de onda P menor a la obtenida con la energía AASHTO T180- 83 lo cual equivaldría a una compactación del 95% de la que se logra con esta última energía.

Como se puede notar en la tabla 10 se logró demostrar el efecto del porcentaje de compactación en el valor de la velocidad de propagación de onda P.



### 4.3.-RESULTADOS OBTENIDOS CON EL ENSAYO DE CBR

Tabla 11: valores obtenidos a partir del ensayo CBR para diferentes tipos de suelos.

Tipo de suelo	CBR	56 golpes	25 golpes	12 golpes
Suelo 1 (A-2-4)	0,1"	21%	5.5%	3.80%
	0,2"	22%	6.80%	4.66%
Suelo 2 (A-4)	0,1"	24.8%	6.5%	5%
	0,2"	31.6%	11.3%	6.67%
Suelo 3 (A-6)	0,1"	4.8%	1.4%	1.4%
	0,2"	5.2%	3.6%	2.4%
Suelo 3 (A-6) no sat	0,1"	56%	32%	-
	0,2"	42%	24%	-

#### 4.3.1.- Análisis de resultado:

Al analizar los resultados obtenido se observa que los suelos A-2-4 y A-4 muestran valores de CBR bastante similares para 0.1" de penetración lo cual no ocurre para la penetración de 0.2".

En el caso del suelo A-6 para saturación por inmersión a los 4 días y compactado a humedad óptima se puede observar que el efecto de expansión incide notablemente en el valor de CBR obtenido, especialmente al ser comparado con el valor que se obtiene en el mismo suelo en estado no saturado.

Lo expresado en el párrafo anterior indica que la compactación de campo debe ser mantenida en la vecindad de la humedad óptima y garantizando un buen drenaje superficial en la última capa de compactación que se ejecuta al final de cada jornada, por cuanto no se justifica emplear el valor CBR saturado cuando el nivel de agua subterránea es profundo y se han tomado las precauciones debidas para impedir la entrada de agua de lluvia hacia el nivel de la subrasante. Esta precaución se encuentra muy bien referenciada en el texto "Pavimentos en arcillas expansivas", del profesor Kasiff.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

En Venezuela se ha podido demostrar que en el caso de los suelos A-6 y A-7-6 el ensayo de azul de Methylene arroja valores superiores a los 4 gr/100gr de azul en polvo y que la mejor manera de poder garantizar una estructura de pavimento duradera es proteger el suelo de la subrasante constituido por arcillas de este tipo Con membranas impermeables que rodeen una cajuela de un metro de profundidad en la cual se utilice el suelo compactado a humedad óptima y densidad cercana a la máxima seca tal y como se demostró en la obra dirigida por el tutor de este trabajo en la autopista Barcelona- Cantaura.

### 4.4.-RESULTADOS OBTENIDOS CON COMPRESSION NO CONFINADA AL 1% DE SU.

**Tabla 12:** valores obtenidos a partir del ensayo de compresión no confinada al 1% de la deformación unitaria axial

Lectura dial de carga	Deformación vertical $\Delta L$ ( mm/100 ) ( cm )		Deformación axial unitaria $\varepsilon = \Delta L / L_0$ (%)	$1 - \varepsilon$	Area corregida $A = A_0(1 - \varepsilon)$	Carga ( kg )	Esfuerzo unitario ( kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante ( kg/cm <sup>2</sup> )
suelo 1 (A-2-4)								
270	100	0,1	0,96	0,99	20,3	32,94	1,62	0,81
280	105	0,11	1,01	0,99	20,31	34,16	1,68	0,84
suelo 1 (A-2-4)								
230	100	0,1	0,96	0,99	20,3	28,06	1,38	0,69
233	105	0,11	1,01	0,99	20,31	28,43	1,4	0,7
suelo 2 (A-4)								
152	100	0,1	0,96	0,99	20,3	18,54	0,91	0,46
157	105	0,11	1,01	0,99	20,31	19,15	0,94	0,47
suelo 2 (A-4)								
140	100	0,1	0,97	0,99	20,63	17,08	0,83	0,41
145	105	0,11	1,02	0,99	20,64	17,69	0,86	0,43
Suelo 3 (A-6)								
735	100	0,1	0,98	0,99	20,31	89,67	4,42	2,21
745	105	0,11	1,03	0,99	20,32	90,89	4,47	2,24
suelo 3 (A-6)								
175	100	0,1	0,98	0,99	20,31	21,35	1,05	0,53
185	105	0,11	1,03	0,99	20,32	22,57	1,11	0,56



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

**4.4.1.- Análisis de resultado:**

Ver más adelante determinación del módulo resiliente a través de los ensayos CBR, compresión no confinada y prueba de plato.

**4.5.- DETERMINACION DEL MODULO ELASTICO A PARTIR DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION EN BASE DEL PRINCIPIO DE LA PIEZOELECTRICIDAD**

**Tabla 13:** Suelo 1. Estimación del módulo elástico a partir de la Vp en base al principio de la piezoelectricidad

NUMERO DE PZT	TIPO DE SUELO	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD (m/s <sup>2</sup> )	P	VELOCIDAD DE PROPAGACION (m/s)	MODULO ELASTICO (kg/m <sup>2</sup> )	MODULO ELASTICO (tn/m <sup>2</sup> )	MODULO ELASTICO (Mpa)
RAMA HUMEDA (HUMEDAD OPTIMA)								
1					-	NO HUBO MEDICIONES		
2	A-2-4	2145,00	9,81	218,65	2184,00	1042950165,14	106315,00	106,32
3					2497,00	1363312365,44	138971,70	138,97

**Tabla 14:** Suelo 2 Estimación del módulo elástico a partir de la Vp en base al principio de la piezoelectricidad

NUMERO DE PZT	TIPO DE SUELO	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD (m/s <sup>2</sup> )	P	VELOCIDAD DE PROPAGACION (m/s)	MODULO ELASTICO (kg/m <sup>2</sup> )	MODULO ELASTICO (tn/m <sup>2</sup> )	MODULO ELASTICO (Mpa)
RAMA HUMEDA (HUMEDAD OPTIMA)								
1					1315,00	382862048,93	39027,73	39,03
2	A-4	2172,00	9,81	221,41	1778,00	699929546,18	71348,58	71,35
3					1832,00	743090573,70	75748,27	75,75
RAMA SECA								
1					-	-	-	-
2	A-4	2172,00	9,81	221,41	2787,00	1719747754,13	175305,58	175,31
3					3100,00	2127718654,43	216892,83	216,89



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

**Tabla 15:** Suelo 3 Estimación del módulo elástico a partir de la Vp en base al principio de la piezoelectricidad

NUMERO DE PZT	TIPO DE SUELO	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD (m/s <sup>2</sup> )	P	VELOCIDAD DE PROPAGACION (m/s)	MODULO ELASTICO (kg/m <sup>2</sup> )	MODULO ELASTICO (tn/m <sup>2</sup> )	MODULO ELASTICO (Mpa)
RAMA HUMEDA (HUMEDAD OPTIMA)								
1					-			
2	A-6	2165,00	9,81	220,69	-			
3					-			
RAMA SECA								
1					-	-	-	-
2	A-6	2165,00	9,81	220,69	3293,00	2393163413,35	243951,42	243,95
3					3508,00	2715864277,27	276846,51	276,85

**4.5.1.- Análisis de resultado:**

Se puede observar en las tablas anteriormente referidas un incremento en el módulo elástico, este incremento de dicho valor se basa en los factores que afectan el módulo resiliente en donde sin duda la humedad óptima del material y la compactación de la misma juegan un papel importante a la hora de determinar el módulo resiliente o modulo elástico.

En la muestra 3 (A-6) por ser un material arcilloso y tener un comportamiento plástico y cohesivo, posee gran conductividad a la excitación eléctrica, sin embargo la cantidad de humedad del mismo puede afectar la velocidad de propagación de ondas P, debido a que los piezocristales no acopla en el aire y al contener mayor volumen de vacíos este presenta señales poco factibles. Es por esa razón que no tuvimos mediciones para una compactación a humedad óptima, y si se obtuvieron excelentes resultados para la compactación a humedad óptima dejando libre a la perdida de humedad durante 72 horas.

El suelo 2 y 3 expuestos a la perdida de humedad presentan un comportamiento más parecido a una roca la cual estos posee velocidades de propagación similares a rocas sanas.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.



FIGURA 50. Muestra del suelo 2, (A-2-4)

#### 4.6.-DETERMINACION DEL MODULO DE REACCION CON PRUEBA DE CARGA CON PLATO.

Tabla 16: valores obtenidos de la prueba de carga en campo en el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar.

Tipo de suelo	Modulo (k) sin corrección. Para 70 Kpa	Modulo (k) corregido (ver gráfico en anexos)
Suelo 1 (A-2-4)	331 pci (9.18 kg/cm <sup>3</sup> )	308 pci ( 8.54 kg/cm <sup>3</sup> )
Suelo 2 (A-4)	390 pci 10.81 kg/cm <sup>3</sup> )	222 pci ( 6.15 kg/cm <sup>3</sup> )
Suelo 3 (A-6)	282 psi ( 7.82 kg/cm <sup>3</sup> )	270 pci (7.49 kg/cm <sup>3</sup> )



#### 4.6.1.- Análisis resultados:

En el caso del suelo 3 (A-6) se observa que el modulo resulta mayor que en el caso del suelo 2 (A-4), ello se debe a la compactación de campo se obtuvo con una humedad ligeramente inferior a la humedad óptima y que en el caso de este tipo de suelo ello trae como consecuencia un aumento abrupto en la succión matriz lo cual aumenta la cohesión aparente del suelo.

#### 4.7.-RESULTADOS DEL EQUIPO TERRATEST

**Tabla17:** valores obtenidos del ensayo Terratest en el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar.

Suelo 1 (A-2-4)	Diámetro de placa	300 mm = 30 cm
	Peso del martillo	10 kg.
	Valor de E <sub>vd</sub>	82.93 Mpa
	Valor de E <sub>v2</sub>	165 Mpa
Suelo 2 (A-4)	Diámetro de placa	300 mm = 30 cm
	Peso del martillo	15 kg.
	Valor de E <sub>vd</sub>	60.17 Mpa
	Valor de E <sub>v2</sub>	120.35 Mpa
Suelo 3 (A-6)	Diámetro de placa	300 mm = 30 cm
	Peso del martillo	15 kg.
	Valor de E <sub>vd</sub>	64,96 Mpa
	Valor de E <sub>v2</sub>	129,93 Mpa

#### 4.7.1.- Análisis de Resultado:

Como se puede apreciar al analizar los resultados mostrados en la tabla 17, los módulos obtenidos con el equipo TERRATEST 5000 BLU para el módulo E<sub>v2</sub> para la humedad de campo son similares, aunque algo inferiores a los obtenidos para las mismas muestras empleando los piezocristales de 15 mm de diámetro en muestras compactadas en el laboratorio para humedad óptima y densidad máxima seca, lograda con el martillo de 10 libras para una energía de compactación A ASHTO T-180.

Cualquier diferencia se debe a que en obra se emplea una compactación lograda con equipo de compactación tipo TAMPERS, el cual produce un efecto de amasado que es diferente el efecto de



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

impacto instantáneo que produce el martillo de 10 libras para una caída de 18 pulgadas. Por este motivo se deduce que el método AASHTO T-180 83 genera una energía de compactación superior al que generan los rodillos tampers, y que por tal motivo en campo se obtiene una energía de compactación que genera densidades secas del orden del 95 % de la obtenida en el laboratorio.

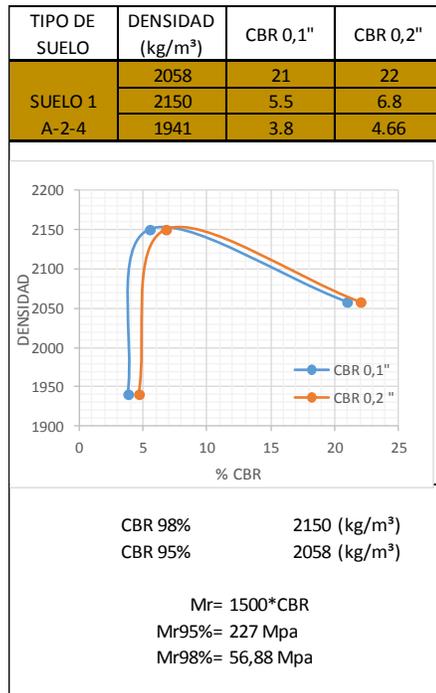
### 4.8.-DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE A TRAVÉS DE LOS ENSAYOS CBR, COMPRESIÓN NO CONFINADA Y PRUEBA DE PLATO.

#### 4.8.1.-Módulo resiliente vs ensayo de CBR

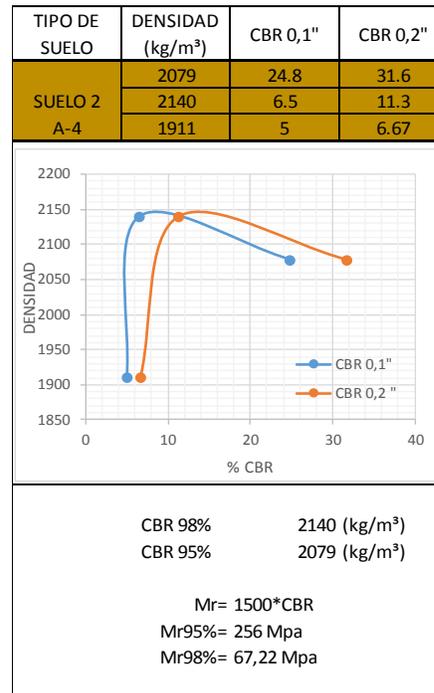
Heukelom y klomp (1962) reportaron la correlación que existe entre el módulo resiliente y el valor de CBR con la siguiente ecuación:

$$Mr = 1500 * \text{CBR en psi. Formula 22}$$

Para nuestro trabajo especial de grado los valores de CBR de los suelos estudiados arrojaron los siguientes valores:



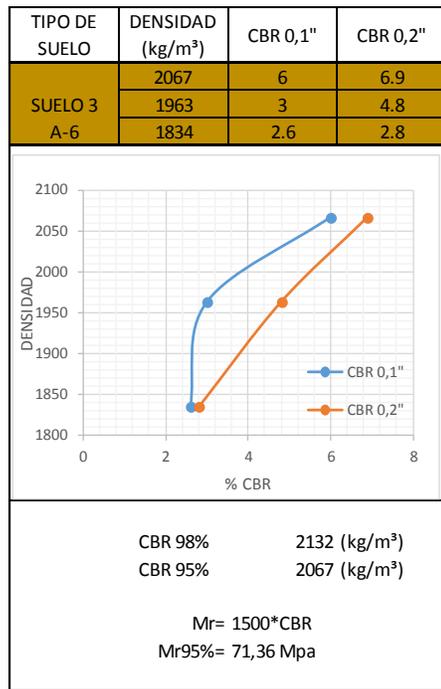
**Gráfico 1.** Valor de Mr a partir de CBR 95% y 98%



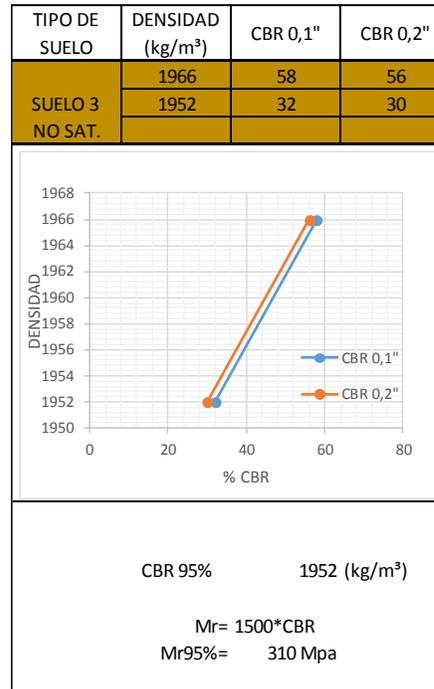
**Gráfico 2.** Valor de Mr a partir de CBR 95% y 98%



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.



**Gráfico 3.** Valor de Mr a partir de CBR 95% y 98%



**Gráfico 4.** Valor de Mr a partir de CBR 95% y 98%

### 4.8.2.- Análisis de resultado:

En la ecuación de Heukelom y klomp se muestran los valores de módulo resiliente obtenidos al aplicar la fórmula 21, fundamentada en un análisis de regresión por mínimos cuadrados entre dicho módulo y el valor k, debiendo entenderse que si bien es posible que el coeficiente de correlación que muestra esta ecuación de regresión sea alto; ello no significa que dicha expresión sea un buen predictor del módulo resiliente, pues no se conocen los valores brutos utilizados para obtenerla y en consecuencia no se ha podido determinar si existe homocedasticidad entre las variables independientes empleadas, ni si el coeficiente 1500 aplicado a la variable CBR es altamente significativo.

La ecuación de regresión en la que se fundamente la referida comparación solo refleja el valor medio probable del módulo resiliente, sin indicar cuál es el error de la estima, a todo lo largo de la variable independiente CBR, por cuanto no se dispone de las hipérbolas de confianza y de tolerancia.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

El Instituto del Asfalto mediante ensayos de laboratorio realizados en 1982, obtuvo las relaciones siguientes mediante la ecuación anteriormente nombrada, sin embargo cabe destacar que el valor del módulo resiliente depende de los factores como la humedad y tipo de compactación. Los valores obtenidos para los suelos ensayados arrojaron valores similares a la tabla siguiente.

**Tabla 18:** Relación entre el Mr y %CBR para diferente tipos de suelos. Imagen de:

Tipo de Suelo	% CBR	Mr en (psi)
Arena	31	46500
Limo	20	30000
Arena magra	25	37500
Limo - arcilla	25	37500
Arcilla limosa	8	11400
Arcilla pesada	5	7800

### 4.8.3.- MÓDULO RESILIENTE VS COMPRESIÓN NO CONFINADA

Según Woojin Lee (1997), La siguiente ecuación nos muestra la relación que existe entre el módulo resiliente y compresión no confinada:

$$Mr = 695.4(s_{u\ 1.0\%}) - 5.93 (s_{u\ 1.0\%})^2 \quad \text{Formula 23}$$

Los valores obtenidos para cada uno de nuestros suelos estudiados se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 19:** valores de módulo resiliente obtenidos a partir de la fórmula 22 y el 1% de Su.

Suelo #1 (A-2-4)	
Rama seca	Mr=90 Mpa
Humedad optima	Mr=78.80 Mpa
Suelo 2 (A-4)	
Rama seca	Mr= 56.28 Mpa
Humedad Optima	Mr= 51.72 Mpa
Suelo 3 (A-6)	
Rama seca	Mr= 139.60 Mpa
Humedad Optima	Mr= 63.99 Mpa



#### 4.8.4.- Análisis de resultado.

En la ecuación de Woojin Lee (1997), se muestran los valores de módulo resiliente obtenidos al aplicar la fórmula 22, fundamentada en un análisis de regresión por mínimos cuadrados entre dicho módulo ( $M_r$ ) y el valor de la resistencia al corte obtenido del ensayo de compresión no confinada, debiendo entenderse que si bien es posible que el coeficiente de correlación que muestra esta ecuación de regresión sea alto; ello no significa que dicha expresión sea un buen predictor del módulo resiliente, pues no se conocen los valores brutos utilizados para obtenerla y en consecuencia no se ha podido determinar si existe homocedasticidad entre las variables independientes empleadas, ni los coeficientes 695,4 y 5,93 aplicados a la variable  $S_u$  son altamente significativos al analizarlos con la prueba T de Student.

La ecuación de regresión en la que se fundamente la referida comparación solo refleja el valor medio Probable del módulo resiliente, sin indicar cuál es el error de la estimación a todo lo largo de la variable independiente  $S_u$ , por cuanto no se dispone de las hipérbolas de confianza y de tolerancia para esta ecuación de regresión no lineal.

#### 4.9.- Modulo resiliente vs módulo de balasto (k)

La entidad gubernamental que regula todos los aspectos de la aviación civil en Estados Unidos, administración Federal de Aviación, (FAA), desarrollaron un programa informático para el diseño de pavimentos aeroportuario, en donde se relaciona el módulo resiliente con el módulo de balasto a través de la siguiente ecuación:

$$M_r = 26 * k^{1.284} \text{ En psi } \textbf{Formula 24}$$

La siguiente tabla muestra los valores de módulo resiliente con relación al módulo de balasto.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

**Tabla 20:** valores obtenidos a partir de la fórmula 23 y el valor de módulo de balasto.

Tipo de Suelo	Valor de K (pci)	Modulo resiliente (psi)	Modulo resiliente (Mpa)
Suelo 1 (A-2-4)	308	40763	281,05
Suelo 2 (A-4)	222	26772	184,59
Suelo 3 (A-6)	270	34422	237

**4.9.1.- Análisis de resultados:**

En la tabla 19 se muestran los valores de módulo resiliente obtenidos al aplicar la fórmula 23, fundamentada en un análisis de regresión por mínimos cuadrados entre dicho módulo y el valor k, debiendo entenderse que si bien es posible que el coeficiente de correlación que muestra esta ecuación de regresión sea alto; ello no significa que dicha expresión sea un buen predictor del módulo resiliente, pues no se conocen los valores brutos utilizados para obtenerla y en consecuencia no se ha podido determinar si existe homocedasticidad entre la variables independientes empleadas, ni si el coeficiente 26 aplicado a la variable k y el exponente 1,284 son altamente significativos.

La ecuación de regresión en la que se fundamente la referida comparación solo refleja el valor medio probable del módulo resiliente, sin indicar cuál es el error de la estima, a todo lo largo de la variable independiente k, por cuanto no se dispone de las hipérbolas de confianza y de tolerancia.



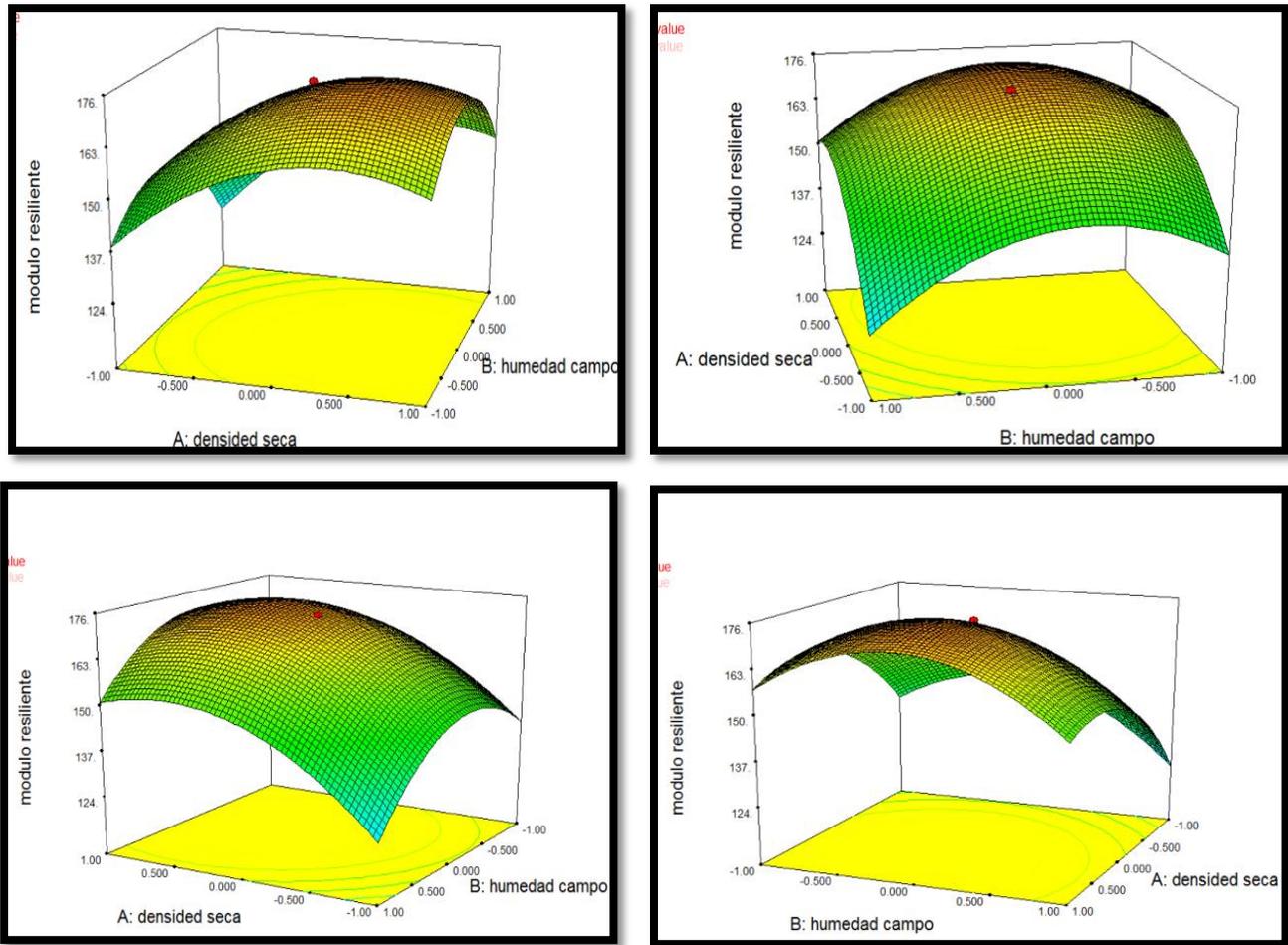
#### **4.10.- ANÁLISIS DE RESULTADO POR DISEÑO EXPERIMENTAL**

Por tratarse de un ensayo que arroja resultados que son complicados de analizar a simple vista y que, al mismo tiempo hacen uso de modelos no lineales se ha considerado prudente y conveniente emplear el análisis por diseño experimental utilizando el software Desing Expert 7.1.6. Esta precaución permite sacar conclusiones más precisas al examinar las gráficas tridimensionales que produce este software, el cual ha sido licenciado al profesor Roberto R Centeno W por la casa STAT EASE.

En las figuras siguientes se muestra en el eje de la densidad de compactación valores de -1,0,1 el cual nos reporta valores de densidad seca muy baja, densidad máxima seca, densidades muy altas respectivamente, en el eje de humedad de campo los valores de -1,0,1 el cual nos reporta suelo muy seco , suelo en humedad óptima y suelo saturado. Estos dos factores que influyen notoriamente en el módulo resiliente, se observa que el cambio de humedades afecta abruptamente el resultado siendo este el factor principal que afecta y ocasiona cambios bruscos en el valor del módulo resiliente concluyendo que a menor humedad y mayor densidad de compactación el módulo resiliente aumenta, en cambio en suelo saturado con baja densidad, este nos presenta valores de módulo resiliente muy bajos y en humedad óptima y densidad máxima seca para el 95% de compactación el valor de módulo resiliente se mantiene algo constante como se observa de color anaranjado en las próximas figuras.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.



**FIGURA 51** Analisis Experimental del modulo Resiliente obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio como en campo. Imagen tomada desde el software Desing Expert.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

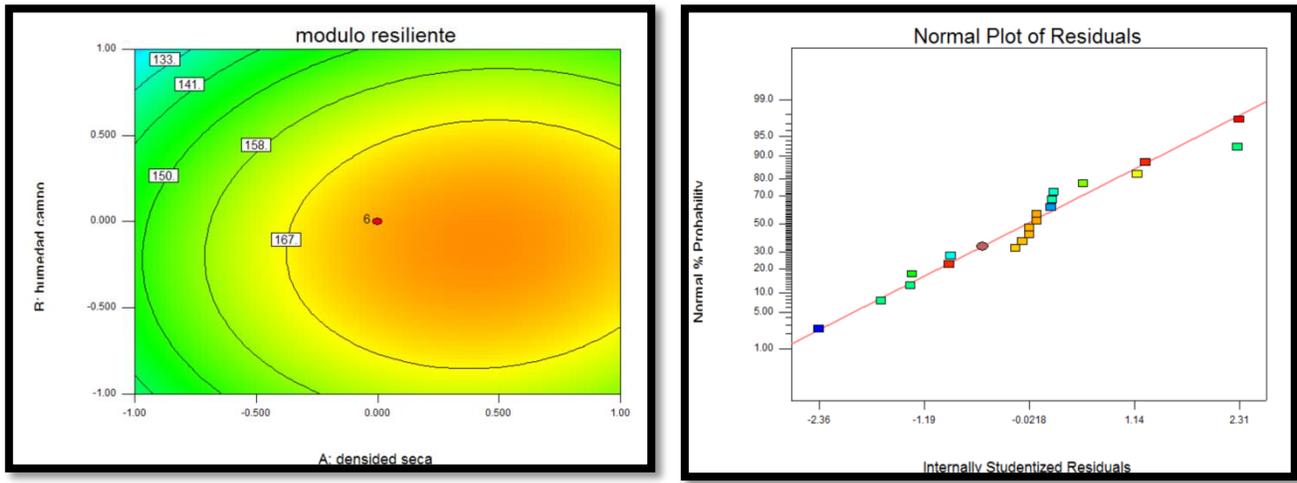


FIGURA 52 .(A) vista del análisis experimental de los valores de Modulo Resiliente en 2D; (B) grafico de la distribución normal de los valores obtenidos.

**Lack of Fit Tests**

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	8.19E+003	11	744.	545.	< 0.0001	
2FI	7.98E+003	8	998.	730.	< 0.0001	
<u>Quadratic</u>	<u>1.90E+003</u>	<u>5</u>	<u>380.</u>	<u>278.</u>	<u>&lt; 0.0001</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	369.	1	369.	270.	< 0.0001	Aliased
Pure Error	6.83	5	1.37			

"Lack of Fit Tests": Want the selected model to have insignificant lack-of-fit.

**Model Summary Statistics**

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	22.6	0.263	0.125	-0.222	1.36E+004	
2FI	24.8	0.281	-0.0501	-1.31	2.57E+004	
<u>Quadratic</u>	<u>13.8</u>	<u>0.828</u>	<u>0.674</u>	<u>-0.320</u>	<u>1.47E+004</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	7.92	0.966	0.893	-6.32	8.14E+004	Aliased

"Model Summary Statistics": Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

FIGURA 53 .Sumario estadístico del ajuste R cuadrado. Imagen tomada del Software Desing Expert.



## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1.- Las conclusiones que se derivan son las siguientes:

- Las gráficas que produce el software indican sin duda razonable que la humedad de compactación del suelo es el factor más importante para la evaluación del módulo resiliente tanto en sitio como en el laboratorio.
- La densidad de compactación tiene una influencia menos significativa que la de humedad de compactación, y ello se debe al grado de saturación que adquiere el suelo para una misma densidad y diferentes humedades.
- La velocidad de propagación de la onda P es una variable dependiente que está asociada tanto a la humedad, la densidad suelo y al tipo de suelo; sin embargo se ha podido notar durante la relación de los experimentos que en el caso de los suelos con alto contenido de arcillas hay una incidencia notable de la orientación de la partícula del suelo que tienden hacer planas y alargadas en vez de granulares.
- Lo expresado en el párrafo precedente ha sido comprobado en el presente trabajo para la humedad óptima en el caso de un suelo A-6. Dicha apreciación coincide con lo encontrado por el Ing. Geólogo Armando Imhoff en su tesis de doctorado (ver referencia en bibliografía).



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

- La comparación de los valores obtenidos con el empleo de los piezocristales con los obtenidos por otros investigadores empleando compresión no confinada en briquetas compactada a humedad óptima, ensayo de CBR a humedad óptima y densidad máxima seca, y prueba de plato de 30 pulgada de diámetro muestra que dicho valores son razonablemente parecidos, sin embargo es necesario tomar en cuenta que no conviene comparar ensayos de laboratorios con ensayos de campo debido a la diferencia de los métodos de compactación en ambos casos.
- La comparación realizada con el empleo de la simulación por elementos finitos en suelos no saturados sometido a carga dinámicas muestra resultados muy similares al que se obtuvo con el empleo de piezocristales, tomando en consideración que el modelo de comportamiento del suelo empleado es el hardening Soils.
- El sistema de compactación empleado para densificar el suelo tiene importancia capital, por cuanto no es lo mismo el ordenamiento de partículas que se obtiene con el paso de un compactador vibratorio que con el paso de un compactador tipo tampers. Ambos procesos de compactación indican que la humedad de compactación juega un papel menos importante en el caso de suelos granulares que en el caso de los suelos finos.
- Para el caso de suelos finos los valores altos de saturación están asociados a valores bajos de módulo resiliente debido a que parte de la energía de compactación actúa sobre los espacios vacíos con mayor cantidad de agua en ellos.



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

- El ensayo de TERRATEST 5000 BLU es de muy fácil ejecución en el campo y produce resultados inmediatos que pueden ser transmitidos vía online a proyectistas y consultores con lo cual se puede tomar decisiones en tiempo real. El valor arrojado por este equipo puede ser tomado directamente como módulo resiliente por cuanto el esfuerzo aplicado en las 3 últimas etapas del mismo genera un rebote elástico muy similar al que se mide en el laboratorio con el ensayo triaxial dinámico. Esta aceleración queda claramente demostrada al analizar la simulación realizada por elementos finitos con el uso del software PLAXIS 2D axisimetrico.
- Al leer cuidadosamente la literatura técnica que muestra el estado del arte de la determinación del módulo resiliente de los suelos compactados se ha podido deducir que las ecuaciones de regresión deducidas por Woojin Lee y Heukelom y Klomp, no reportan los valores brutos obtenidos en el campo, sino que se limitan a ofrecer valores altos del coeficiente de determinación  $R^2$  sin detenerse a analizar la significación estadística de los coeficientes obtenidos y la posición de las hipérbolas de confianza. Esta conclusión implica que no se conocen los errores asociados a la aplicación de tales ecuación de regresión y que en consecuencia no es posible comparar directamente los valores medios aportados por dicha regresiones con los valores medidos en campo con el procedimiento TERRATEST 5000 BLU ni con los aportados por los piezocristales.



## 5.2.- Recomendaciones:

- Se sugiere continuar con la presente investigación para obtener un número mayor de datos con piezocristales y con terratest en sitio teniendo el cuidado de determinar los grados de saturación y tanto las humedades de compactación como las densidades de campo en ambos casos.
  - Incorporar muestras de suelos granulares constituidos por gravas arenosas de las que se conozcan sus propiedades petrográficas y su procedencia para poder afirmar con suficiente propiedad los valores de los módulos resiliente obtenidos en obra.
  - Se hace hincapié en la necesidad de crear un filtro paso alto de frecuencia para mejorar la interpretación de las salidas por el osciloscopio.
  - Conviene utilizar un generador de espectros de respuesta que permita obtener directamente la frecuencia y el periodo resonantes de los suelos y agregados ensayados con los piezocristales.
  - Generar las condiciones de seguridad para poder operar en obra los equipos electrónicos, toda vez que en la actualidad se nota un incremento de la acción delictiva contra los operadores de estos equipos para poder disponer gratuitamente de equipos costosos y venderlos a quienes se ocupan a reparaciones electrónicas.
  - Evitar el uso de ecuaciones de regresión cuya data bruta no se conozca para regresar comparaciones con ensayos de campo realizados con el empleo de piezocristales y el uso de TERRATEST 5000 BLU o similar.
-



## Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

- Finalmente aprovechar que el equipo terratest 5000 BLU está dotado de un GPS para ubicar los ensayos en sitio y que produce resultados instantáneos para aumentar el tamaño de las muestras obtenido en sitio con la finalidad de llevar a cabo controles de calidad de compactación que puedan ser reportados en mapas dibujados con el software ARCGIS destacando en color rojo aquellos sitios donde se hayan obtenidos valores no deseables a los fines de llevar una base de datos gráficas para verificar el comportamiento a futuro de las estructuras de los pavimentos en la que se haya realizado estos tipos de ensayo.



## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- AASHTO (1972). *Standard Method for Nonrepetitive static plate load test of soils and flexible pavement components*. Designación T 222-72. Asn.of State Hwy and Transp. Florida.
  - AASHTO (1982). *Standard method of test for resilient modulus of subgrade soils*. Designación T 274-82. Asn.of State Hwy and Transp. Washington, D.C.
  - AASHTO (1999). *The California Bearing Rate*. Designación T 193-99. Asn.of State Hwy and Transp. Washington, D.C.
  - AASHTO (1982). *Standard method of test for resilient modulus of subgrade soils*. Designación T 274-82. Asn.of State Hwy and Transp. Washington, D.C.
  - BISHOP AND HENKEL, *the Triaxial Test*, Publicado Imperial College. Londres.
  - CENTENO WERNER, ROBERTO. (2006). *Notas de clases en el curso de postgrado sobre mecánica de suelos avanzada*. Departamento de ingeniería vial de la facultad de ingeniería de la universidad central de Venezuela. Venezuela
  - CENTENO WERNER, ROBERTO. *.Experiencias en el uso y abuso De Vibrocompactadoras para la Densificación de Materiales Granulares Cementados y No Cementados*. XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia. Geoinfraestructura: “La Geotecnia En El Desarrollo Nacional”. Caracas, Venezuela.
  - CENTENO WERNER, ROBERTO. *.Simulación de Monte Carlo y su Aplicación a la Ingeniería Geotécnica*. XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia. “Del Estado del Arte Practica”. VIII Conferencia Gustavo Pérez Guerra. Caracas, Venezuela.
  - CENTENO WERNER, ROBERTO (2015). *Aseguramiento control y auditoria de la calidad de las obras civiles*, volumen1. En impresión. Caracas, Venezuela.
-



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

- CERROLAZA, MIGUEL (2007). *El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas*. Universidad central de Venezuela, consejo de desarrollo científico y humanístico.
  - CHANDRAKANT S. DESAI, JOHN T. CHRISTIAN,(1977). *Numerical Methods In Geotechnical Engineering*. McGraw-Hill Book Company. New York.
  - CORTES, DOUGLAS. (2010).*Inverted Pavement Structures*. (Trabajo de grado de doctorado). Georgia Institute of Technology. Atlanta
  - D. G. FREDLUND, HARIANTO RAHARDJO (1993).*Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons. United States.
  - DESING EXPERT (2012). *Software for Design of Experiments*, Stat-Ease, Inc.
  - E. J. YODER, M. W. WITCZAK (1975). *Principles Of Pavement Desing*. John Wiley & Sons.inc. Canada.
  - GARNICA, P.; GÓMEZ, J.A. Y SESMA, J.A. (2002) *Mecánica de Materiales para Pavimentos*. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica N° 197. México.
  - IMHOF, ARMANDO LUIS (2010), *Caracterización de Arenas y Gravas con Ondas Elásticas: Tomografía Sísmica en Cross Hole*. (Tesis Doctoral), Universidad Nacional de Cuyo, Argentina. Recuperada de: [http://www.minas.upm.es/fundacion/jgs/images/pdf/TESIS\\_IMHOF.pdf](http://www.minas.upm.es/fundacion/jgs/images/pdf/TESIS_IMHOF.pdf)
  - INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. (2001) Secretaria De Comunicaciones y Transportes. *Módulo de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares*. Publicación Técnica N°142, Sanfandila, México. Recuperado de: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt142.pdf>.
-



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

- INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. (2002) Secretaria De Comunicaciones y Transportes *Mecánica de Materiales para Pavimentos*. Publicación Técnica N°197, Sanfandila, México. Recuperado de: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt197.pdf>
  - J.A.R. ORTIGAO, (1995). *Soil Mechanics In The Light Of Critical States Theories*. RC Press; 1 edition. Rotterdam.
  - LEE, W., BOHRA, N., ALTSCHAEFFL, A., y WHITE, T. (1997). *Resilient Modulus of Cohesive Soils.* J. Geotech. Geoenviron. Eng., 123(2), 131–136. Canada.
  - LAMBE WILLIAM, (1960). *Soils Testing For Engineers*. The Massachusetts institute of technology. New York. John Wiley & Sons, inc. London.
  - PLAXIS 2D (2012). *The Leading Geotechnical Finite Element Software, Material Models Manual* Plaxis 2D, Version 2 (AE). Netherlands.
  - ROMERO MARCOS, CRAGNO ANALIA (2002). *Caracterizacion de suelos con metodos geofisicos, estado Vargas, (La Guaira, Macuto, Caraballeda y Tanaguarena)*. III Coloquio sobre Microzonificacion sismica- Serie Tecnica N°1, Departamento de Sismologia, FUNVISIS. Caracas, Venezuela.
  - SANTAMARINA, J. C., KLEIN, K.A. Y FAM, M.A. (2001). *Soils and Waves*, John Wiley & Sons, Ltd., New York.
  - TEJEDOR LINARES, ANTONIO (2014). *Comportamiento Triaxial Consolidado Y Sin Drenaje De La Marga Azul De Guadalquivir Con Modelos Elastoplasticos Y Elementos Finitos* (Trabajo de grado de ingeniería civil) Universidad De Sevilla, Sevilla, España.. Recuperada de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90004/fichero/TFG+Antonio+Tejedor.pdf>
  - THE ASPHALT INSTITUTE (1973). *Full Depth Asphalt Pavements for Air Carrier Airports*, Manual series no.11. 3era edicion. United States.
-



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

- TIEN HSING WU,(1971). *Soils Dynamics*. Allyn and bacon, INC. Boston.
- U.S. DEPT. OF TRANSPORTATION,(1970). *Federal Aviation Administration, Information and Statistics Division, Office of Management Systems*.United States.
- U.S DEPARTMENT OF THE INTERIOR (1974). *Earth Manual: A water resources*. Technical publication. Second edition. Washington DC.
- WITZACK, M (2003). *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*. National Cooperative Highway Research Program. Arizona.
- WHITHAM, G.B. (2004) *Linear and Nonlinear Waves*. John Wiley & sons. INC. Canada.
- WOQJIN LEE, NIHAL C. BOHRA, *Joint Highway Research Project Subgrade Resilient Modulus for Pavement Design and Evaluation* White. Recuperado de: <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2552&context=jtrp>

#### **BIBLIOGRAFIA ELECTRONICA CONSULTADA**

- GALVEZ, PAUL. (2013) *Ondas P y S*. (en línea) Blog en la web, recuperado el 10 de mayo del 2015 por: <http://geofisicasismospgf.blogspot.com/p/ondas-p-y-ondas-s.html>.
  - GRIEM, SUSANNE (S.E). *Métodos sísmicos*, universidad de Atacama. Chile. Recuperado el 18 de abril del 2015 (en línea) por:  
<http://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/04000sismica.html#4.3> Fundamentos teóricos.
  - ORTIZ, MARIA, GAITAN SERRANO & CAMACHO, JAVIER (2013) *Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba*. (En línea) Recuperado el 7 de mayo del 2015 por:  
<http://dyna.unalmed.edu.co/en/ediciones/184/articulos/v81n184a10/v81n184a10.pdf>
-



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

## **ANEXOS**



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

Tabla de valores extremos comparativos en la que no se muestran ni el tamaño de las muestras utilizadas para obtener dicho valores ni la data bruta que ha producido los valores reportados. Imagen tomada de: Instituto mexicano del transporte. Publicación técnica N° 142. Ing. Garnica Anguas.

Tipo de suelo AASHTO	Descripción	SUCS	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	VRS %	Valor K (MPa/m)	Módulo resiliente (MPa)
<b>Suelos de grano grueso</b>						
A-1-a , bien graduado	Grava	GW, GP	19.6-22	60 - 80	81.44-122.16	70.37-140.74
A-1-a , mal graduado			18.9-20.4	35 - 60	81.44-108.58	70.37-140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3-20.4	20 - 40	54.29-108.58	42.23-105.55
A-3	Arena fina	SP	16.5-18.9	15 - 25	40.72-81.44	35.18-14.07
<b>Suelos A-2 (materiales granulares con alto porcentaje de finos)</b>						
A-2-4 , gravosa	Grava limosa	GM	20.4-22.8	40 - 80	81.44-135.73	70.37-211.11
A-2-5 , gravosa	Grava arena limosa					
A-2-4 , arenosa	Arena limosa	SM	18.9-21.2	20 - 40	81.44-108.58	70.37-140.74
A-2-5 , arenosa	Arena limosa con grava					
A-2-6 gravosa	Grava arcillosa	GC	18.9-22.0	20 - 40	54.29-122.16	56.29-140.74
A-2-7 gravosa	Grava arcillosa con arena					
A-2-6 arenosa	Arena arcillosa	SC	16.5-20.4	10 - 20	40.72-95.00	35.18-105.55
A-2-7 arenosa	Arena arcillosa con grava					
<b>Suelos de grano fino *</b>						
A-4	Limo	ML , OL	14.1-16.5	4 - 8	6.79-44.79	14.07-42.22
	Grava-arena-limo		15.7-19.6	5 - 15	10.86-59.72	28.14-56.29
A-5	Limo alta compresibilidad	MH	12.6-15.7	4-8	6.79-51.58	14.07-42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7-19.6	5-15	6.79-69.22	14.07-70.37
A-7-5	Arcilla baja compresibilidad	CL, OL	14.1-19.6	4-15	6.79-58.36	14.07-70.37
A-7-6	Arcilla alta compresibilidad	CH, OH	12.6-17.3	3-5	10.86-59.73	28.14-70.37

# Manual de proyecto de aeródromos

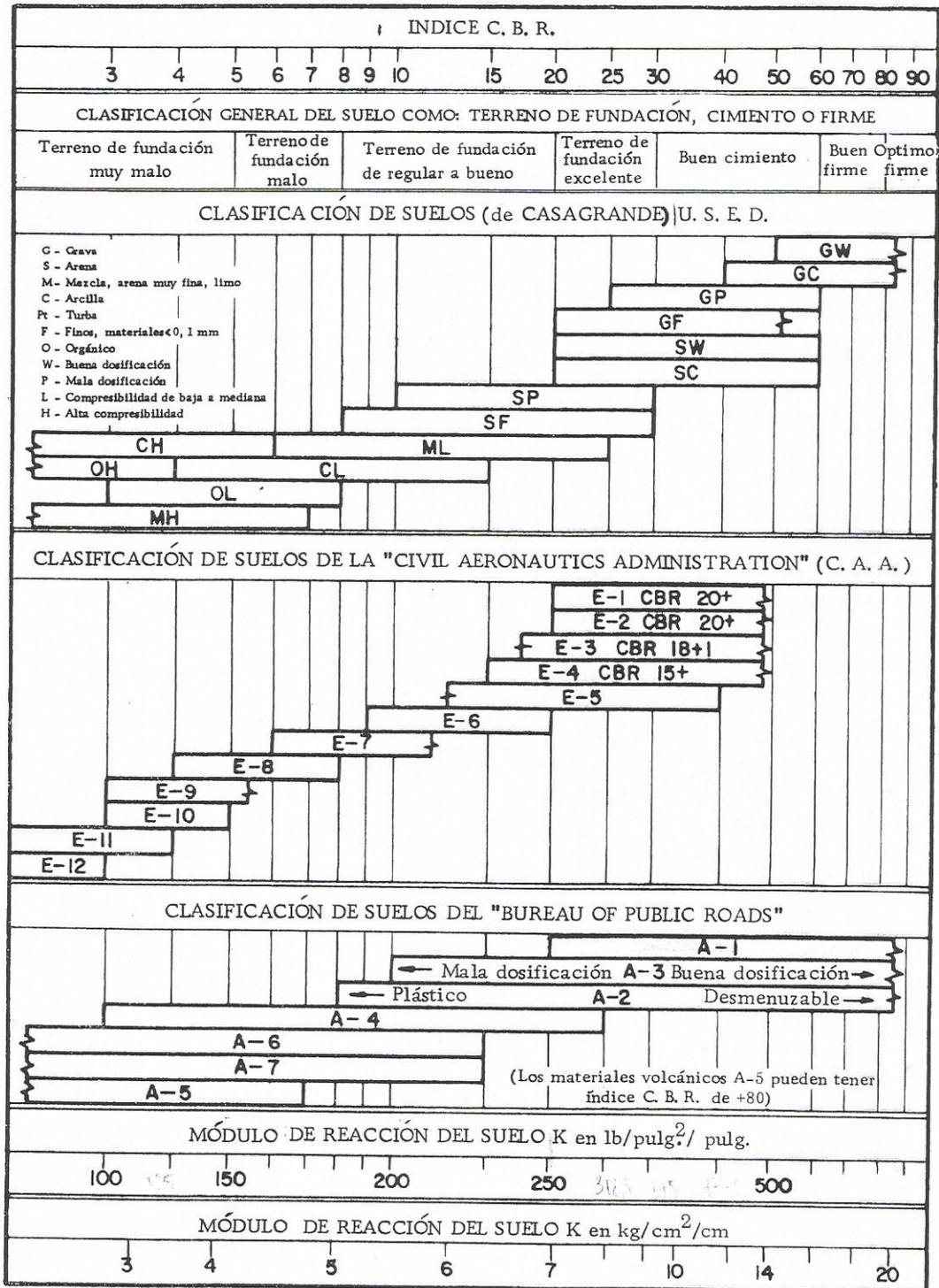
(Doc 9157-AN/901)

## Parte 3

## Pavimentos

Segunda edición — 1983





TOMADO DE: "Design of concrete Airport Pavement" PORTLAND CEMENT ASSOCIATION  
 Nota. Todas las correlaciones son muy aproximadas. Para determinar CBR, K, etc. se requieren ensayos efectivos.

Figura 3-2. Relaciones entre las clasificaciones de suelos, índices C.B.R. y valores k



TITULO:

GRAFICA 2-5

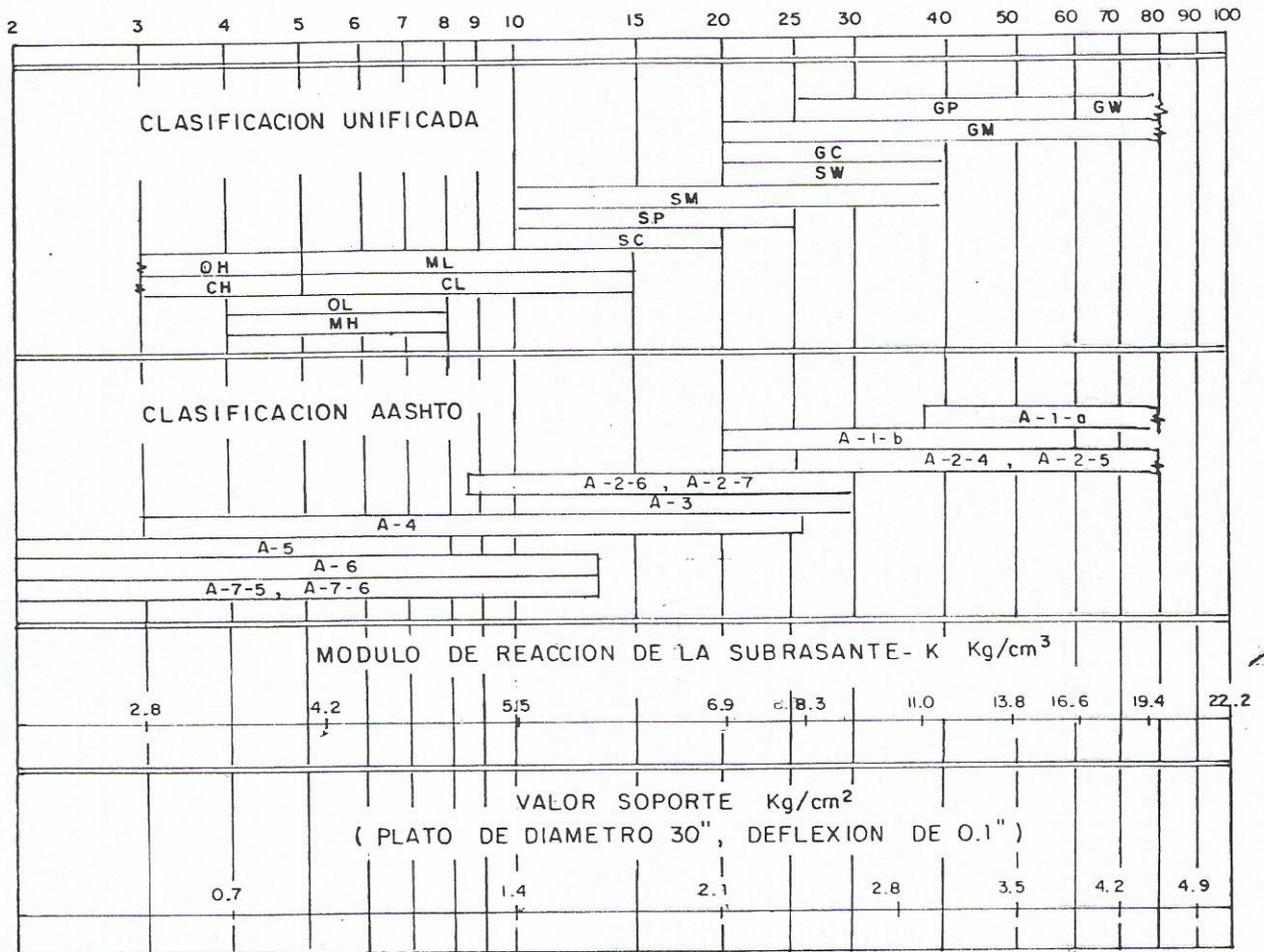
CORRELACIONES UTILES ENTRE DISTINTOS INDICES DE RESISTENCIA

HOJA:

REV:

25

RELACION SOPORTE CALIFORNIA - CBR



109

193

249

400

500

501 PCI

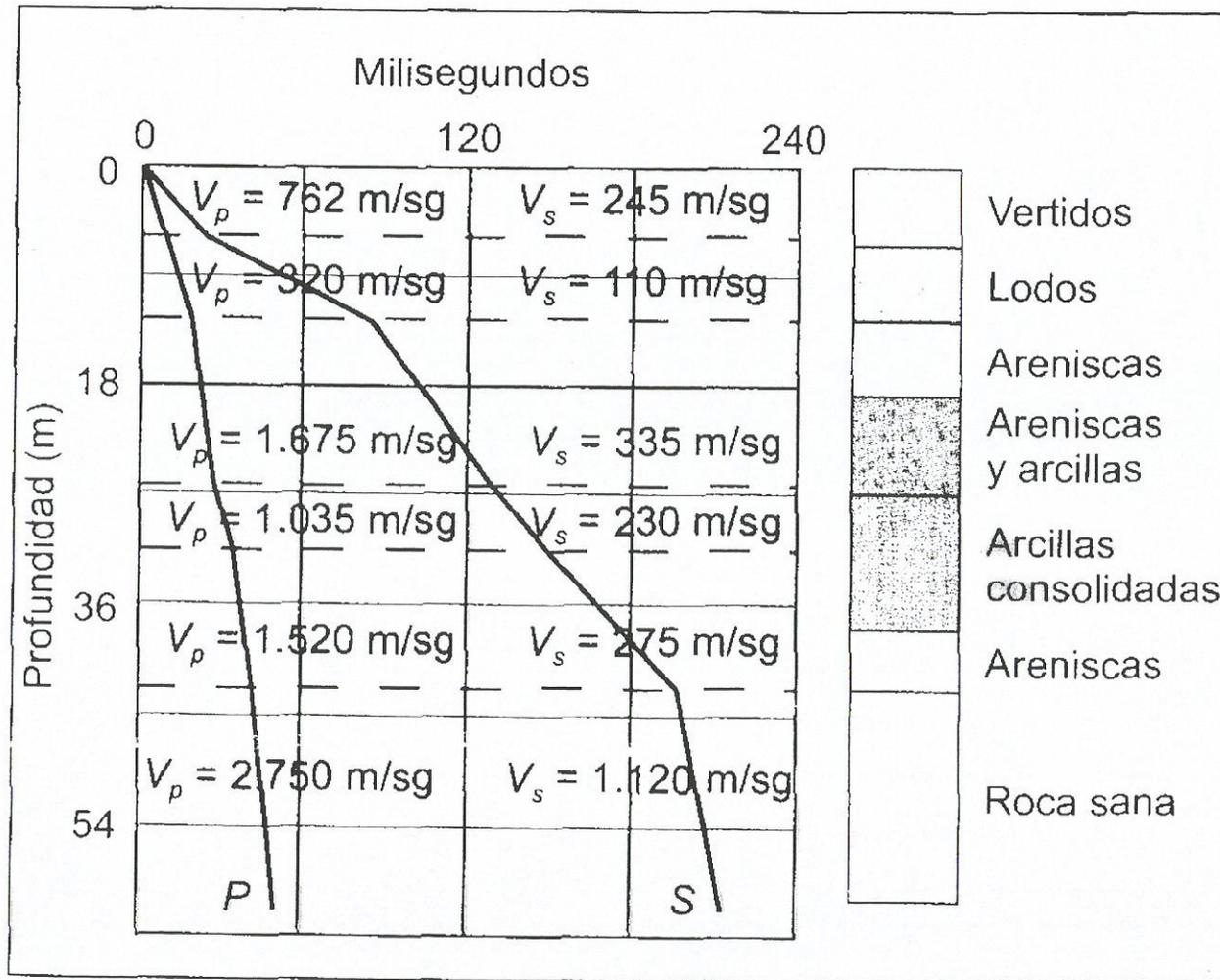


Fig. 59.- Velocidades de propagación de ondas P y S en un ensayo cross hole.

**Benchmarks for the allocation of the static deflection modulus  $E_{v2}$  or the dynamic deflection modulus  $E_{vd}$  to degree of compaction  $D_{pr}$  on coarse-grained soil types**

	Required compaction in different depths (ZTVT-StB 95*) (ZTVE-StB 94)	Based on benchmarks for the allocation to $D_{pr}$ (ZTVE-StB 84 Chart 8)	1) Proposal for the allocation of $E_{vd}$ to $E_{v2}$ (acc. German Road & Traffic Research Association, working committee Testing Technology, Oct. 96)
Soil Types DIN 18 196	Degree of compaction $D_{pr}$ in %	Deflection Modulus $E_{v2}$ in MN/m <sup>2</sup>	Deflection modulus $E_{vd}$ in MN/m <sup>2</sup>
Gravels and sands with $\leq 7\%$ by weight $< 0,063$ mm <small>(gravels with wide or intermittent grain size distribution, gravel-clay and gravel-peat mixtures)</small>	$\geq 103$ $\geq 100$ $\geq 98$ $\geq 97$	$\geq 120$ $\geq 100$ $\geq 80$ $\geq 70$	$\geq 65$ $\geq 50$ $\geq 40$ $\geq 35$
Gravels and sands with narrow grain size distribution, sands with wide or intermittent grain size distribution	$\geq 100$ $\geq 98$ $\geq 97$	$\geq 80$ $\geq 70$ $\geq 60$	$\geq 40$ $\geq 35$ $\geq 32$
Mixed gravels and sands with 7-15% by weight $< 0,063$ mm <small>(gravel-silt and gravel-clay mixtures, sand-silt and sand-clay mixtures)</small>	$\geq 100$  $\geq 97$	$\geq 70$  $\geq 45$	$\geq 35$  $\geq 25$
Silty and clayey as well as mixed soils 15-40% by weight $< 0,063$ mm <small>(silt, clay, gravel-silt and gravel-clay mixtures, sand-silt and sand-clay mixtures)</small>	$\geq 97$  $\geq 95$	$\geq 45$  $\geq 30$	$\geq 25$  $\geq 20$

Testing must be performed acc. International Standard ASTM E2835-11!  
For general information only! All indications are subject to change.



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

## **ANEXO A**

**Ensayos de laboratorio de estudio de suelos, de los materiales 1,2 y 3.**

---

OBRA: Aeropuerto Internacional Simon Bolivar  
UBICACIÓN: Maiquetia  
PROCEDENCIA: Umbral 28.  
CLIENTE: C.N.O  
MATERIAL: CC1, color pardo claro  
Profundidad de la calicata: 0,20 metros.  
de la cota de la plataforma terminada el día 15/08/2014

FECHA: 15/08/2014  
Hora de inicio de colocacion de equipo: 09:30 a.m.  
Hora de inicio de la prueba: 11:30 a.m.  
Hora de terminacion: 01:00 p.m.  
Estado del tiempo al inicio: Bueno  
Estado del tiempo al terminar: Bueno

PRUEBA DE CARGA CON PLATO PARA PISTAS DE AEROPUERTO.  
AASHTO T-222-81  
(Procedimiento de aplicación de carga N°2, Sección 4.4.2)

Datos Preliminares:

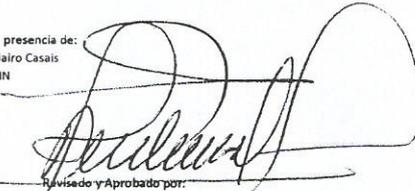
tamaño de los platos	Tipo de Instrumento de medicion de carga	peso del Instrumento de medicion de carga	marca de Flexímetros	precision de flexímetros	diametro del plato inferior	area del plato inferior (pulgadas cuadradas)	carga de asiento (Lbs)	Presion de asiento (Lbs/in <sup>2</sup> )
Pulg.		(Lbs)			(pulgadas)			
8" 12" 18" 24" 30"	CELDA SIS GEO 500 KN	8,84	MITUTOYO	0,01 mm.	30	706,86	1414	2,00

Tempo. min.	Carga aplicada Lbs.	Carga aplicada Kgs.	Presion Lbs/pulg <sup>2</sup>	Presion Kpa	Fleximetro N°1 mm/100.	Fleximetro N°2 mm/100.	Fleximetro N°3 mm/100.	Decisión Logica (Flex 1)	Decisión Logica (Flex 2)	Decisión Logica (Flex 3)	flex 1	flex 2	flex 3	deflexion promedio mm	deflexion promedio in	modulo de reaccion (K'u) lb/in <sup>2</sup>	
0	3365,01	1529,55	4,8	32,82	98,00	95,00	98,00	continuar	continuar	continuar	26,00	12,00	32,00	0,62	0,0244	389,93	continuar
0,50					85,00	82,00	85,00	continuar	continuar	continuar	13,00	15,00	18,00				
1					85,00	80,00	85,00	continuar	continuar	continuar	7,00	7,50	9,50				
2					84,00	80,00	84,00	continuar	continuar	continuar	3,50	4,00	5,00				
4					84,00	79,00	84,00	continuar	continuar	continuar	1,50	1,70	2,00				
10	15,00				83,00	78,00	78,00	acceptar	acceptar	acceptar							
0	6730,02	3059,1	9,5	65,65	52,00	36,00	31,00	continuar	continuar	continuar	4,00	8,00	8,00	0,21	0,0084		
0,5					50,00	32,00	27,00	continuar	continuar	continuar	4,00	2,00	6,00				
1					48,00	30,00	25,00	continuar	continuar	continuar	2,00	0,50	3,00				
2					48,00	29,00	25,00	continuar	continuar	continuar	0,83	0,17	1,00				
6					47,00	28,00	25,00	acceptar	acceptar	acceptar							
0	10116,13779	4589	14,31	98,47	99,00	66,00	67,00	continuar	continuar	continuar	4,00	2,00	4,00	0,74	0,0290		
0,5					97,00	65,00	65,00	continuar	continuar	continuar	4,00	3,00	6,00				
1					95,00	63,00	61,00	continuar	continuar	continuar	2,50	2,00	3,50				
2					94,00	62,00	60,00	continuar	continuar	continuar	0,71	0,86	1,29				
7					94,00	60,00	58,00	acceptar	acceptar	acceptar							
0	13460,04	6118	19,04	131,29	47,00	17,00	14,00	continuar	continuar	continuar	4,00	2,00	4,00	0,63	0,0248		
0,5					45,00	16,00	12,00	continuar	continuar	continuar	5,00	3,00	4,00				
1					42,00	14,00	10,00	continuar	continuar	continuar	3,50	4,50	4,00				
2					40,00	8,00	6,00	continuar	continuar	continuar	1,50	1,67	1,67				
6					38,00	7,00	4,00	acceptar	acceptar	acceptar							
0	16825,05	7648	23,80	165,76	85,00	57,00	52,00	continuar	continuar	continuar	4,00	2,00	4,00	0,49	0,0192		
0,5					83,00	56,00	50,00	continuar	continuar	continuar	1,50	1,00	1,50				
2					82,00	55,00	49,00	continuar	continuar	continuar	0,75	0,50	0,75				
4					82,00	55,00	49,00	continuar	continuar	continuar							
					75,00			acceptar	acceptar	acceptar							
0	20190,06	9177	28,56	200,23	27,00	95,00	87,00	continuar	continuar	continuar	-1,00	-1,00	-2,00	0,49	0,0192		
0,5					27,50	95,50	88,00	continuar	continuar	continuar	-1,00	67,00	59,00				
1					28,00	28,00	28,00	continuar	continuar	continuar	-0,25	33,75	29,75				
2					27,50	27,50	27,50	continuar	continuar	continuar							
					90,00			acceptar	acceptar	acceptar							
0	Descarga				27	95	97										
0,5					85	95	94										
1					70	20	95										
2					60	27	4										
4					58	50	4										

Nota:

Personal:  
Ramiro Melean  
Robert Paz  
Jose Antonio Verde  
Jose L. Garcia  
Rafael Pantoja

En la presencia de:  
Ing. Jairo Casais  
T.Y LIN



Elaborado por:  
*Ramiro Melean*  
T.S.U Ramiro Melean

Supervisado en campo por:  
Tahiry Luques  
Asistente de Ingeniero.

Revisado y Aprobado por:  
Ing. Roberto Centeno W.  
C.I.V 2876

OBRA: Aeropuerto Internacional Simon Bolivar

FECHA: 15/08/2014

UBICACIÓN Maiquetia

Hora de inicio de colocacion de equipo: 09:30 a.m.

PROCEDENCIA: Umrbral 28.

Hora de inicio de la prueba: 11:30 a.m.

CLIENTE: C.N.O

Hora de terminacion: 01:00 p.m.

MATERIAL: CC1, color pardo claro

Estado del tiempo al inicio: Bueno

Profundidad de la calicata: 0,20 metros.

Estado del tiempo al terminar: Bueno

de la cota de la plataforma terminada el dia 15/08/2014

PRUEBA DE CARGA CON PLATO

AASHTO T-222-81

(Procedimiento de aplicación de carga N°2 , Seccion 4.4.2)

Datos Preliminares:

Peso del gato	tamaño de los platos.	peso de los platos	peso del elemento de transferencia	peso del instrumento de medicion de carga.	marca de Flexímetros	precision de flexímetros	diametro del plato inferior	area del plato inferior	carga de asiento	Presion de asiento
(Lbs.)	(Pulgadas)	(Lbs.)	(Lbs)	(Lbs)			(pulgadas)	(pulgadas cuadradas)	(Lbs)	(Lbs/in2)
43,51	8"	15,03	10,62	8,84	MITUTOYO	0,01 mm	30	706,86	1414	2,00
	12"	32,35								
	18"	72,63								
	24"	129,11								
	30"	207,30								

Esfuerzo aplicado (Psi)	Fleximetro 1 Deformacion (mm/100.)	Fleximetro 2 Deformacion (mm/100.)	Fleximetro 3 Deformacion (mm.)	Promedio de deformacion en mm/100	Deformacion en (mm/100)	lectura de los dos diales del fleximetro (mm/100)	lectura de los dos diales del fleximetro (In/100)	Modulo (k) sin corrección (para 10 psi.)	Modulo (k) corregido
1,665	0	0	0	0	0	0	0		ver grafico
4,8	86,50	83,50	82,5	84,17	15,83	15,83	0,62		
9,5	49,00	31,00	31,00	37,00	63,00	63,00	2,48	390	222
14,31	95,80	63,20	62,20	73,73	26,27	126,27	4,97	Pci.	Pci.
19,04	42,40	12,40	9,20	21,33	78,67	178,67	7,03		
23,8	83,00	55,75	50	62,92	37,08	237,08	9,33		

NOTA:

Por tratarse de un suelo fino algo plastico, no se requiere corrección por saturacion.

la correccion por deflexion del plato es minima según figura (3.25) tomada de Geotecnia LNV., 1993. AASHTO T 222-81.

Personal:

Ramiro Melean  
Robert Paz  
Jose Antonio Verde  
Jose L. Garcia  
Rafael Pantoja

En la presencia de:

Ing. Jairo Casais  
T.Y LIN

Elaborado por:

T.S.U Ramiro Melean

Supervisado en campo por:

Tehiry Luques  
Asistente de Ingeniero.

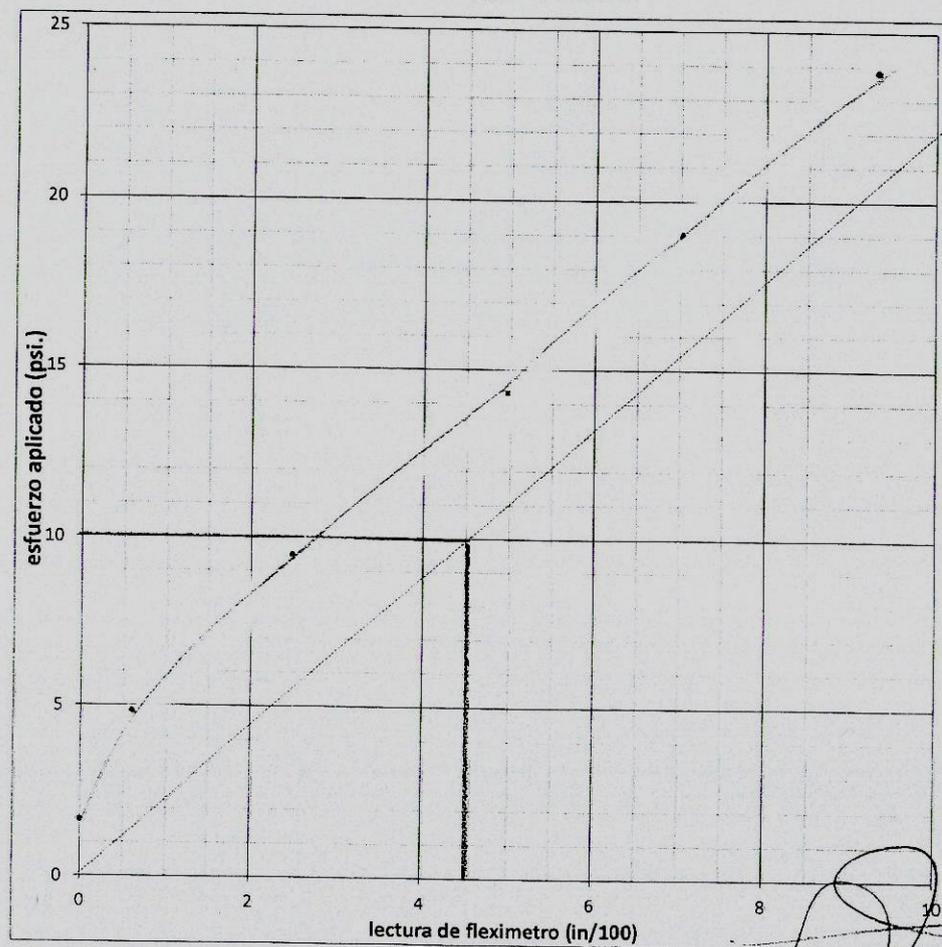
Revisado y Aprobado por:

Ing. Roberto Centeno W.  
C.V 2876

OBRA: Aeropuerto Internacional Simon Bolivar  
UBICACIÓN: Maiquetia  
PROCEDENCIA: Ubral 28.  
CLIENTE: C.N.O  
MATERIAL: CC1, color pardo claro  
Profundidad de la calicata: 0,20 metros.  
de la cota de la plataforma terminada el día 15/08/2014

FECHA: 15/08/2014  
Hora de inicio de colocacion de equipo: 09:30 a.m.  
Hora de inicio de la prueba: 11:30 a.m.  
Hora de terminacion: 01:00 p.m.  
Estado del tiempo al inicio: Bueno  
Estado del tiempo al terminar: Bueno

Grafica Esfuerzo aplicado VS lectura del fleximetro  
Curva de Carga-Deformación.



*[Handwritten signature]*

**Obra:** Aeropuerto Internacional de Maiquetia.  
**Cliente:** Constructora Norberto Odebretch  
**Procedencia:** Umbral 28 AISM  
**Muestra:** UMBRAL 28 CC1

**ENSAYO DE GRANULOMETRIA**  
ASTM D-422-02

PESO TOTAL MUESTRA (g): 1048,50  
PESO MUESTRA LAVADA (g): 632,00

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido en tamiz	% Retenido acumulado	% Pasante
4 "				
3 "				
2 1/2 "				
2 "				
1 1/2 "				
1 "	88,39	8,43	8,43	91,57
3/4 "	47,98	4,58	13,01	86,99
1/2 "	6,42	0,61	13,62	86,38
3/8 "	26,63	2,54	16,16	83,84
Nº 4	43,10	4,11	20,27	79,73
Nº 10	55,29	5,27	25,54	74,46
Nº 40	125,44	11,96	37,51	62,49
Nº 50	71,39	6,81	44,31	55,69
Nº 80	63,64	6,07	50,38	49,62
Nº 100	35,39	3,38	53,76	46,24
Nº 200	68,24	6,51	60,27	39,73
Pasa Nº 200	416,50	39,72	99,99	

% grava= 20,3  
% arena= 40,0  
% finos= 39,7

Laboratorista  
*[Signature]*  
TSU Ramiro Meleán  
Cédula

Revisado  
*[Signature]*  
Henry Luques  
Cédula

Aprobado  
*[Signature]*  
Ing Roberto Centeno W  
CIV 2.876

[ Sesión HRB → A-4  
Arena gruesa

*[Handwritten mark]*

**CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS S.C.**  
Ingenieros Consultores

OBRA: Aeropuerto de Maiquetia  
UBICACIÓN: Maiquetia, Edo. Vargas.  
PROCEDENCIA: Terraplen excavado Umbral 28

FECHA: 23/07/2014

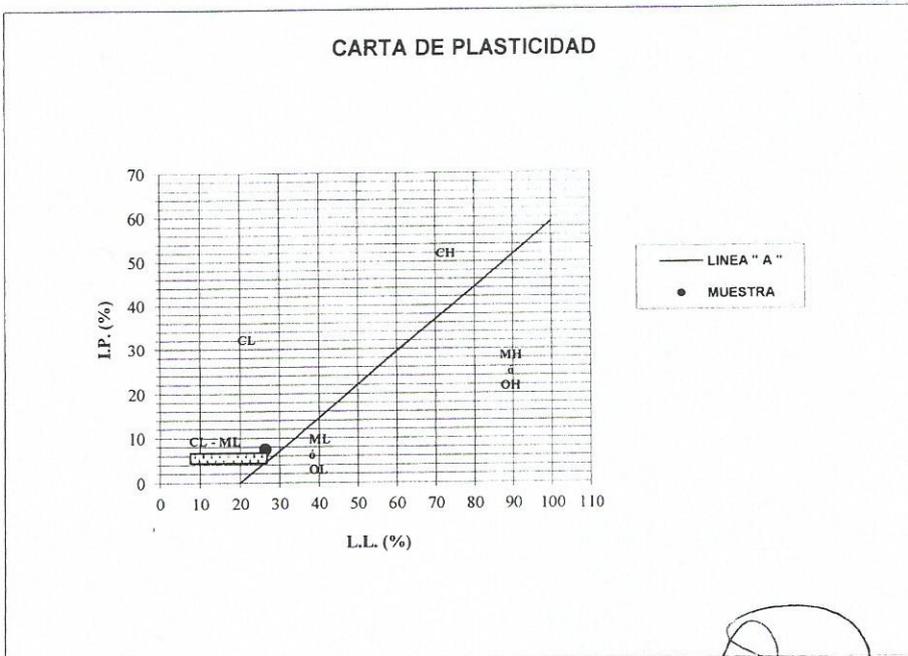
**ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA**  
ASTM D-4318-95

MUESTRA: CC1 - Umbral 28

Golpes Platillo	Envase N°	Peso (g.)				agua	suelo seco	humedad (%)	Limite Líquido (%)
		Peso envase	envase + suelo humedo	envase + suelo seco					
25	LL216	28,47	41,17	38,50	2,67	10,03	26,62	26,62	
27	LL220	28,16	40,14	37,60	2,54	9,44	26,91	27,16	
30	LL220*	28,46	39,13	37,02	2,11	8,56	24,65	25,19	

Envase N°	Peso (g.)				agua	suelo seco	Limite Plástico (%)
	Peso envase	envase + suelo humedo	envase + suelo seco				
LP49	10,53	16,46	15,53	0,93	5,00	18,60	
LP51	10,56	16,54	15,54	1,00	4,98	20,08	
LP22	10,52	15,61	14,84	0,77	4,32	17,82	

RESULTADOS (%)	
LL =	26,3
LP =	18,8
IP =	7,5



Laboratorista  
*Ramiro Meleán*  
TSU Ramiro Meleán  
CI

revisado  
*Familia Liques*

aprobado  
*Roberto Centeno Werner*  
Ing. Roberto Centeno Werner  
CIV 2.876

**CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS**

Ingenieros Consultores

Laboratorio de Mecanica de Suelos

Caracas - Venezuela

**ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA**

ASTM D-854-00

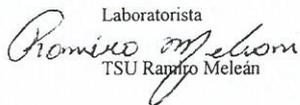
OBRA: AEROPUERTO INTERNACIONAL DE MAIQUETIA( AISB)

UBICACIÓN: Maiquetia, Edo. Vargas

PROCEDENCIA: TERRAPLEN EXCAVADO EN UMBRAL 28.

Muestra					
Picnómetro N°		1	2	3	4
Capacidad Picnómetro(cm <sup>3</sup> )		250	250	250	250
Pesos (g)	Tara del Picnómetro	87,64	90,69	105,78	101,96
	Picnómetro + Suelo Seco	147,92	150,95	161,10	159,34
	Suelo Seco ( $W_o$ )	60,28	60,26	55,32	57,38
	Picnom. + Agua + Suelo ( $W_1$ )	374,25	377,35	389,60	387,40
	Picnom. Lleno de agua ( $W_2$ )	336,59	339,74	354,58	350,90
Temperatura del Ensayo (°C)		23,0	23,0	23,0	23,0
Gravedad Específica referida a Temperatura del Ensayo ( $G_s$ )		2,66	2,66	2,73	2,75
Gravedad Específica referida a Temperatura de 20 °C ( $G_s$ 20°)		2,66	2,66	2,72	2,75

$$G_s = \frac{W_o}{W_o - (W_1 - W_2)}$$

Laboratorista  
  
 TSU Ramiro Meleán

Cédula:

Revisado

Tahiry Luques

Cédula: 20911027



Aprobación

  
 Ing Roberto Centeno W

CIV 2,876

MUESTRA CC1 PROCEDENCIA ERRAPLEN EXCAVADO EN UMBRAL 2  
 Peso Molde (gr) 6.032 VOLUMEN (CC) 2.091,10  
 OBRA RECUPERACION DEL UMBRAL 28 DE LA PISTA 10-28  
 UBICACIÓN Maiquetia, Edo. Vargas.  
 DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO EN LA MUESTRA ANALIZADA

PARA CALCULO DEL PESO UNITARIO SECO DE LA MUESTRA COMPACTADA	ENERGIA COMPACTACION				ASTM D 1557	
PUNTO DE LA CURVA DE COMPACTACION	1	2	3	4	5	7
MOLDE+SUELO HUMEDO (gramos)	10.693,00	10.888,00	10.916,00	10.776,00	10.633,00	
PESO DE SUELO HUMEDO (gramos)	4.661,00	4.856,00	4.884,00	4.744,00	4.601,00	
DENSIDAD HUMEDA ( Kg/m3)	2.228,97	2.322,22	2.335,61	2.268,66	2.200,28	
HUMEDAD PROMEDIO PARA EL PUNTO (%)	6,70	7,63	10,19	12,36	15,00	
DENSIDAD SECA (kg/m3)	2.088,96	2.157,67	2.119,62	2.019,10	1.913,34	

**DETERMINACION DE HUMEDADES DE COMPACTACION**

IDENTIFICACION DEL ENVASE	TARA ENVASE VACIO	ENVASE MAS SUELO HUMEDO	ENVASE MAS SUELO SECO	AGUA CONTENIDA	PESO DE SUELO SECO	PORCENTAJE HUMEDAD	HUMEDAD PROMEDIO
-	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	%	%
H-27	23,98	156,71	148,84	7,87	124,86	6,30	
H-49	23,98	156,70	147,90	8,80	123,92	7,10	6,70
H-10	23,73	190,16	176,83	13,33	153,10	8,71	
H-26	22,70	190,19	179,90	10,29	157,2	6,55	7,63
H-37	23,44	206,30	189,80	16,5	166,36	9,92	
H-15	23,45	206,32	189,00	17,32	165,55	10,46	10,19
H-17	23,80	183,11	165,68	17,43	141,88	12,29	
H-19	23,80	183,11	165,49	17,62	141,69	12,44	12,36
H-1	22,20	177,38	156,90	20,48	134,70	15,20	
H-9	22,22	177,38	157,39	19,99	135,17	14,79	15,00

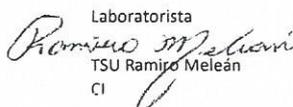
RELACIONES DE VACIO Y GRADOS DE SATURACION P U AGUA (Kg/m3) 1.000,00 GRAVEDAD ESPECIFICA SOLIDOS 2,73

PUNTO DE LA CURVA DE COMPACTACION	1	2	3	4	5	6	7
DENSIDAD SECA EN KG/M3	2.088,96	2.157,67	2.119,62	2.019,10	1.913,34		
RELACION DE VACIOS	0,307	0,265	0,288	0,352	0,427		
HUMEDAD DE COMPACTACION	6,70	7,63	10,19	12,36	15,00		
GRADO DE SATURACION (%)	59,63	78,49	96,61	95,84	95,92		
HUMEDAD DE SATURACION	11,24	9,72	10,55	12,90	15,63		
HUMEDAD PARA 95 % SATURACION	10,68	9,23	10,02	12,25	14,85		
HUMEDAD PARA EL 90 % DE SATURACION	10,12	8,74	9,49	11,61	14,07		
HUMEDAD PARA EL 85 % DE SATURACION	9,55	8,26	8,97	10,96	13,29		
HUMEDAD PARA EL 80 % DE SATURACION	8,99	7,77	8,44	10,32	12,51		
HUMEDAD PARA EL 75 % DE SATURACION	8,43	7,29	7,91	9,67	11,73		
HUMEDAD PARA EL 70 % DE SATURACION	7,87	6,80	7,38	9,03	10,94		

La muestra de suelo compactada ha sido corregida para tomar en consideración el peso de suelo retenido en el cedazo 3/4", cual ha sido reemplazado por suelo pasa 3/4 retenido en N° 4

DENSIDAD MAXIMA SECA (KG/M3) 2.172  
 RELACION VACIOS PUNTO OPTIMO 0,26  
 DECISION SOBRE DENSIDAD MAXIMA SECA Y HUMEDAD OPTIMA CORRECTO

HUMEDAD OPTIMA ASTM D 1557 8,4 %  
 GRADO DE SATURACION 89,26 %

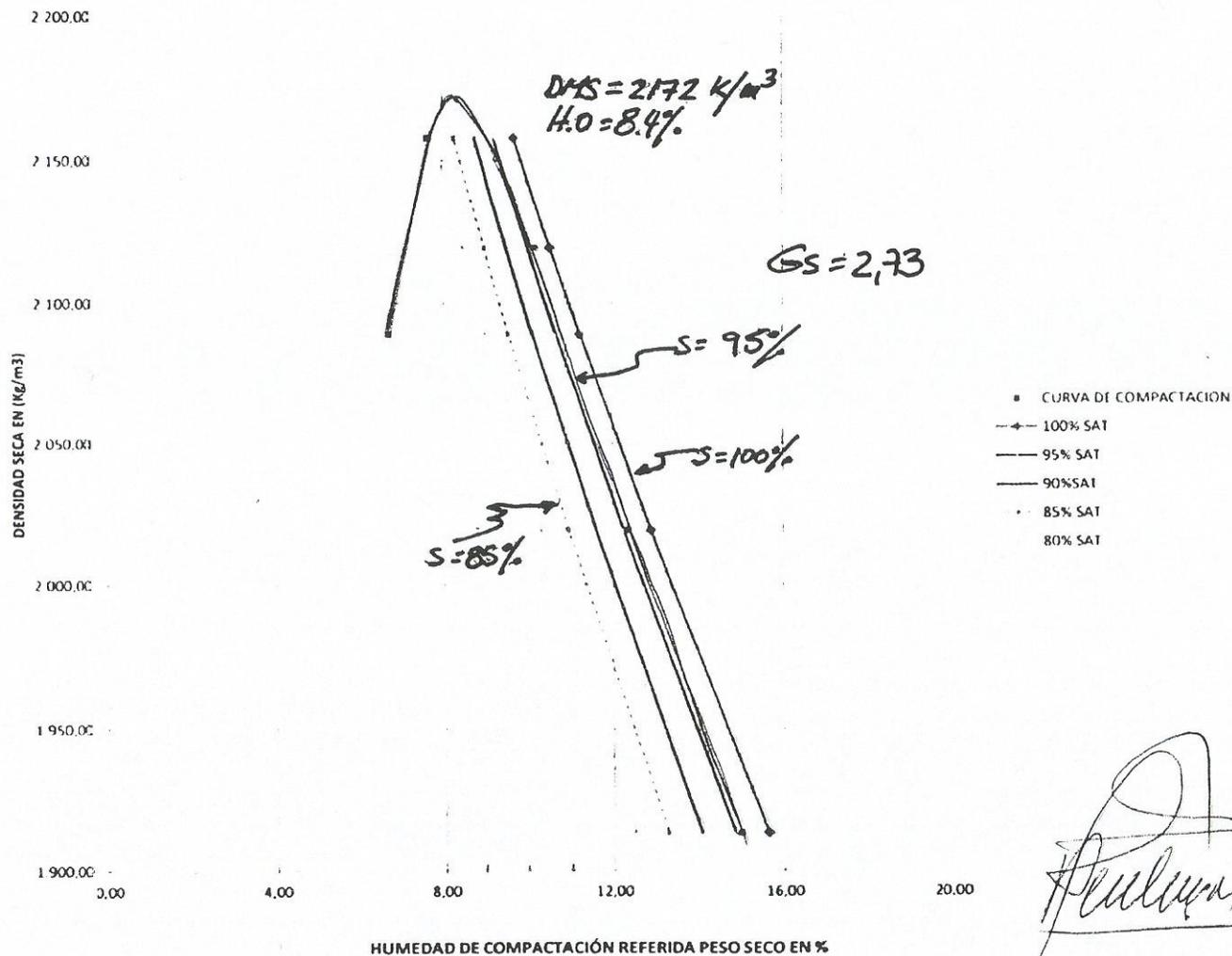
Laboratorista  
  
 TSU Ramiro Melean  
 CI

Revisado y aprobado  
  
 Ing Roberto Centeno Werner  
 CIV 2.876

CENTENO RODRIGUEZ Y ASOCIADOS  
INGENIEROS CONSULTORES  
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS  
CARACAS-VENEZUELA

OBRA: AEROPUERTO INTERNACIONAL DE MAIQUETIA. UMBRAL 28.  
MUESTRA: CC1 DE LA SUBRASANTE ZONA DE HUNDIMIENTO.  
CLIENTE: CONSTRUCTORA NORBERTO ODEBRETCH  
FECHA : 23/07/2014.

### CURVA DE COMPACTACIÓN AASHTO T180 – 83.



ENSAYO DE PENETRACION CBR

MUESTRA MATERIAL CC1 PROCEDENCIA Umbral 28 AISB OBRA AISB  
 FECHA DE ENSAYO 29/07/2014 EQUIPO DE PENETRACION Leonard Farnell Electrico VELOCIDAD 1,27 mm/min  
 NORMA APLICADA ASTM DESIGNACION D 1883-99 Se anexa copia del método ASTM aplicado  
 Anillo calibrado en Laboratorio de Materiales UCAB

DATOS DEL ANILLO DE CARGA LEONARD FARNELL 1514 DIV MAX 1330

Factor de anillo	4,006	8,787	libras/div	Area de Piston (in2)	3
------------------	-------	-------	------------	----------------------	---

DATOS DEL PROCTOR MODIFICADO

Densidad Maxima Seca	2172	Humedad Optima	8,4	Grado Saturacion %	90,56
----------------------	------	----------------	-----	--------------------	-------

DATOS DE COMPACTACION DE MOLDES CBR CALIBRADOS

MOLDE N°	1	56 G/C	MOLDE N°	2	25 G/C	MOLDE N°	3	12 G/C
Peso molde sin suelo	7.095,00		Peso molde sin suelo	7.016,00		Peso molde sin suelo	7.144,00	
Peso molde + suelo hum	11.871,00		Peso molde + suelo hum	11.801,00		Peso molde + suelo hum	11.583,00	
Volumen Molde cm3	2.114,06		Volumen Molde cm3	2.062,67		Volumen Molde cm3	2.154,53	
Densidad Humeda Kg/m3	2.259,16		Densidad Humeda Kg/m3	2.319,81		Densidad Humeda Kg/m3	2.060,31	
Humedad Promedio %	8,64		Humedad Promedio %	8,4		Humedad Promedio %	7,80	
Densidad Seca Kg/m3	2.079		Densidad Seca Kg/m3	2.140		Densidad Seca (Kg/m3)	1.911	
Densidad Lograda % DMS	95,74			98,53			88,00	

DATOS REFERENTES A LA PENETRACION DE LOS MOLDES DE SUELO COMPACTADO

Divisiones del DIAL VERTICAL	MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2
0,025	5	43,9	14,65	1,5	13,18	4,39	1	8,79	2,93
0,050	13	114,2	38,08	2,5	21,97	7,32	2,5	21,97	7,32
0,075	29	254,8	84,94	3,5	30,75	10,25	3	26,36	8,79
0,100	45,5	399,8	133,27	8	70,30	23,43	6	52,72	17,57
0,125	60	527,2	175,74	12	105,44	35,15	10	87,87	29,29
0,150	73,5	645,8	215,28	18	158,17	52,72	12,5	109,84	36,61
0,175	85,5	751,3	250,43	24	210,89	70,30	17	149,38	49,79
0,200	96	843,6	281,18	30	263,61	87,87	20	175,74	58,58
0,300	127	1116,0	371,98	45	395,42	131,81	29	254,82	84,94
0,400	152	1335,6	445,21	56	492,07	164,02	36	316,33	105,44

ensayo de Expansión	cm.	Pulgadas	cm.	pulgadas	cm.	Pulgadas.
tiempo en hrs	alt, molde	17,70	6,97	alt molde	17,76	6,99
transcurrido	lect. 0,001 "	dif	exp %	lect	dif	exp. %
0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
24	44	44,00	0,6	91	91,00	1,3
48	44	44,00	0,6	91	91,00	1,3
72						

NOTA: Conviene dejar bien sellado la capa ultima compactada en un dia de trabajo para proteger el terraplen de la lluvia y en caso de observarse alta nubosidad en el aeropuerto antes de terminar la jornada tambien se recomienda sellar la capa compactada para protegerla de la probable lluvia.

Se pudo observar un ligero hinchamiento al ser sumergido los moldes en agua, ello implica que la recomendación de sellado del tope de la ultima capa de la jornada es mandatorio. Utilizar compactadora sobre rueda de goma.

Nota: Para cálculo del CBR ver gráfico anexo 1

Laboratorista  
 TSU Ramiro Meleán  
 Cédula

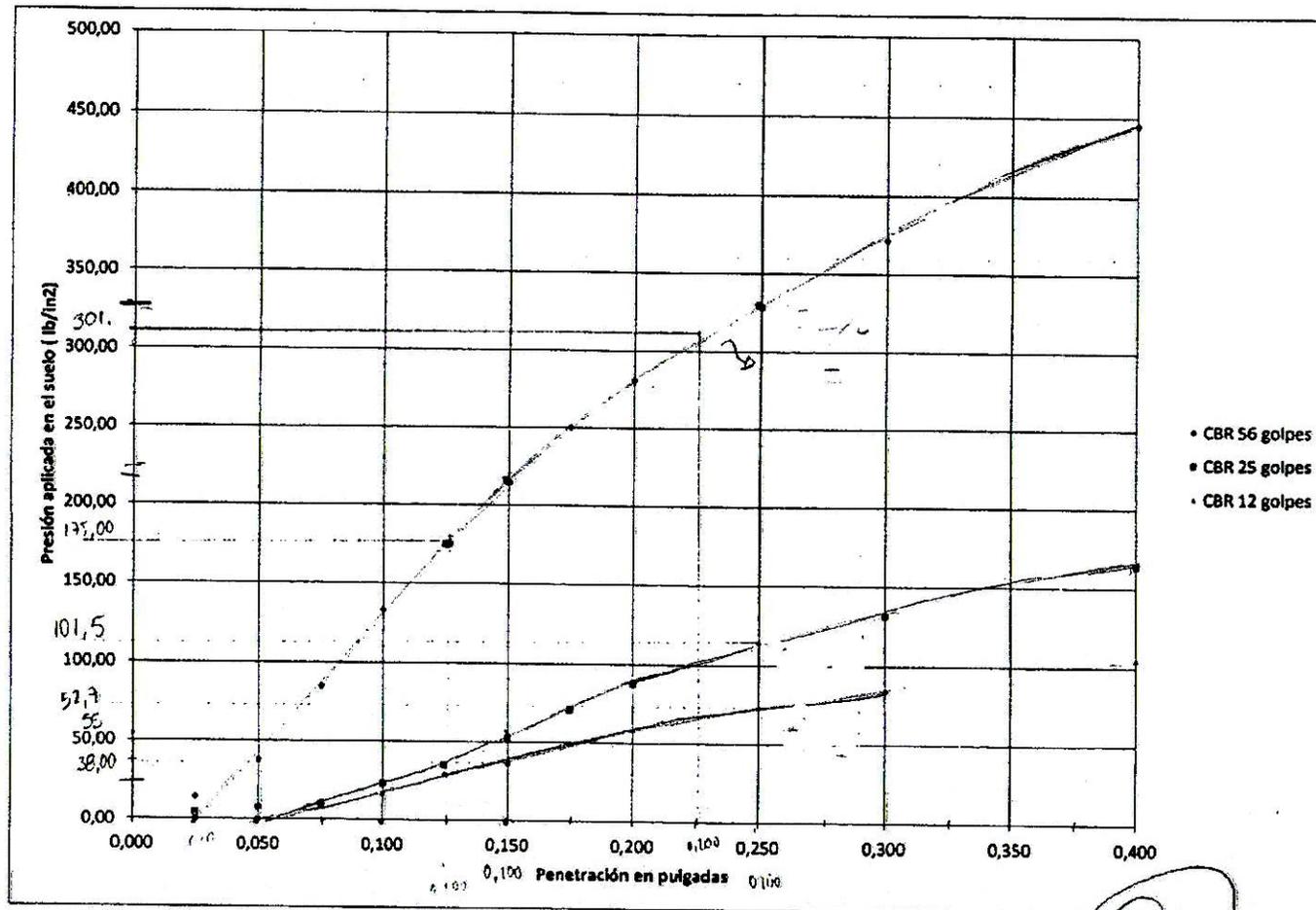
Revisado  
 Tania Cuevas  
 Cédula

2,72  
 Aprobación  
 Ing Roberto Centeno W  
 CIV 2,876

# CENTENO & RODRIGUEZ Y ASOCIADOS

Ingenieros Consultores

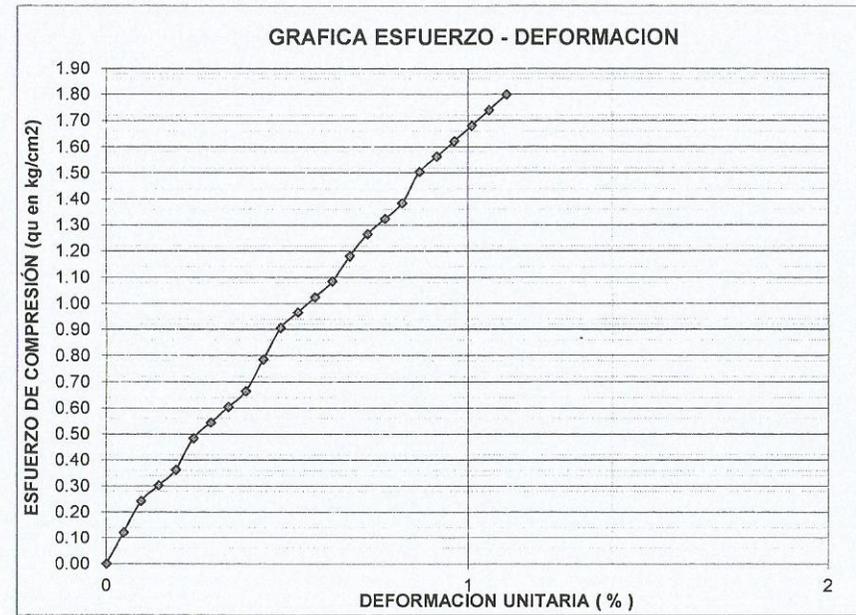
Caracas – Venezuela.



ENSAYO DE COMPRESION SIN CONFINAR

Muestra N°: SUELO n° Diámetro: 5.06 cm  
 Área inicial: 20.11 cm Anillo N°: 1516  
 Ge: 2.78 Long. inicial: 10.40 cm Calibración: 0.122 kg/div  
 Foto de Falla

Lectura dia de carga	Deformación vertical $\Delta L$		Deformación axial unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0 (\%)$	$1 - \epsilon$	Área corregida $A = A_0 / (1 - \epsilon)$	Carga (kg)	Esfuerzo unitario (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante (kg/cm <sup>2</sup> )
	(mm/100)	(cm)						
10.0	0.0	0.00	0.00	1.000	20.11	0.00	0.00	0.00
20.0	5.0	0.01	0.05	1.000	20.12	2.44	0.12	0.06
40.0	10.0	0.01	0.10	0.999	20.13	4.88	0.24	0.12
50.0	15.0	0.02	0.14	0.999	20.14	6.10	0.30	0.15
60.0	20.0	0.02	0.19	0.998	20.15	7.32	0.36	0.18
80.0	25.0	0.03	0.24	0.998	20.16	9.76	0.48	0.24
90.0	30.0	0.03	0.29	0.997	20.17	10.98	0.54	0.27
100.0	35.0	0.04	0.34	0.997	20.18	12.20	0.60	0.30
110.0	40.0	0.04	0.38	0.996	20.19	13.42	0.66	0.33
130.0	45.0	0.05	0.43	0.996	20.20	15.86	0.79	0.39
150.0	50.0	0.05	0.48	0.995	20.21	18.30	0.91	0.45
160.0	55.0	0.06	0.53	0.995	20.22	19.52	0.97	0.48
170.0	60.0	0.06	0.58	0.994	20.23	20.74	1.03	0.51
180.0	65.0	0.07	0.63	0.994	20.24	21.96	1.09	0.54
196.0	70.0	0.07	0.67	0.993	20.25	23.91	1.18	0.59
210.0	75.0	0.08	0.72	0.993	20.26	25.62	1.26	0.63
220.0	80.0	0.08	0.77	0.992	20.26	26.84	1.32	0.66
230.0	85.0	0.09	0.82	0.992	20.27	28.06	1.38	0.69
250.0	90.0	0.09	0.87	0.991	20.28	30.50	1.50	0.75
260.0	95.0	0.10	0.91	0.991	20.29	31.72	1.56	0.78
270.0	100.0	0.10	0.96	0.990	20.30	32.94	1.62	0.81
280.0	105.0	0.11	1.01	0.990	20.31	34.16	1.68	0.84
290.0	110.0	0.11	1.06	0.989	20.32	35.38	1.74	0.87
300.0	115.0	0.12	1.11	0.989	20.33	36.60	1.80	0.90



# ENSAJO DE COMPRESION SIN CONFINAR

Muestra N°: SUELO-1

Diámetro: 5.06 cm

Fecha:

1516

Gr: 2.78

Área inicial: 20.11 cm<sup>2</sup>

Anillo N°:

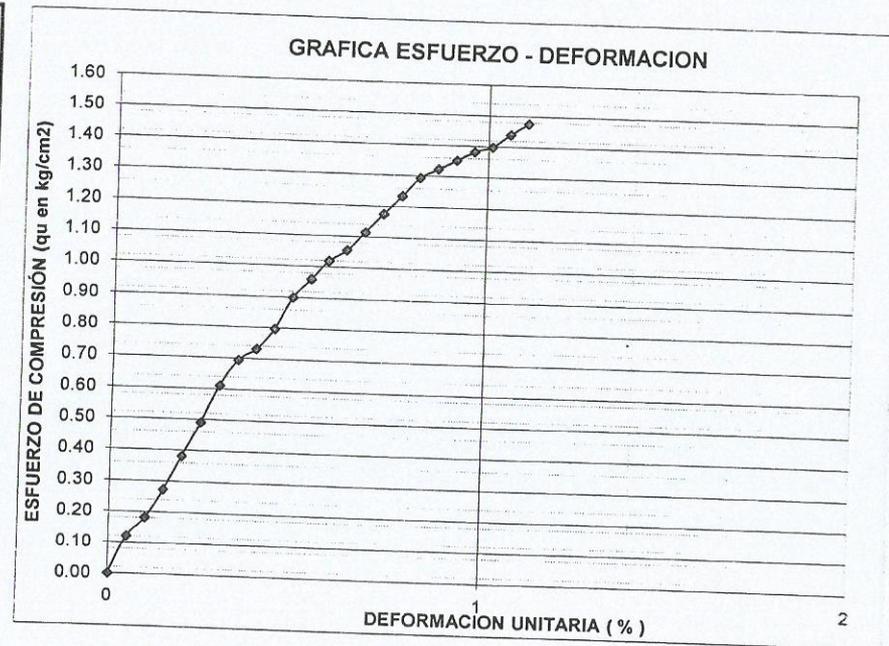
0.122 kg/div

Long. inicial: 10.40 cm

Calibración:

Foto de Falla

Lectura dial de carga	Deformación vertical $\Delta L$		Deformación axial unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$ (%)	$1 - \epsilon$	Área corregida $A = A_0 / (1 - \epsilon)$	Carga (kg)	Esfuerzo unitario (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante (kg/cm <sup>2</sup> )
	(mm/100)	(cm)						
0.0	0.0	0.00	0.00	1.000	20.11	0.00	0.00	0.00
22.0	5.0	0.01	0.05	1.000	20.12	2.44	0.12	0.06
30.0	10.0	0.01	0.10	0.999	20.13	3.66	0.18	0.09
45.0	15.0	0.02	0.14	0.999	20.14	5.49	0.27	0.14
53.0	20.0	0.02	0.19	0.998	20.15	7.69	0.38	0.19
81.0	25.0	0.03	0.24	0.998	20.16	9.88	0.49	0.25
101.0	30.0	0.03	0.29	0.997	20.17	12.32	0.61	0.31
115.0	35.0	0.04	0.34	0.997	20.18	14.03	0.70	0.35
121.0	40.0	0.04	0.38	0.996	20.19	14.76	0.73	0.37
132.0	45.0	0.05	0.43	0.996	20.20	16.10	0.80	0.40
149.0	50.0	0.05	0.48	0.995	20.21	18.18	0.90	0.45
159.0	55.0	0.06	0.53	0.995	20.22	19.40	0.96	0.48
169.0	60.0	0.06	0.58	0.994	20.23	20.62	1.02	0.51
175.0	65.0	0.07	0.63	0.994	20.24	21.35	1.06	0.53
185.0	70.0	0.07	0.67	0.993	20.25	22.57	1.11	0.56
195.0	75.0	0.08	0.72	0.993	20.26	23.79	1.17	0.59
205.0	80.0	0.08	0.77	0.992	20.26	25.01	1.23	0.62
215.0	85.0	0.09	0.82	0.992	20.27	26.23	1.29	0.65
220.0	90.0	0.09	0.87	0.991	20.28	26.84	1.32	0.66
225.0	95.0	0.10	0.91	0.991	20.29	27.45	1.35	0.68
230.0	100.0	0.10	0.96	0.990	20.30	28.06	1.38	0.69
233.0	105.0	0.11	1.01	0.990	20.31	28.43	1.40	0.70
240.0	110.0	0.11	1.06	0.989	20.32	29.28	1.44	0.72
246.0	115.0	0.12	1.11	0.989	20.33	30.01	1.48	0.74



OBRA: AISB  
UBICACIÓN: PLATAFORMA REMOTA  
CLIENTE: C.N.O

FECHA: #####  
Hora de inicio: #####  
Hora de terminación: 11:20 a.m.  
Estado del tiempo al inicio: BUENO  
Estado del tiempo al terminar: BUENO

Profundidad de la calicata:

Datos Preliminares:

tamaño de los platos.	Tipo de instrumento de medicion de carga	peso del instrumento de medicion de carga	marca de Flexímetros	precision de flexímetros	diametro del plato inferior	area del plato inferior	carga de asiento	Presion de asiento
Pulg.		(Lbs)			(pulgadas)	(pulgadas cuadradas)	(Lbs)	(Lbs/pulgada <sup>2</sup> )
8"	CRNA SIK GEO	8,84	MITUTOYO	0,001 mm.	30	706,86	1414	2,00
12"								
18"	500 KN							
24"								
30"								

conversion de unidades

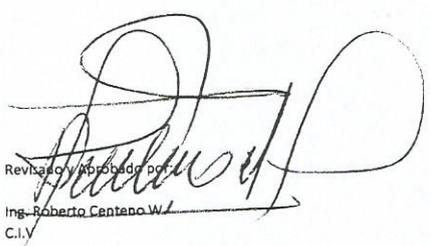
lbs	cm-lbs	mm-in
2,2046	0,3937	0,0394
kN-lbf	kn-kgf	psi-kpa
224,81	101,97	6,8948

PRUEBA DE CARGA CON PLATO PARA PISTAS DE AEROPUERTO.  
AASHTO T-222-81

SOLO INTRODUCIR DATO EN CELDAS CUYO FONDO ES AMARILLO.

(Procedimiento de aplicación de carga N°2, Seccion 4.4.2)

Tiempo.	Carga aplicada	Carga aplicada	Presion	Presion	Flexímetro N°1	Flexímetro N°2	Flexímetro N°3	Decisión Logica (Flex 1)	Decisión Logica (Flex 2)	Decisión Logica (Flex 3)	flex 1	flex 2	flex 3	deflexion promedio	deflexion promedio	modulo de reaccion(k/u)														
min.	Lbs.	Kgs.	Lbs/pulg <sup>2</sup>	Kpa	mm/100.	mm/100.	mm/100.	-	-	-				mm	in	lb/in <sup>2</sup>														
0	3365,01	1529,55	4,8	32,82	80,00	99,00	87,00	continuar	continuar	aceptar	4,00	4,00	0,00	0,73	0,0287	331,28	continuar													
0,50					78,00	97,00	87,00																							
1					73,00	95,00	85,00																							
2					72,00	94,00	85,00																							
4					72,00	93,00	85,00																							
10					15,00																									
0	6730,02	3059,1	9,5	65,65	36,00	58,00	55,00	continuar	continuar	aceptar	6,00	6,00	0,00	0,73	0,0287	331,28	continuar													
0,5					33,00	55,00	55,00																							
1					30,00	54,00	54,00																							
2					29	54,00	54,00																							
4					28,00	52,00	52,00																							
					30,00																									
0	10116,1	4589	14,31	98,47	10,00	12,00	29,00	continuar	continuar	continuar	10,00	4,00	4,00	0,14	0,0053															
0,5					5,00	10,00	27,00																							
1					4,00	9,00	27,00																							
3					3,00	8,00	26,00																							
6					2,00	6,00	25,00																							
					45,00																									
0	13460	6118	19,04	131,29	59,00	85,00	78,00	aceptar	aceptar	aceptar	2,00	2,00	2,00	0,73	0,0286															
0,5					58,00	84,00	77,00																							
1					58,00	83,00	76,00																							
2					58,00	82,00	75,00																							
3																														
4					60,00																									
0	16825,1	7648	23,80	165,76	46,00	67,00	18,00	continuar	continuar	aceptar	6,00	4,00	0,00	0,42	0,0165															
0,5					43,00	65,00	18,00																							
3					43,00	65,00	17,00																							
5					41,00	65,00	16,00																							
					75,00																									
0					20190,1	9177	28,56											200,23	87,00	14,00	40,00	aceptar	aceptar	aceptar	2,00	-4,00	2,00	0,48	0,0188	
0,5	86,00	16,00	39,00																											
1	87,00	18,00	39,00																											
2	88,00	19,00	40,00																											
4																														
15	90,00																													
0	Descarga				27	95	97																							
0,5					85	25	95																							
1					70	20	95																							
2					60	27	4																							
4					58	50	4																							
15																														
20																														



Elaborado por:  
*Romario Melean*  
T.S.U Ramiro Melean

Supervisado en campo por:  
Tahiry Luques

Revisado y aprobado por:  
Ing. Roberto Centeno W.  
C.I.

**CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS S.C.**  
 Ingenieros Consultores.  
 Caracas, Venezuela.

OBRA: AISB  
 UBICACIÓN: PLATAFORMA REMOTA  
 CLIENTE: C.N.O

FECHA: 17/11/2014  
 Hora de inicio: 10:00 a.m.  
 Hora de terminación: 11:20 a.m.  
 Estado del tiempo al inicio: BUENO  
 Estado del tiempo al terminar: BUENO

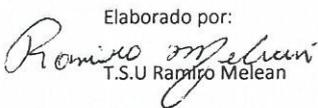
**PRUEBA DE CARGA CON PLATO  
 AASHTO T-222-81**

(Procedimiento de aplicación de carga N°2 , Seccion 4.4.2)

**Datos Preliminares:**

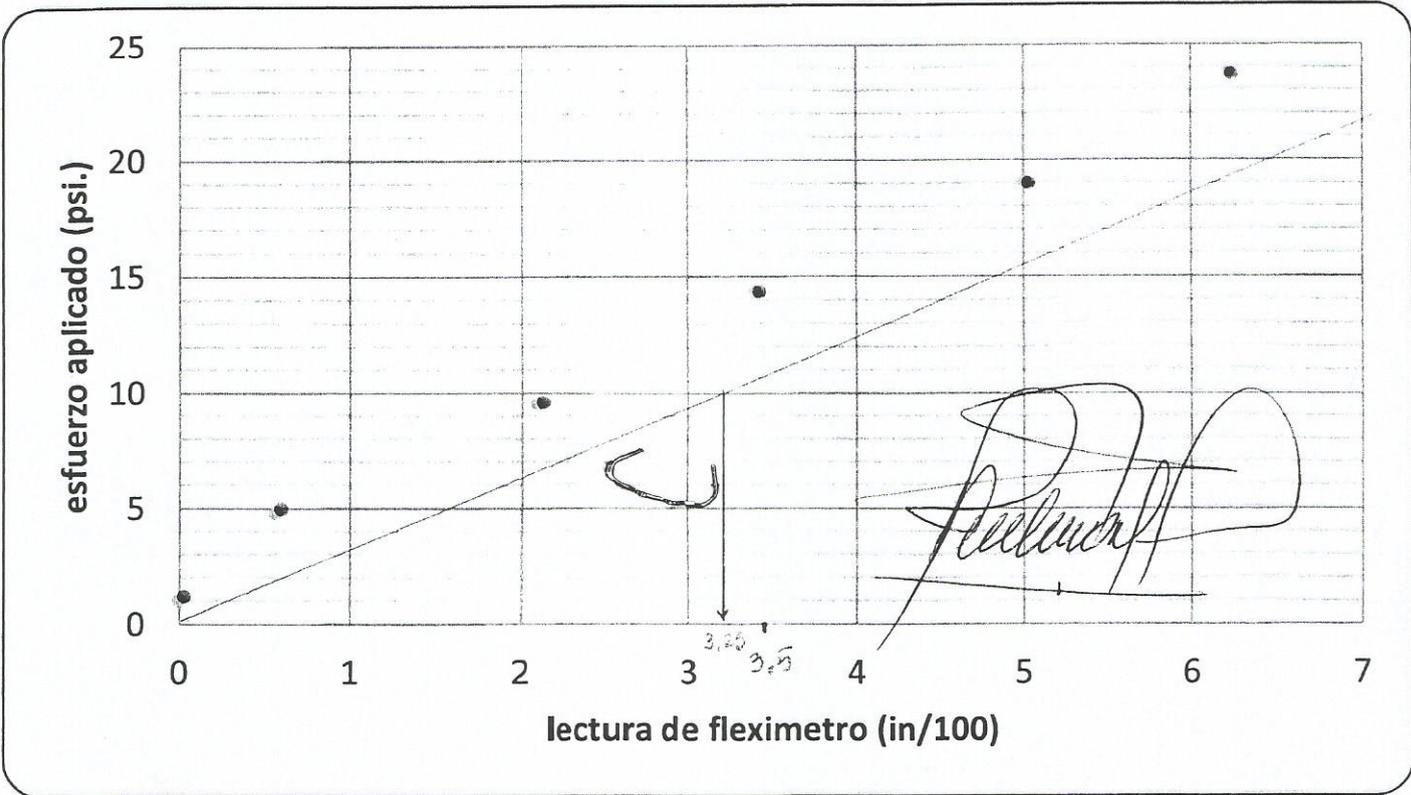
Peso del gato	tamaño de los platos.	peso de los platos	peso del elemento de transferencia	peso del instrumento de medición de carga	marca de Flexímetros	precisión de flexímetros	diametro del plato inferior	area del plato inferior	carga de asiento	Presion de asiento
(Lbs.)	(Pulgadas)	(Lbs.)	(Lbs)	(Lbs)			(pulgadas)	(pulgadas cuadradas)	(Lbs)	(Lbs/pulgada <sup>2</sup> )
43,51	8"	15,03	10,62	8,84	MITUTOYO	0,001 mm.	30	706,86	1414	2,00
	12"	32,35								
	18"	72,63								
	24"	129,11								
	30"	207,30								

Esfuerzo aplicado (Psi)	Fleximetro 1 Deformacion (mm/100.)	Fleximetro 2 Deformacion (mm/100.)	Fleximetro 3 Deformacion (mm.)	Promedio de deformacion en mm/100	Deformacion en (mm/100)	lectura de los dos diales del fleximetro	lectura de los dos diales del fleximetro (in/100)	Modulo (k) sin corrección (para 10 psi.)	Modulo (k) corregido
1	0	0	0	0	0	0	0	331 Pci.	ver grafico
4,8	75,00	95,60	85,8	85,47	14,53	14,53	0,57		
9,5	31,20	54,60	54,00	46,60	53,40	53,40	2,10		
14,31	4,80	9,00	26,80	13,53	86,47	86,47	3,40		
19,04	58,25	83,50	76,50	72,75	27,25	127,25	5,01		
23,8	43,00	65,50	17,25	41,92	58,08	158,08	6,22		

Elaborado por:  
  
 T.S.U Ramiro Melean

Supervisado en campo por:  
 Aux. Ing Tahiry Luques

Revisado y Aprobado por:  
  
 Ing. Roberto Centeno W.  
 C.I.V 2876



$$K = \frac{10 \text{ Psi}}{3,25 \text{ in}/100} = 308 \text{ Psi}$$

Obra: Aeropuerto Internacional Simon Bolivar  
 Cliente: Constructora Norberto Odebrecht  
 Ubicación: Maiquetia, Edo. Vargas.

Fecha: 04/05/2015

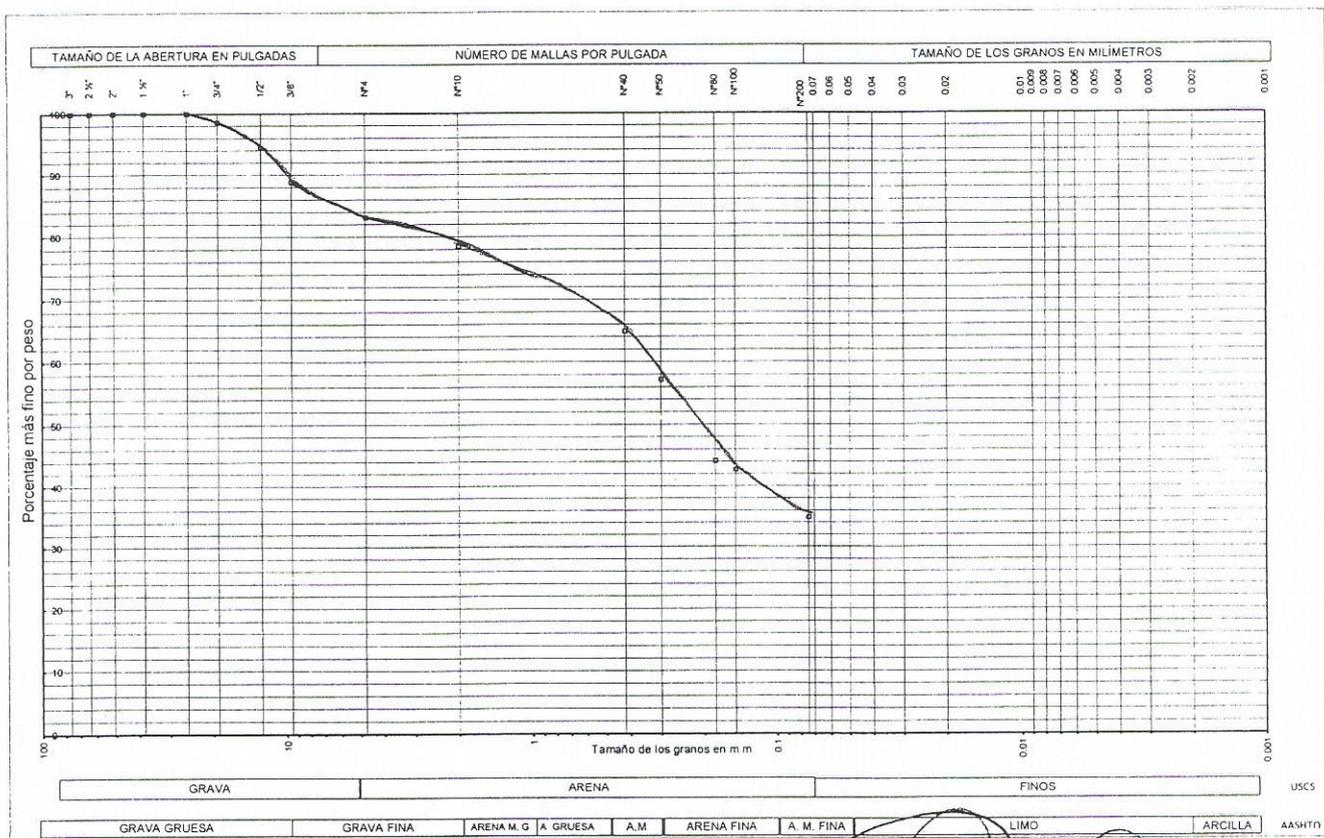
Muestra: CALICATA 1 ( M-1)

**ENSAYO DE GRANULOMETRIA**  
ASTM D-422-02

PESO TOTAL MUESTRA (g): 725.96  
 PESO MUESTRA LAVADA (g): 472.76

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido en tamiz	% Retenido acumulado	% Pasante
4 "				
3 "				
2 1/2 "				
2 "				
1 1/2 "				
1 "				
3/4 "	9.97	1.37	1.37	98.63
1/2 "	30.20	4.16	5.53	94.47
3/8 "	40.90	5.63	11.17	88.83
Nº 4	41.05	5.65	16.82	83.18
Nº 10	34.54	4.76	21.58	78.42
Nº 40	98.10	13.51	35.09	64.91
Nº 50	55.86	7.69	42.79	57.21
Nº 80	94.83	13.06	55.85	44.15
Nº 100	10.28	1.42	57.27	42.73
Nº 200	57.04	7.86	65.12	34.88
Pasa Nº 200	253.20	34.88	100.00	

% grava= 16.8  
 % arena= 48.3  
 % finos= 34.9



Laboratorista  
 TSU Ramiro Meleán

Revisado  
 Tabiry Ligués  
 Auxiliar de Ingeniero

Aprobado  
 Ing. Roberto Centeno Werner  
 CIV 2.876

OBRA: Aeropuerto Internacional Simon Bolivar  
UBICACIÓN: AISB

FECHA: jueves, 30 de abril de 2015

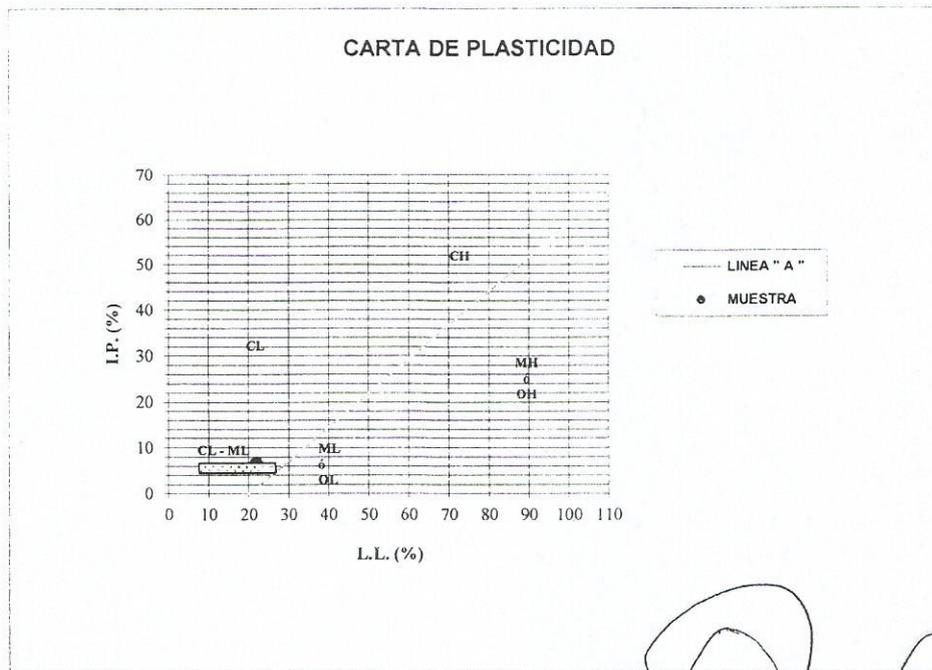
ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA  
ASTM D-4318-95

MUESTRA: Calicatas

Golpes Platillo	Envase N°	Peso (g.)					humedad (%)	Limite Liquido (%)
		Peso envase	envase + suelo humedo	envase + suelo seco	agua	suelo seco		
25	220	28,50	41,17	38,90	2,27	10,40	21,83	21,83
27	256	28,16	39,96	37,82	2,14	9,66	22,15	22,36
30	LL3	28,49	40,20	38,15	2,05	9,66	21,22	21,69

Envase N°	Peso (g.)					Limite Plástico (%)
	Peso envase	envase + suelo humedo	envase + suelo seco	agua	suelo seco	
LP55	10,05	13,80	13,30	0,50	3,25	15,38
LP22	10,11	13,27	12,84	0,43	2,73	15,75
LP25	10,02	13,77	13,29	0,48	3,27	14,68

RESULTADOS (%)	
LL =	22,0
LP =	15,3
IP =	6,7



Laboratorista  
*Ramiro Meleán*  
TSU Ramiro Meleán

Revisado  
*Tatiana Luques*  
Tatiana Luques  
Auxiliar de Ingeniero

Aprobado  
*Roberto Centeno Werner*  
Ing Roberto Centeno Werner  
CIV 2.876

**CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS**

Ingenieros Consultores

Caracas, Venezuela

Fecha: 30/04/2015

**ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA**

ASTM D-854-00

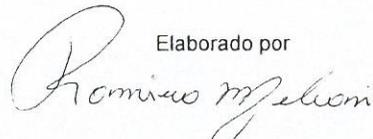
OBRA: Aeropuerto Internacional Simon Bolivar

UBICACIÓN: AISB

MUESTRA: Calicatas

Muestra		M-2	M-9
Picnómetro N°		1	2
Capacidad Picnómetro(cm <sup>3</sup> )		250	250
Pesos (g)	Tara del Picnómetro	105,78	103,27
	Picnómetro + Suelo Seco	167,62	164,99
	Suelo Seco ( $W_o$ )	61,84	61,72
	Picnom. + Agua + Suelo ( $W_1$ )	394,22	391,76
	Picnom. Lleno de agua ( $W_2$ )	354,58	352,20
Temperatura del Ensayo (°C)		23,0	23,0
Gravedad Especifica referida a Temperatura del Ensayo ( $G_s$ )		2,79	2,79
Gravedad Especifica referida a Temperatura de 20 °C ( $G_s$ 20°)		2,78	2,78

$$G_s = \frac{W_o}{W_o - (W_1 - W_2)}$$



Elaborado por

Ramiro Melean  
Laboratorista

Revisado por

Tahiry Luques  
Auxiliar de Ingeniero

Aprobado por

Ing. Roberto Centeno Werner  
C.I.V 2876

MUESTRA	CALICATAS	PROCEDECIA	Aeropuerto Internacional Simon Bolivar
Peso Molde (gr)	6.032	VOLUMEN (CC)	2.091,10
OBRA	AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMON BOLIVAR MAIQUETIA		

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO EN LA MUESTRA ANALIZADA

PARA CALCULO DEL PESO UNITARIO SECO DE LA MUESTRA COMPACTADA	ENERGIA COMPACTACION					ASTM D 1557	
PUNTO DE LA CURVA DE COMPACTACION	1	2	3	4	5	6	7
MOLDE+SUELO HUMEDO (gramos)	10.695,00	10.857,00	10.903,00	10.798,00	10.510,00		
PESO DE SUELO HUMEDO (gramos)	4.663,00	4.825,00	4.871,00	4.766,00	4.478,00		
DENSIDAD HUMEDA( Kg/m3)	2.229,93	2.307,40	2.329,40	2.279,18	2.141,46		
HUMEDAD PROMEDIO PARA EL PUNTO (%)	5,91	7,69	9,18	11,80	16,95		
DENSIDAD SECA (kg/m3))	2.105,44	2.142,58	2.133,61	2.038,68	1.831,10		

DETERMINACION DE HUMEDADES DE COMPACTACION

IDENTIFICACION DEL ENVASE	TARA ENVASE VACIO	ENVASE MAS SUELO HUMEDO	ENVASE MAS SUELO SECO	AGUA CONTENIDA	PESO DE SUELO SECO	PORCENTAJE HUMEDAS SSS	HUMEDAD PROMEDIO
-	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	%	%
10	22,73	215,29	204,61	10,68	181,88	5,87	
47	22,73	215,29	204,47	10,82	181,74	5,95	5,913
15	23,45	203,76	190,72	13,04	167,27	7,80	
37	23,44	203,76	191,04	12,72	167,6	7,59	7,693
33	23,1	182,81	168,98	13,83	145,88	9,48	
40	23,14	181,81	168,88	12,93	145,74	8,87	9,176
47	22,73	206,96	187,54	19,42	164,81	11,78	
10	22,73	206,96	187,50	19,46	164,77	11,81	11,797
39	22,12	193,85	169,20	24,65	147,08	16,76	
46	22,16	193,85	168,730	25,12	146,57	17,14	16,949

RELACIONES DE VACIO Y GRADOS DE SATURACION

P U AGUA (Kg/m3)

1.000,00

GRAVEDAD ESPECIFICA SOLIDOS

2,78

PUNTO DE LA CURVA DE COMPACTACION	1	2	3	4	5	6	7
DENSIDAD SECA EN KG/M3	2.105,44	2.142,58	2.133,61	2.038,68	1.831,10		
RELACION DE VACIOS	0,320	0,298	0,303	0,364	0,518		
HUMEDAD DE COMPACTACION	5,913	7,693	9,176	11,797	16,949		
GRADO DE SATURACION (%)	51,30	71,88	84,20	90,19	90,93		
HUMEDAD DE SATURACION	11,52	10,70	10,90	13,08	18,64		
HUMEDAD PARA 95 % SALURACION	10,95	10,17	10,35	12,43	17,71		
HUMEDAD PARA EL 90 % DE SATURACION	10,37	9,63	9,81	11,77	16,78		
HUMEDAD PARA EL 85 % DE SATURACION	9,80	9,10	9,26	11,12	15,84		
HUMEDAD PARA EL 80 % DE SATURACION	9,22	8,56	8,72	10,46	14,91		
HUMEDAD PARA EL 75 % DE SATURACION	8,64	8,03	8,17	9,81	13,98		
HUMEDAD PARA EL 70 % DE SATURACION	8,07	7,49	7,63	9,16	13,05		

DENSIDAD MAXIMA SECA (KG/M3)

2.145

RELACION VACIOS PUNTO OPTIMO

0,30

DECISION SOBRE DENSIDAD MAXIMA SECA Y HUMEDAD OPTIMA

CORRECTO

HUMEDAD OPTIMA ASTM D 1557

8,6 %

GRADO DE SATURACION

80,76 %

Laboratorista

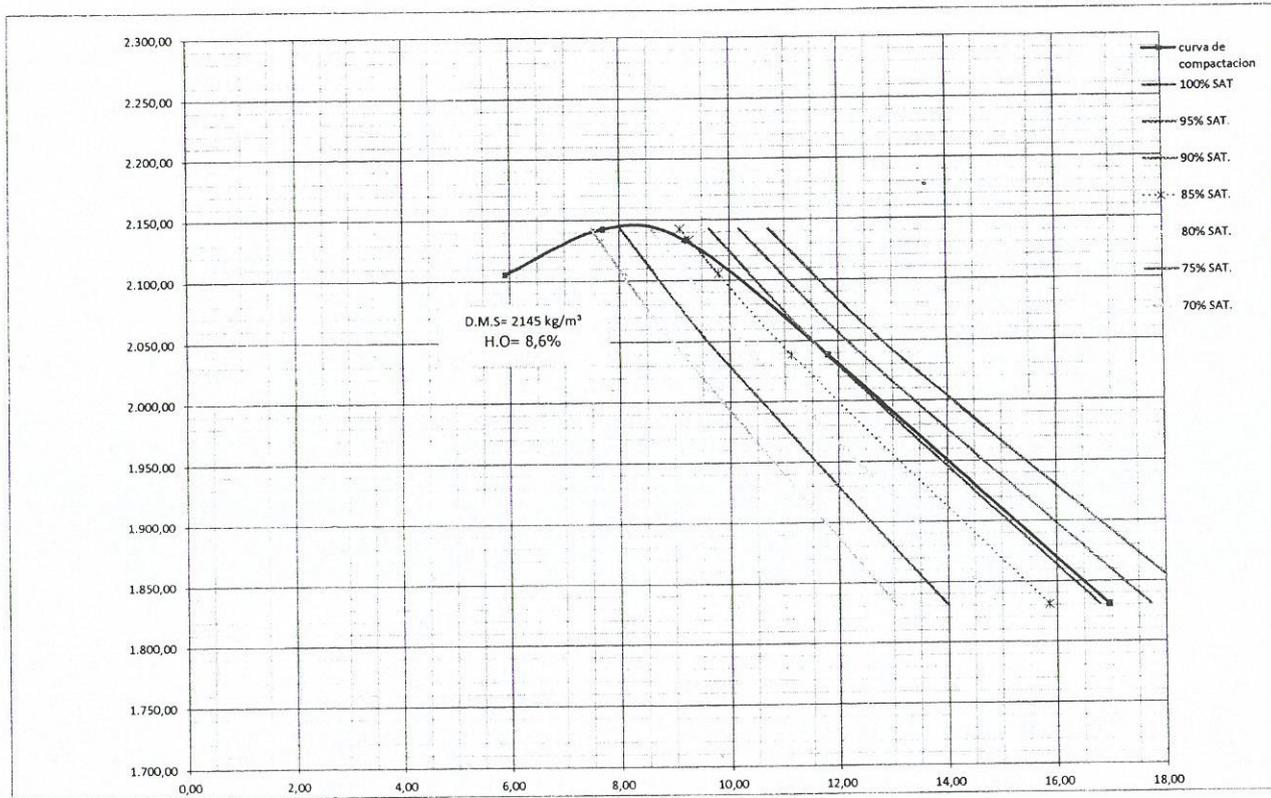
TSU Ramiro Meleán

Revisado

Tahir Luques

Aprobado

Ing Roberto Centeno Werner  
CIV 2.876



Laboratorista Revisado  
 TSU Ramiro Melean Ramiro Lucches

Aprobado  
 Ing Roberto Centeno Werner  
 CIV 2.876

ENSAYO DE PENETRACION CBR

MUESTRA	calicatas	
FECHA	04/05/2015	
NORMA APLIC.	ASTM	D 1883-99
PROCEDENCIA	AISB	
OBRA	AISB	

EQUIPO DE PENETRACION	Leonard Farnell Electrico	
VELOCIDAD	1,27	mm/min
Anillo calibrado en Laboratorio de Materiales UCAB		

DATOS DEL ANILLO DE CARGA LEONARD FARNELL 1514 DIV MAX 1330

Factor de anillo	4,006	8,787	libras/div	Area de Piston (in2)	3
------------------	-------	-------	------------	----------------------	---

DATOS DEL PROCTOR MODIFICADO

Densidad Maxima Seca	2.150	Humedad Optima	8,6	Grado Saturacion %	81,59
----------------------	-------	----------------	-----	--------------------	-------

DATOS DE COMPACTACION DE MOLDES CBR CALIBRADOS

MOLDE N°	1	56 G/C	MOLDE N°	2	25 G/C	MOLDE N°	3	12 G/C
Peso molde sin suelo	7.095,00	Peso molde sin suelo	7.016,00	Peso molde sin suelo	7.144,00			
Peso molde + suelo hum	11.851,00	Peso molde + suelo hum	11.863,00	Peso molde + suelo hum	11.692,00			
Volumen Molde cm3	4.756,00	Volumen Molde cm3	4.847,00	Volumen Molde cm3	4.548,00			
Densidad Humeda Kg/m3	2.249,70	Densidad Humeda Kg/m3	2.349,87	Densidad Humeda Kg/m3	2.110,90			
Humedad Promedio %	9,30	Humedad Promedio %	9,32	Humedad Promedio	8,78			
Densidad Seca Kg/m3	2.058	Densidad Seca Kg/m3	2.150	Densidad Seca (Kg/m3)	1.941			
Densidad Lograda % DMS	95,74	Densidad Lograda % DMS	99,98	Densidad Lograda % DMS	90,26			

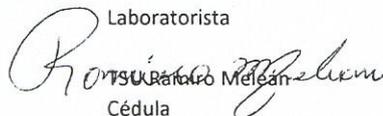
DATOS REFERENTES A LA PENETRACION DE LOS MOLDES DE SUELO COMPACTADO

Divisiones del DIAL VERTICAL	MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2
0,025	8	70,3	23,43	1,5	13,18	4,39	1,5	13,18	4,39
0,050	24	210,9	70,30	3,5	30,75	10,25	5	43,94	14,65
0,075	45	395,4	131,81	7,5	65,90	21,97	9	79,08	26,36
0,100	65	571,2	190,39	13,5	118,62	39,54	13	114,23	38,08
0,125	85	746,9	248,97	23	202,10	67,37	17	149,38	49,79
0,150	108	949,0	316,33	32	281,18	93,73	23	202,10	67,37
0,175	128	1124,7	374,91	42	369,05	123,02	27	237,25	79,08
0,200	148	1300,5	433,49	50	439,35	146,45	31	272,40	90,80
0,300	221	1941,9	647,31	85	746,90	248,97	44	386,63	128,88
0,400	276	2425,2	808,41	110	966,57	322,19	67	588,73	196,24

ensayo de Expansión	cm.	Pulgadas	cm.	pulgadas	cm.	Pulgadas.		
							alt, molde	17,70
tiempo en hrs transcurrido	lect. 0,001 "	dif	exp %	lect	dif	exp. %	dif.	exp. %
0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0
24	20	20,00	0,3	10	10,00	0,1	5	0,1
48	20	20,00	0,3	13	13,00	0,2	10	0,1
72								

Gs 2,78

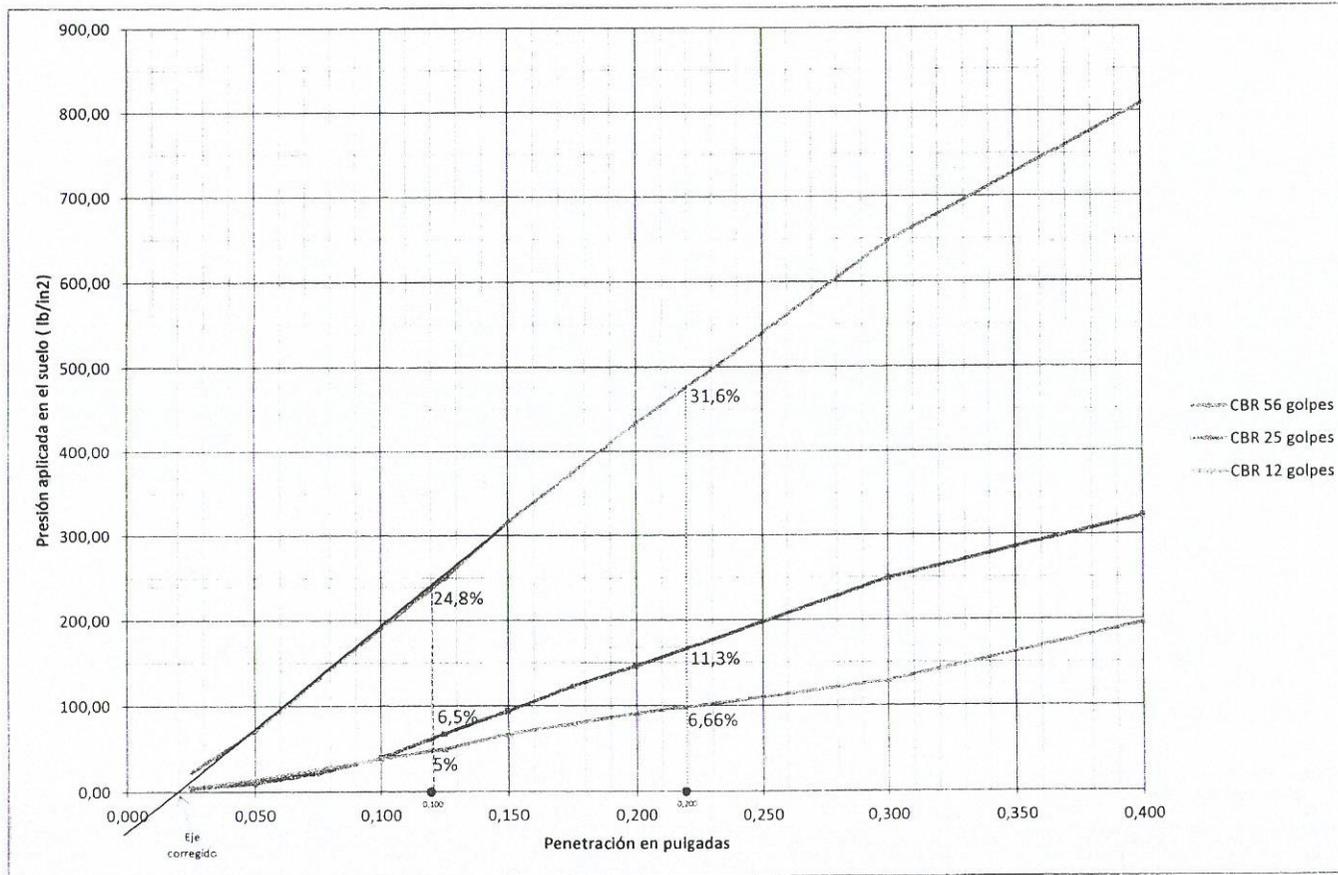
Nota: Para cálculo del CBR ver gráfico anexo 1

Laboratorista  
  
 Robinson Meléndez  
 Cédula

Revisado  
  
 Tahiry Luques  
 Cédula

Aprobación  
 Ing Roberto Centeno W  
 CIV 2,876

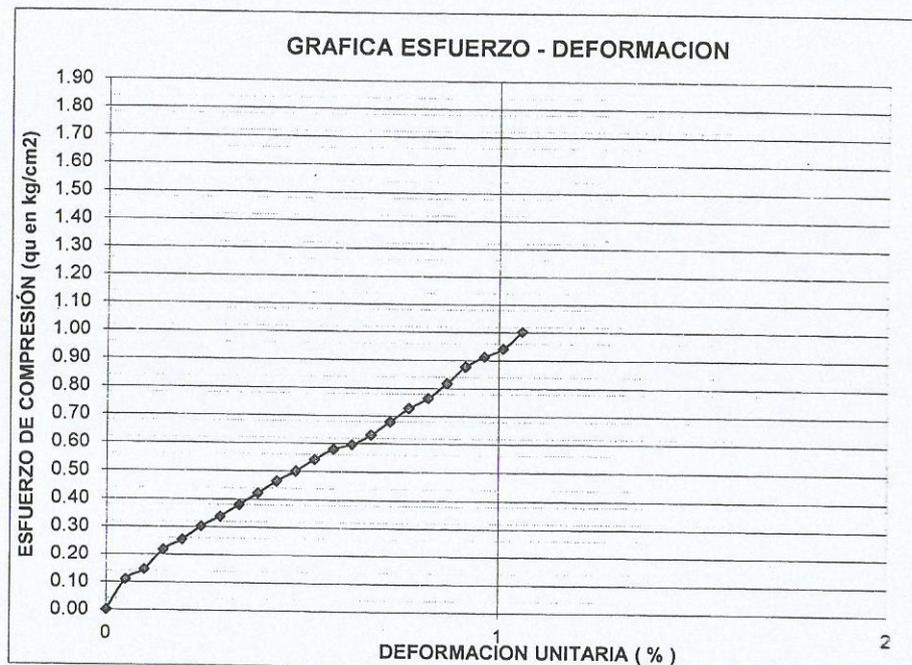
Grafico de Ensayo de CBR



**ENSAYO DE COMPRESION SIN CONFINAR**

Muestra N°: **SUELO 2**      Diámetro: **5.06 cm**  
 Gr: **2.73**      Área inicial: **20.11 cm**      Anillo N°: **1516**  
 Long. inicial: **10.40 cm**      Calibración: **0.122 kg/div**  
**Foto de Falla**

Lectura dia de carga	Deformación vertical $\Delta L$		Deformación axial unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0 (\%)$	$1 - \epsilon$	Área corregida $A = A_0 / (1 - \epsilon)$	Carga ( kg )	Esfuerzo unitario ( kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante ( kg/cm <sup>2</sup> )
	( mm/100 )	( cm )						
0.0	0.0	0.00	0.00	1.000	20.11	0.00	0.00	0.00
18.0	5.0	0.01	0.05	1.000	20.12	2.20	0.11	0.05
24.0	10.0	0.01	0.10	0.999	20.13	2.93	0.15	0.07
36.0	15.0	0.02	0.14	0.999	20.14	4.39	0.22	0.11
42.0	20.0	0.02	0.19	0.998	20.15	5.12	0.25	0.13
50.0	25.0	0.03	0.24	0.998	20.16	6.10	0.30	0.15
58.0	30.0	0.03	0.29	0.997	20.17	6.83	0.34	0.17
53.0	35.0	0.04	0.34	0.997	20.18	7.69	0.38	0.19
70.0	40.0	0.04	0.38	0.996	20.19	8.54	0.42	0.21
77.0	45.0	0.05	0.43	0.996	20.20	9.39	0.47	0.23
83.0	50.0	0.05	0.48	0.995	20.21	10.13	0.50	0.25
90.0	55.0	0.06	0.53	0.995	20.22	10.98	0.54	0.27
96.0	60.0	0.06	0.58	0.994	20.23	11.71	0.58	0.29
99.0	65.0	0.07	0.63	0.994	20.24	12.08	0.60	0.30
105.0	70.0	0.07	0.67	0.993	20.25	12.81	0.63	0.32
113.0	75.0	0.08	0.72	0.993	20.26	13.79	0.68	0.34
121.0	80.0	0.08	0.77	0.992	20.26	14.76	0.73	0.36
127.0	85.0	0.09	0.82	0.992	20.27	15.49	0.76	0.38
136.0	90.0	0.09	0.87	0.991	20.28	16.59	0.82	0.41
146.0	95.0	0.10	0.91	0.991	20.29	17.81	0.88	0.44
152.0	100.0	0.10	0.96	0.990	20.30	18.54	0.91	0.46
157.0	105.0	0.11	1.01	0.990	20.31	19.15	0.94	0.47
167.0	110.0	0.11	1.06	0.989	20.32	20.37	1.00	0.50



## ENSAYO DE COMPRESION SIN CONFINAR

Muestra N° SUELO 2

Diámetro: 5.10 cm

Área inicial: 20.43 cm

Long. inicial: 10.28 cm

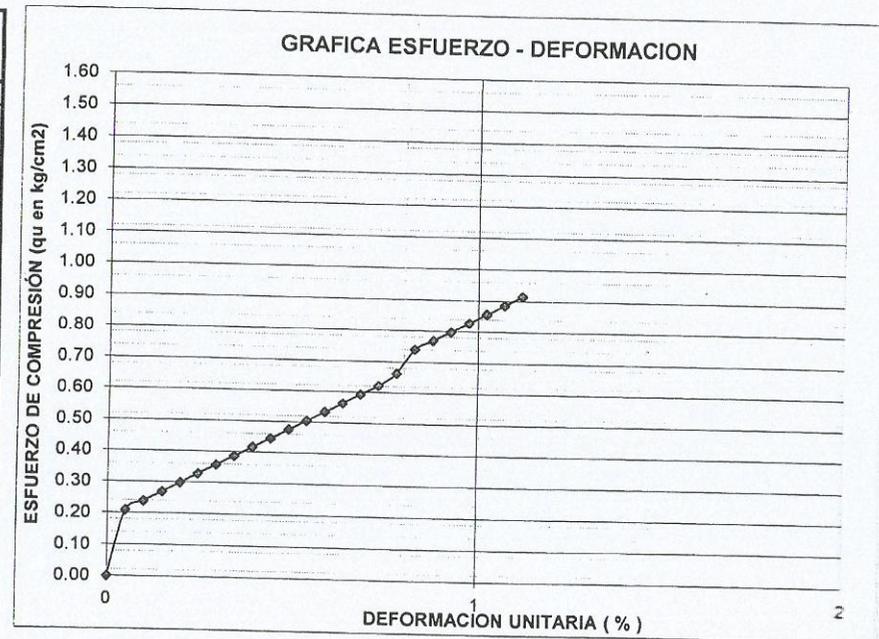
Anillo N°: 1516

Calibración: 0.122 kg/div

Foto de Falla

Gs: 2.73

Lectura dial de carga	Deformación vertical $\Delta L$		Deformación axial unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$ (%)	$l - \epsilon$	Área corregida $A = A_0 / (1 - \epsilon)$	Carga (kg)	Esfuerzo unitario (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante (kg/cm <sup>2</sup> )
	(mm/100)	(cm)						
0.0	0.0	0.00	0.00	1.000	20.43	0.00	0.00	0.00
35.0	5.0	0.01	0.05	1.000	20.44	4.27	0.21	0.10
40.0	10.0	0.01	0.10	0.999	20.45	4.88	0.24	0.12
45.0	15.0	0.02	0.15	0.999	20.46	5.49	0.27	0.13
50.0	20.0	0.02	0.19	0.998	20.47	6.10	0.30	0.15
55.0	25.0	0.03	0.24	0.998	20.48	6.71	0.33	0.16
60.0	30.0	0.03	0.29	0.997	20.49	7.32	0.36	0.18
65.0	35.0	0.04	0.34	0.997	20.50	7.93	0.39	0.19
70.0	40.0	0.04	0.39	0.996	20.51	8.54	0.42	0.21
75.0	45.0	0.05	0.44	0.996	20.52	9.15	0.45	0.22
80.0	50.0	0.05	0.49	0.995	20.53	9.76	0.48	0.24
85.0	55.0	0.06	0.54	0.995	20.54	10.37	0.50	0.25
90.0	60.0	0.06	0.58	0.994	20.55	10.98	0.53	0.27
95.0	65.0	0.07	0.63	0.994	20.56	11.59	0.56	0.28
100.0	70.0	0.07	0.68	0.993	20.57	12.20	0.59	0.30
105.0	75.0	0.08	0.73	0.993	20.58	12.81	0.62	0.31
112.0	80.0	0.08	0.78	0.992	20.59	13.66	0.66	0.33
125.0	85.0	0.09	0.83	0.992	20.60	15.25	0.74	0.37
130.0	90.0	0.09	0.88	0.991	20.61	15.86	0.77	0.38
135.0	95.0	0.10	0.92	0.991	20.62	16.47	0.80	0.40
140.0	100.0	0.10	0.97	0.990	20.63	17.08	0.83	0.41
145.0	105.0	0.11	1.02	0.990	20.64	17.69	0.86	0.43
150.0	110.0	0.11	1.07	0.989	20.65	18.30	0.89	0.44
155.0	115.0	0.12	1.12	0.989	20.66	18.91	0.92	0.46



OBRA Aeropuerto Internacional Simon Bolivar  
UBICACION: Maiquetia  
PROCEDENCIA: Umbral 28.  
CLIENTE: C.N.O  
MATERIAL: Material Rojizo  
Profundidad de la calicata: 0,20 metros.  
de la cota de la plataforma terminada el día 24/09/2014

FECHA: 9/24/2014  
Hora de inicio de colocacion de equipo: 11:00 AM  
Hora de inicio de la prueba: 3:00 PM  
Hora de terminacion: 5:00 PM  
Estado del tiempo al inicio: Bueno  
Estado del tiempo al terminar: Bueno

PRUEBA DE CARGA CON PLATO PARA PISTAS DE AEROPUERTO.  
AASHTO T-222-81  
(Procedimiento de aplicación de carga N°2, Seccion 4.4.2)

Datos Preliminares:

tamaño de los platos	Tipo de Instrumento de medicion de carga	peso del Instrumento de medicion de carga	marca de Flexímetros	precision de flexímetros	diametro del plato inferior	area del plato inferior	carga de asiento	Presion de asiento
Pulg.		(Lbs)			(pulgadas)	(pulgadas cuadradas)	(Lbs)	(Lbs/in <sup>2</sup> )
8"	CELDA SIS GEO 500 KN	4,00	MITUTOYO	0,01 mm.	30	706,86	1414	2,00
12"								
18"								
24"								
30"								

Tiempo	Carga aplicada	Carga aplicada	Presion	Presion	Fleximetro N°1	Fleximetro N°2	Fleximetro N°3	Decisión Logica (Flex 1)	Decisión Logica (Flex 2)	Decisión Logica (Flex 3)	flex 1	flex 2	flex 3	deflexion promedio	deflexion promedio	modulo de reaccion (k'u)
min.	Lbs.	Kgs.	Lbs/pulg <sup>2</sup>	Kpa	mm/100.	mm/100.	mm/100.	-	-	-	-	-	-	mm	in	lb/in <sup>2</sup>
0	3365,01	1529,55	4,8	32,82	95,00	94,00	91,00	continuar	continuar	aceptar	3,00	3,00	2,00	0,86	0,0337	282,52
2					89,00	88,00	87,00	aceptar	continuar	aceptar	2,33	2,67	2,00			
3					88,00	86,00	85,00	aceptar	aceptar	aceptar	2,75	2,50	2,25			
4					84,00	84,00	82,00	aceptar	aceptar	aceptar	2,20	2,00	1,40			
5					84,00	84,00	84,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,50	2,00	0,00			
0	6730,02	3059,1	9,5	65,65	83,00	85,00	85,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,00	2,00	0,00	0,34	0,0135	0,0286
1					83,00	83,00	85,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,50	0,50	0,00			
2					82,00	82,00	85,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,67	0,33	0,00			
3					81,00	81,00	85,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,50	0,25	0,25			
4					81,00	80,00	84,00	aceptar	aceptar	aceptar	1,00	4,00	2,00			
0	10116	4589	14,31	98,67	74,00	59,00	60,00	aceptar	continuar	aceptar	1,00	4,00	2,00	0,62	0,0243	0,0290
1					73,00	55,00	58,00	aceptar	aceptar	aceptar	1,00	2,50	2,00			
2					72,00	54,00	56,00	aceptar	aceptar	aceptar	1,00	1,67	1,33			
3					71,00	54,00	56,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,50	1,00	0,50			
1	13460	6118	19,04	131,29	53,00	25,00	31,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,50	1,00	0,50	0,73	0,0286	0,0290
2					52,00	23,00	30,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,67	1,33	1,00			
3					51,00	21,00	28,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,75	1,00	1,00			
4					50,00	21,00	27,00	aceptar	aceptar	aceptar	1,00	0,00	2,00			
0	16825	7648	23,80	164,11	27,00	95,00	101,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,67	1,33	0,67	0,73	0,0286	0,0290
1					26,00	99,00	99,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,75	1,25	0,50			
3					25,00	91,00	99,00	aceptar	aceptar	aceptar	2,00	2,00	2,00			
4					24,00	90,00	99,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,00	-1,00	1,00			
0	20190,06	9177	28,56	196,94	97,00	61,00	64,00	aceptar	aceptar	aceptar	2,00	2,00	2,00	0,74	0,0290	0,0290
0,5					96,00	60,00	63,00	aceptar	aceptar	aceptar	0,00	-1,00	1,00			
1					97,00	62,00	63,00	aceptar	aceptar	aceptar						
0	Descarga				27	95	97									
0,5					85	95	94									
1					70	95	90									
2					60	4	96									
4					58	4	98									

Nota:

Personal:  
Ramiro Melean  
Robert Paz  
Jose Antonio Verde  
Jose L. Garcia  
Rafael Pantoja

En la presencia de:  
Ing. Jairo Casais  
T.Y LIN

Elaborado por:  
*Ramiro Melean*  
T.S.U Ramiro Melean

Supervisado en campo por:  
Tahiry Luques  
Asistente de Ingeniero.

Revisado y Aprobado por:  
*Roberto Centeno W.*  
C.I.V. 2879

**CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS S.C.**

Ingenieros Consultores.  
Caracas, Venezuela.

**OBRA:** Aeropuerto Internacional Simon Bolivar  
**UBICACIÓN:** Maiquetia  
**PROCEDENCIA:** Fila de Machado.  
**CLIENTE:** C.N.O  
**MATERIAL:** Material Rojizo  
**Profundidad de la calicata:** 0,20 metros.  
de la cota de la plataforma terminada el dia 24/09/2014

**FECHA:** 9/24/2014  
**Hora de inicio de colocacion de equipo:** 11:00 AM  
**Hora de inicio de la prueba:** 3:00 PM  
**Hora de terminacion:** 5:00 PM  
**Estado del tiempo al inicio:** Bueno  
**Estado del tiempo al terminar:** Bueno

**PRUEBA DE CARGA CON PLATO**  
**AASHTO T-222-81**  
(Procedimiento de aplicación de carga N°2 , Seccion 4.4.2)

**Datos Preliminares:**

Peso del gato	tamaño de los platos.	peso de los platos	peso del elemento de transferencia.	peso del instrumento de medición de carga.	marca de Flexímetros	precisión de flexímetros	diametro del plato inferior	area del plato inferior	carga de asiento	Presion de asiento
(Lbs.)	(Pulgadas)	(Lbs.)	(Lbs)	(Lbs)			(pulgadas)	(pulgadas cuadradas)	(Lbs)	(Lbs/in2)
43,51	8" 12" 18" 24" 30"	6,00 32,35 32,00 58,00 94,00	4,00	4,00	MITUTOYO	0,01 mm	30	706,86	1414	2,00

Esfuerzo aplicado (Psi)	Fleximetro 1 Deformacion (mm/100.)	Fleximetro 2 Deformacion (mm/100.)	Fleximetro 3 Deformacion (mm.)	Promedio de deformacion en mm/100	Deformacion en (mm/100)	lectura de los dos diales del fleximetro (mm/100)	lectura de los dos diales del fleximetro (in/100)	Modulo (k) sin corrección (para 10 psi.)	Modulo (k) corregido
3	0	0	0	0	0	0	0		ver grafico
4	88,00	87,20	85,8	87,00	13,00	15,83	0,62		
9	82,00	82,20	84,80	83,00	17,00	63,00	2,48	283 Pci.	270 Pci.
14	72,50	55,50	57,50	61,83	38,17	126,27	4,97		
19	51,50	22,50	29,00	34,33	65,67	178,67	7,03		
23	25,50	92,75	99,5	72,58	27,42	237,08	9,33		

**NOTA:**

Por tratarse de un suelo fino algo plastico, no se requiere corrección por saturacion.  
la correccion por deflexion del plato es minima según figura (3.25) tomada de Geotecnia LNV., 1993. AASHTO T 222-81.

**Personal:**  
Ramiro Melean  
Robert Paz  
Jose Antonio Verde  
Jose L. Garcia  
Rafael Pantoja

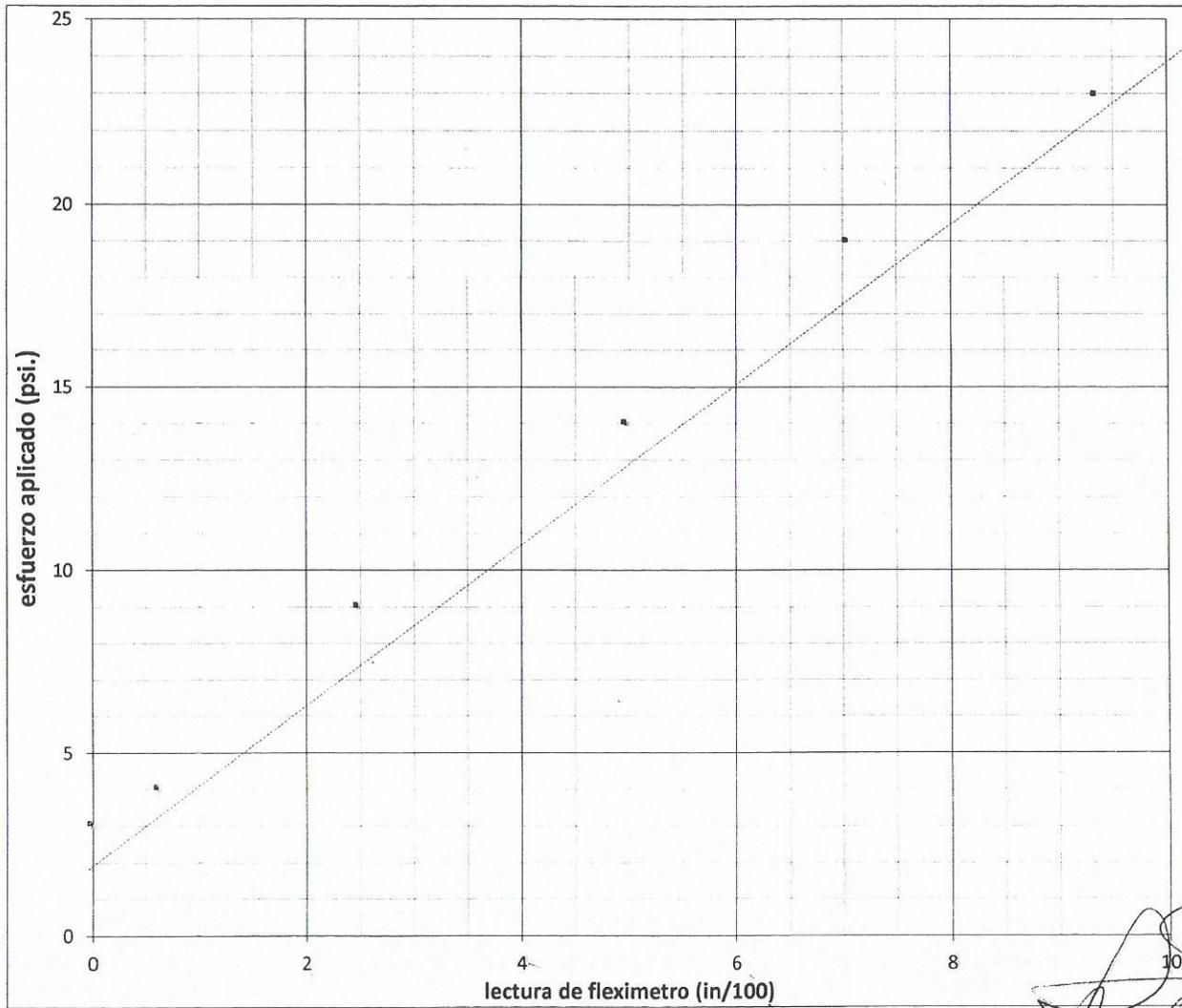
**En la presencia de:**  
Ing. Jairo Casais  
T.Y LIN

**Elaborado por:**  
*Ramiro Melean*  
T.S.U Ramiro Melean

**Supervisado en campo por:**  
Tahiry Luques  
Asistente de Ingeniero.

**Revisado y Aprobado por:**  
Ing. Roberto Centeno  
C.I.V 2876

Grafica Esfuerzo aplicado VS lectura del fleximetro  
Curva de Carga-Deformación.



*[Handwritten signature]*

MUESTRA	CANES	PROCEDENCIA	CANTERA NAIGUATA
Peso Molde (gr)	6.032	VOLUMEN (CC)	2.091,10
OBRA	AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMON BOLIVAR MAIQUETIA		
PROCEDENCIA:	Fuerzas Armadas.		

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO EN LA MUESTRA ANALIZADA

PARA CALCULO DEL PESO UNITARIO SECO DE LA MUESTRA COMPACTADA	ENERGIA COMPACTACION					ASTM D 1557	
PUNTO DE LA CURVA DE COMPACTACION	1	2	3	4	5	6	7
MOLDE+SUELO HUMEDO (gramos)	10.377,00	10.755,00	10.934,00	10.955,00	10.795,00		
PESO DE SUELO HUMEDO (gramos)	4.345,00	4.723,00	4.902,00	4.923,00	4.763,00		
DENSIDAD HUMEDA( Kg/m3)	2.077,85	2.258,62	2.344,22	2.354,26	2.277,75		
HUMEDAD PROMEDIO PARA EL PUNTO (%)	3,91	5,65	8,15	9,14	11,16		
DENSIDAD SECA (kg/m3)	1.999,68	2.137,83	2.167,50	2.157,13	2.049,09		

DETERMINACION DE HUMEDADES DE COMPACTACION

IDENTIFICACION DEL ENVASE	TARA ENVASE VACIO	ENVASE MAS SUELO HUMEDO	ENVASE MAS SUELO SECO	AGUA CONTENIDA	PESO DE SUELO SECO	PORCENTAJE HUMEDAS SSS	HUMEDAD PROMEDIO
	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	GRAMOS	%	%
H-99	14,67	165,02	159,70	5,32	145,03	3,67	
H-106	14,69	165,01	159,02	5,99	144,33	4,15	3,909
H-98	14,92	165,20	157,50	7,7	142,58	5,40	
H-102	14,95	165,20	156,83	8,37	141,88	5,90	5,650
H-87	14,91	150,89	140,82	10,07	125,91	8,00	
H-122	14,92	150,88	140,45	10,43	125,53	8,31	8,153
	22,71	191,22	177,11	14,11	154,4	9,14	
H-3	22,71	191,22	177,11	14,11	154,4	9,14	9,139
H-53	23,44	177,10	161,46	15,64	138,02	11,33	
H-43	23,45	177,10	161,890	15,21	138,44	10,99	11,159

RELACIONES DE VACIO Y GRADOS DE SATURACION

P U AGUA (Kg/m3) 1.000,00 GRAVEDAD ESPECIFICA SOLIDOS 2,79

PUNTO DE LA CURVA DE COMPACTACION	1	2	3	4	5	6	7
DENSIDAD SECA EN KG/M3	1.999,68	2.137,83	2.167,50	2.157,13	2.049,09		
RELACION DE VACIOS	0,395	0,305	0,287	0,293	0,362		
HUMEDAD DE COMPACTACION	3,909	5,650	8,153	9,139	11,159		
GRADO DE SATURACION (%)	27,60	51,67	79,21	86,91	86,11		
HUMEDAD DE SATURACION	14,17	10,93	10,29	10,52	12,96		
HUMEDAD PARA 95 % SALURACION	13,46	10,39	9,78	9,99	12,31		
HUMEDAD PARA EL 90 % DE SATURACION	12,75	9,84	9,26	9,46	11,66		
HUMEDAD PARA EL 85 % DE SATURACION	12,04	9,29	8,75	8,94	11,02		
HUMEDAD PARA EL 80 % DE SATURACION	11,33	8,75	8,24	8,41	10,37		
HUMEDAD PARA EL 75 % DE SATURACION	10,62	8,20	7,72	7,89	9,72		
HUMEDAD PARA EL 70 % DE SATURACION	9,92	7,65	7,21	7,36	9,07		

DENSIDAD MAXIMA SECA (KG/M3) 2.165 HUMEDAD OPTIMA ASTM D 1557 9,1 %  
RELACION VACIOS PUNTO OPTIMO 0,29 GRADO DE SATURACION 87,95 %  
DECISION SOBRE DENSIDAD MAXIMA SECA Y HUMEDAD OPTIMA CORRECTO

Laboratorista  
*Premiere Mejia*  
TSU Ramiro Meleán

Revisado  
Tahiry Luques

Aprobado  
*Roberto Centeno Werner*  
Ing. Roberto Centeno Werner  
CIV. 2.876

CENTENO RODRIGUEZ & ASOCIADOS  
INGENIEROS CONSULTORES ENVIADO POR CORREO ELECTRONICO [canelon@odebrecht.com](mailto:canelon@odebrecht.com)  
LABORATORIO DE SUELOS DESDE CORREO ELECTRONICO [robertocenteno Werner@gmail.com](mailto:robertocenteno Werner@gmail.com)  
CARACAS, VENEZUELA FECHA ENVIO 30/07/2014

OBRA AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMON BOLIVAR MAIQUETIA  
PROCEDENCIA: Fuerzas Armadas.

CANES

Gráfico de Curva de Compactación



Laboratorista Revisado  
*Ramiro Meleán* TSU Ramiro Meleán Tahiry Luques

Aprobada  
*Roberto Centeno Werner*  
Ing Roberto Centeno Werner  
CIV 2.876

ENSAYO DE CBR

Tipo de ensayo 15 puntos para suelos finos. NO SATURADO

OBRA	AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMON BOLICAR
SITIO DE PRESTAMO	CERRO AL LADO DE LA PISTA PRINCIPAL
CLIENTE	CONSTRUCTORA NORBERTO ODEBRECHT

DATOS DEL SUELO

COLOR DE SUELO	COLOR ROJIZO
TIPO DE SUELO	LIMO ARCILLOSO
REACCION AL H2O2	REACCIONA AL H2O2
REACCION AL HCL	REACCIONA AL HCL AL 10 %

pasante # 4	pasante # 10	pasante # 200	limite liquido	limite plastico	limite de contraccion	indice de plasticidad	valor de azul	% de colorido	indice de nocividad
92,51 gr.	82,04 gr.	42,75 gr.					42 cc.	0,16%	27,57

DATOS GENERALES

DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	HUMEDAD NATURAL	PESO DEL MARTILLO	ALTURA DE CAIDA	NUMEROS DE CAPA
56 GOLPES	56 GOLPES	25 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES	12 GOLPES	%	LBS	PULG.	
	12		12		12	6,13	10	18	5

ENSAYO DE COMPACTACION

ENERGIA DE COMPACTACION	Lb/pie/pie3	55.986,00	24.993,75	11.997,00
		MOLDE 1	MOLDE 2	MOLDE 3
		56 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES
PESO MOLDE + SUELO + AGUA (gr)		11.642,00	11.476,00	
PESO DEL MOLDE (gr)		7.095,00	7.016,00	
DIAMETRO DEL MOLDE (cm)		15,15	15,02	
ALTURA DEL SUELO (cm)		11,48	11,54	
ALTURA DEL SUELO (pulgada)		4,52	4,54	
VOLUMEN DE SUELO (cm3)		2.069,46	2.044,73	
DENSIDAD HUMEDA (kg/m3)		2.197,19	2.181,22	

HUMEDAD DE COMPACTACION	MOLDE N° 1	MOLDE N° 2	MOLDE N° 3
CAPSULA N°	48	45	84
PESO DE CAPSULA (gr)	22,78	22,83	22,08
PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO (gr)	146,08	146,07	169,05
PESO CAPSULA + SUELO SECO (gr)	133,09	133,13	153,83
PESO AGUA (gr)	12,99	12,94	15,22
PESO DE SUELO SECO (gr)	110,31	110,30	131,75
% DE HUMEDAD	11,78	11,73	11,55
PROMEDIO DE % HUMEDAD	11,75		11,74
DENSIDAD SECA (kg/m3)	1.965,71	1.966,49	1.955,34
DENSIDAD SECA PROMEDIO (kg/m3)	1.966,10		1.952,08

ENSAYO DE ABSORCION

PESO MOLDE + SUELO ANTES DE INMERSION			
PESO SECO ANTES DE LA INMERSION			
PESO MOLDE + SUELO DESPUES DE INMERSION			
PESO DEL SUELO DESPUES DE INMERSION			
PESO DE AGUA ABSORBIDA			
% DE ABSORCION			

ENSAYO DE EXPANSION

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO	MOLDE N° 1		MOLDE N° 2		MOLDE N° 3	
			LECTURA DIAL	EXPANSION	LECTURA DIAL	EXPANSION	LECTURA DIAL	EXPANSION
DD/MM/AA	H:m:s	HORAS	(0,001")	%	(0,001")	%	(0,001")	%
16/09/2014	04:30 p.m.	0	0	0	0	0	0	0
17/09/2014	04:30 p.m.	24		0,00		0,00		
18/09/2014	04:30 p.m.	48		0,00		0,00		
19/09/2014	04:30 p.m.	72		0,00		0,00		
20/09/2014	04:30 p.m.	96						

Laboratorista  
*Promiso Mejia*  
TSU Ramiro Melean  
Cédula

Revisado  
*[Signature]*  
TSU Vitor  
Cédula

Aprobado  
*[Signature]*  
Ing Roberto Centeno W  
CIV 2,876

ENSAYO DE CBR

Tipo de ensayo 15 puntos para suelos finos.

OBRA	AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMON BOLICAR
SITIO DE PRESTAMO	CERRO AL LADO DE LA PISTA PRINCIPAL <i>Material Prop.</i>
CLIENTE	CONSTRUCTORA NORBERTO ODEBRECHT

DATOS DEL PROCTOR MODIFICADO

Densidad Maxima Seca		Humedad de compactacion.	12	Grado Saturacion %	
----------------------	--	--------------------------	----	--------------------	--

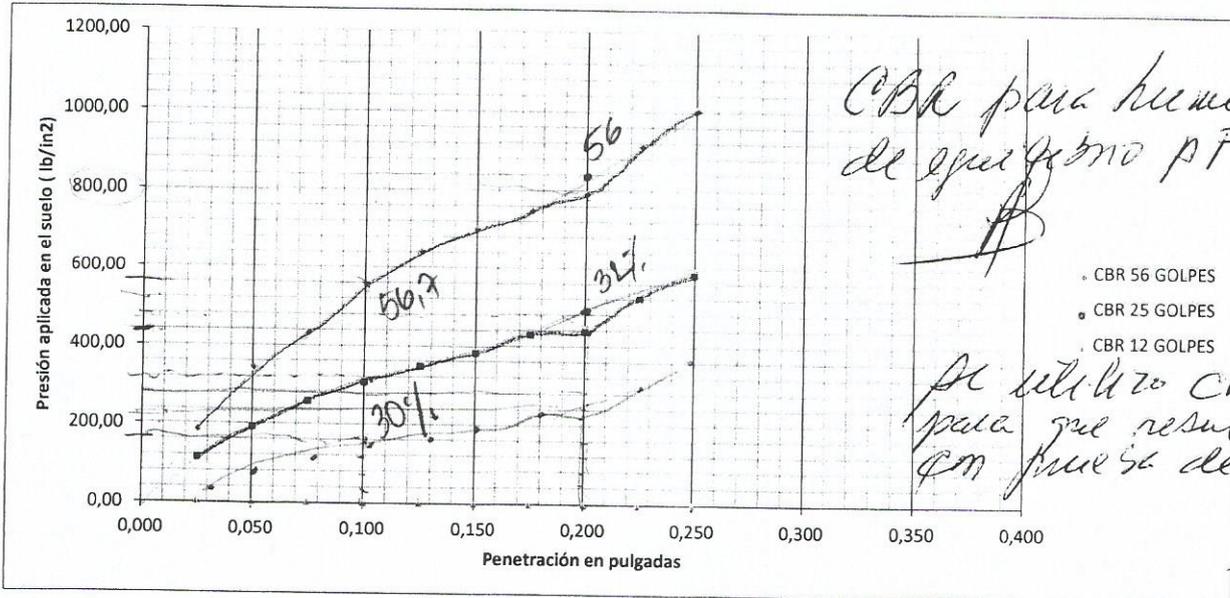
DATOS DEL ANILLO DE CARGA LEONARD FARNELL 1514

Factor de anillo	4,006	8,787	libras/div
Area de Piston (in2)	3		

DATOS REFERENTES A LA PENETRACION DE LOS MOLDES DE SUELO COMPACTADO

Divisiones del DIAL VERTICAL	MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2
0,025	62	544,8	181,60	39	342,7	114,23		0,0	0,00
0,050	117	1028,1	342,69	66	579,9	193,31		0,0	0,00
0,075	147	1291,7	430,56	89	782,0	260,68		0,0	0,00
0,100	190	1669,5	556,51	106	931,4	310,47		0,0	0,00
0,125	219	1924,4	641,45	120	1054,4	351,48		0,0	0,00
0,150	239,5	2104,5	701,50	132	1159,9	386,63		0,0	0,00
0,175	256	2249,5	749,83	149	1309,3	436,42		0,0	0,00
0,200	271	2381,3	793,76	152	1335,6	445,21		0,0	0,00
0,225	312	2741,5	913,85	181	1590,4	530,15		0,0	0,00
0,250	343,5	3018,3	1006,11	202	1775,0	591,66		0,0	0,00

GRAFICO DE CBR



Laboratorista  
*Ramiro Meleán*  
TSU Ramiro Meleán  
Cédula

Revisado  
*Tahiry Luques*  
Tahiry Luques  
Cedula

Aprobación  
Ing Roberto Centeno W  
CIV 2,876

532

Obra: Aeropuerto de Maiquetia.  
Cliente: C.N.O  
Proveniencia: Fuerzas armadas.

Fecha: 28/07/2014

Muestra: Canes ✓

**ENSAYO DE GRANULOMETRIA**  
ASTM D-422-02

PESO TOTAL MUESTRA (g): 867,00  
PESO MUESTRA LAVADA (g): 532,60

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido en tamiz	% Retenido acumulado	% Pasante
4 "				
3 "				
2 1/2 "				
2 "				
1 1/2 "				
1 "	105,55	12,17	12,17	87,83
3/4 "	38,17	4,40	16,58	83,42
1/2 "	55,94	6,45	23,03	76,97
3/8 "	35,00	4,04	27,07	72,93
Nº 4	73,01	8,42	35,49	64,51
Nº 10	94,52	10,90	46,39	53,61
Nº 40	87,93	10,14	56,53	43,47
Nº 50	12,57	1,45	57,98	42,02
Nº 80	11,96	1,38	59,36	40,64
Nº 100	4,13	0,48	59,84	40,16
Nº 200	13,40	1,55	61,38	38,62
Pasa Nº 200	334,40	38,57	99,95	

% grava= 35,5  
% arena= 25,9  
% finos= 38,6

Laboratorista:

*Ramiro Melean*  
T.S.U. Ramiro Melean.

Revisado:

Tahiry Luques.  
Auxiliar de Ingeniero

Aprobado:

*Roberto Centeno*  
Ing. Roberto Centeno.  
CIV 2.876

**CENTENO - RODRIGUEZ & ASOCIADOS**  
Ingenieros Consultores

**ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA**  
ASTM D-854-00

OBRA: Aeropuerto Internacional Simon Bolivar  
UBICACIÓN: Maiquetia, Edo. Vargas.  
FECHA: 05/08/2014

Muestra		Canes
Picnómetro N°		3
Capacidad Picnómetro(cm <sup>3</sup> )		250
Pesos (g)	Tara del Picnómetro	105,78
	Picnómetro + Suelo Seco	166,37
	Suelo Seco ( $W_o$ )	60,59
	Picnom. + Agua + Suelo ( $W_1$ )	393,95
	Picnom. Lleno de agua ( $W_2$ )	354,58
Temperatura del Ensayo (°C)		24,0
Gravedad Específica referida a Temperatura del Ensayo ( $G_s$ )		2,86
Gravedad Específica referida a Temperatura de 20 °C ( $G_s$ 20°)		2,85

$$G_s = \frac{W_o}{W_o - (W_1 - W_2)}$$

Laboratorista  
*Ramiro Meleán*  
TSU Ramiro Meleán

Revisado  
Tahiry Luques  
Auxiliar de Ingeniero

Aprobado  
*Roberto Centeno Werner*  
Ing Roberto Centeno Werner  
CIV 2.876

ENSAYO DE CBR

*Curvas de Proctor*

Tipo de ensayo 15 puntos para suelos finos.

OBRA	AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMON BOLICAR
SITIO DE PRESTAMO	CERRO AL LADO DE LA PISTA PRINCIPAL <i>Material Rojo</i>
CLIENTE	CONSTRUCTORA NORBERTO ODEBRECHT

DATOS DEL SUELO

COLOR DE SUELO	COLOR ROJIZO
TIPO DE SUELO	LIMO ARCILLOSO
REACCION AL H2O2	REACCIONA AL H2O2
REACCION AL HCL	REACCIONA AL HCL AL 10 %

pasante # 4	pasante # 10	pasante # 200	limite liquido	limite plastico	limite de contraccion	indice de plasticidad	valor de azul	% de coloide	indice de nocividad
92,51 gr.	82,04 gr.	42,75 gr.					42 cc.	0,16%	27,57

DATOS GENERALES

DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD MAXIMA SECA	HUMEDAD OPTIMA	HUMEDAD NATURAL
56 GOLPES	56 GOLPES	25 GOLPES	25 GOLPES	12 GOLPES	12 GOLPES	%
2156	8,57	2050	11%			6,13

PARA %W 6%	ENERGIA DE COMPACTACION	Lb/pie/pie3	55.986,00	24.993,75	11.997,00
	MOLDE		1	2	3
	DENSIDAD HUMEDA kg/m3)		1.970,17	1.893,19	1.930,68
	PROMEDIO DE % HUMEDAD		5,87	6,61	5,75
	DENSIDAD SECA PROMEDIO SIN INMERSION(kg/l)		1.860,97	1.771,18	1.821,01
	VOLUMEN DESPUES DE LA INMERSION		2.172,11	2.125,74	2.135,59
PARA %W 8%	ENERGIA DE COMPACTACION	Lb/pie/pie3	55.986,00	24.993,75	11.997,00
	MOLDE		4	5	6
	DENSIDAD HUMEDA kg/m3)		2.300,14	2.084,22	1.861,62
	PROMEDIO DE % HUMEDAD		7,89	7,87	7,70
	DENSIDAD SECA PROMEDIO SIN INMERSION(kg/l)		2.126,41	1.927,05	1.724,08
	VOLUMEN DESPUES DE LA INMERSION		1.974,54	1.994,91	1.812,84
PARA %W 10%	ENERGIA DE COMPACTACION	Lb/pie/pie3	55.986,00	24.993,75	11.997,00
	MOLDE		7	8	9
	DENSIDAD HUMEDA kg/m3)		1.729,82	1.709,82	1.471,30
	PROMEDIO DE % HUMEDAD		9,71	10,32	9,87
	DENSIDAD SECA PROMEDIO SIN INMERSION(kg/l)		2.093,65	2.049,37	1.805,35
	VOLUMEN DESPUES DE LA INMERSION		2.254,65	2.181,51	1.938,39
PARA %W 12%	ENERGIA DE COMPACTACION	Lb/pie/pie3	55.986,00	24.993,75	11.997,00
	MOLDE		10	11	12
	DENSIDAD HUMEDA kg/m3)		2.254,27	2.178,04	2.065,16
	PROMEDIO DE % HUMEDAD		11,76	11,95	11,28
	DENSIDAD SECA PROMEDIO SIN INMERSION(kg/l)		2.003,11	1.991,58	1.847,85
	VOLUMEN DESPUES DE LA INMERSION		2.108,62	2.198,01	2.041,43
PARA %W 14%	ENERGIA DE COMPACTACION	Lb/pie/pie3	55.986,00	24.993,75	11.997,00
	MOLDE		13	15	
	DENSIDAD HUMEDA kg/m3)		2.227,32	2.173,08	
	PROMEDIO DE % HUMEDAD		13,99	14,10	14,32
	DENSIDAD SECA PROMEDIO SIN INMERSION(kg/l)		1.905,26	1.896,30	
	VOLUMEN DESPUES DE LA INMERSION		2.162,79	2.147,17	
			1.897,42	1.881,83	

Laboratorista  
*Ramiro Meleán*  
TSU Ramiro Meleán  
Cédula

Revisado  
*[Signature]*  
Técnico  
Cédula

Aprobación  
*[Signature]*  
Ing Roberto Centeno-W  
CIV 2,876

ENSAYO DE CBR

Tipo de ensayo 15 puntos para suelos finos. ✓

OBRA	AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMON BOLICAR
SITIO DE PRESTAMO	CERRO AL LADO DE LA PISTA PRINCIPAL
CLIENTE	CONSTRUCTORA NORBERTO ODEBRECHT

DATOS DEL PROCTOR MODIFICADO

Densidad Maxima Seca		Humedad de compactacion.	12	Grado Saturacion %	
----------------------	--	--------------------------	----	--------------------	--

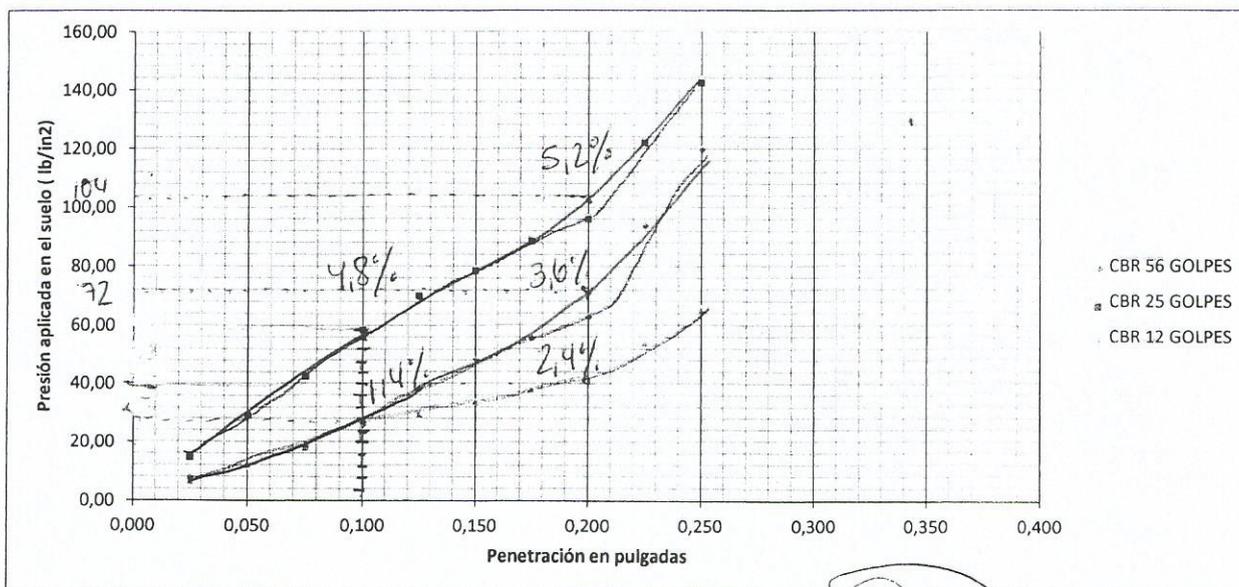
DATOS DEL ANILLO DE CARGA LEONARD FARNELL 1514

Factor de anillo	4,006	8,787	libras/div
Area de Piston (in2)	3		

DATOS REFERENTES A LA PENETRACION DE LOS MOLDES DE SUELO COMPACTADO

Divisiones del DIAL VERTICAL	MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2	Lectura Dial Carga	Carga libras	Presion Libras/in2
0,025	2,5	22,0	7,32	5	43,9	14,65	2	17,6	5,86
0,050	4	35,1	11,72	10	87,9	29,29	4	35,1	11,72
0,075	6,2	54,5	18,16	14,5	127,4	42,47	6	52,7	17,57
0,100	9	79,1	26,36	20	175,7	58,58	8	70,3	23,43
0,125	13	114,2	38,08	24	210,9	70,30	10	87,9	29,29
0,150	16,5	145,0	48,33	27	237,2	79,08	11,5	101,1	33,68
0,175	19	167,0	55,65	30,5	268,0	89,33	13	114,2	38,08
0,200	21,5	188,9	62,97	33	290,0	96,66	14	123,0	41,01
0,225	32	281,2	93,73	42	369,1	123,02	18,5	162,6	54,19
0,250	41	360,3	120,09	49	430,6	143,52	22,5	197,7	65,90

GRAFICO DE CBR



Laboratorista  
*Ramiro Mefeán*  
TSU Ramiro Mefeán  
Cédula

Revisado  
*Tahiry Luques*  
Tahiry Luques  
Cédula

Aprobación  
*Roberto Centeno*  
Ing Roberto Centeno W  
CIV 2,876

Muestra N°: SUELO #3 (A-6)

Diámetro: 5.06 cm

Area inicial: 20.11 cm

Anillo N°: 1516

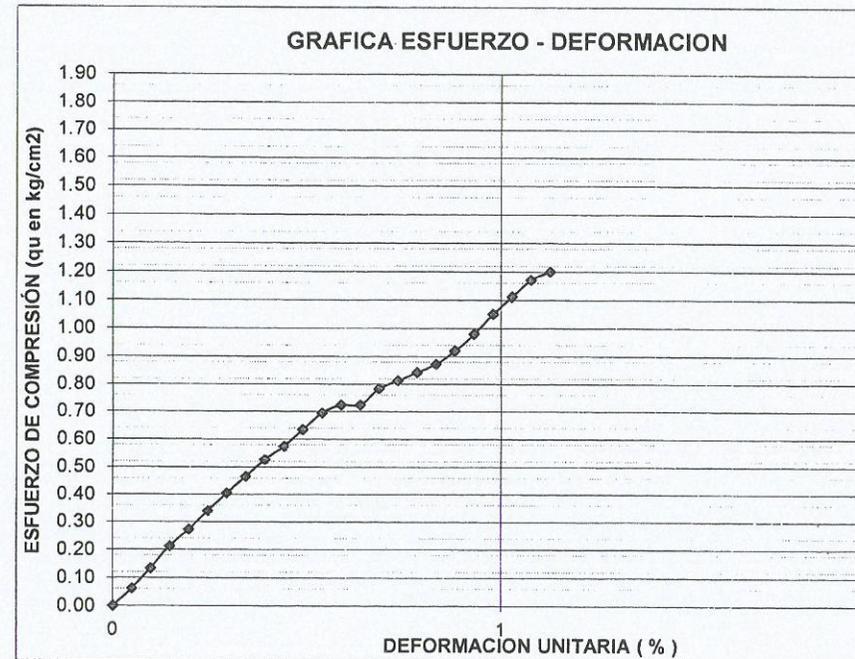
Gs: 2.86

Long. inicial: 10.20 cm

Calibración: 0.122 kg/div

Foto de Falla

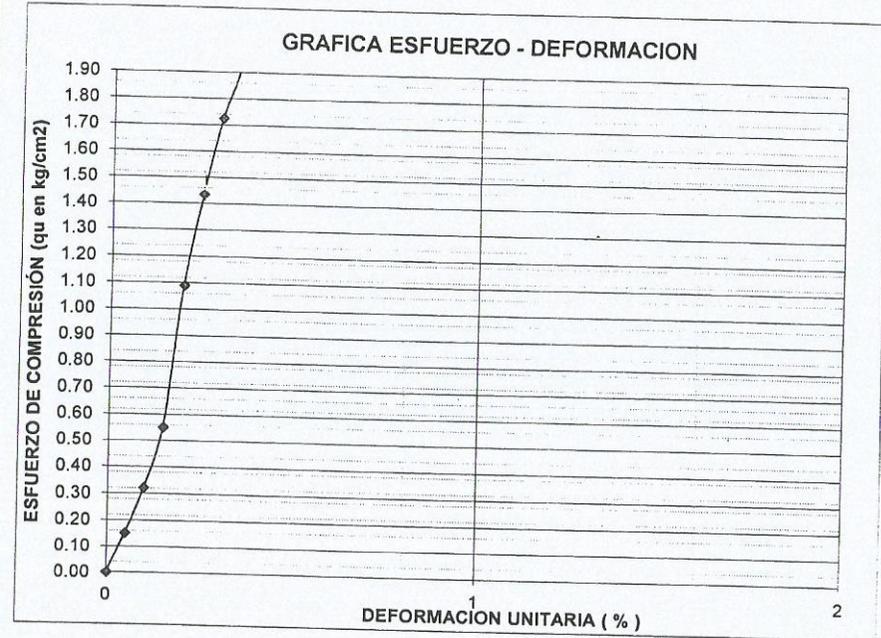
Lectura dial de carga	Deformación vertical $\Delta L$		Deformación axial unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0 (\%)$	$1 - \epsilon$	Area corregida $A = A_0 / (1 - \epsilon)$	Carga (kg)	Esfuerzo unitario (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante (kg/cm <sup>2</sup> )
	(mm/100)	(cm)						
0.0	0.0	0.00	0.00	1.000	20.11	0.00	0.00	0.00
10.0	5.0	0.01	0.05	1.000	20.12	1.22	0.06	0.03
22.0	10.0	0.01	0.10	0.999	20.13	2.68	0.13	0.07
35.0	15.0	0.02	0.15	0.999	20.14	4.27	0.21	0.11
45.0	20.0	0.02	0.20	0.998	20.15	5.49	0.27	0.14
56.0	25.0	0.03	0.25	0.998	20.16	6.83	0.34	0.17
67.0	30.0	0.03	0.29	0.997	20.17	8.17	0.41	0.20
77.0	35.0	0.04	0.34	0.997	20.18	9.39	0.47	0.23
87.0	40.0	0.04	0.39	0.996	20.19	10.61	0.53	0.26
95.0	45.0	0.05	0.44	0.996	20.20	11.59	0.57	0.29
105.0	50.0	0.05	0.49	0.995	20.21	12.81	0.63	0.32
115.0	55.0	0.06	0.54	0.995	20.22	14.03	0.69	0.35
120.0	60.0	0.06	0.59	0.994	20.23	14.64	0.72	0.36
120.0	65.0	0.07	0.64	0.994	20.24	14.64	0.72	0.36
130.0	70.0	0.07	0.69	0.993	20.25	15.86	0.78	0.39
135.0	75.0	0.08	0.74	0.993	20.26	16.47	0.81	0.41
140.0	80.0	0.08	0.78	0.992	20.27	17.08	0.84	0.42
145.0	85.0	0.09	0.83	0.992	20.28	17.69	0.87	0.44
153.0	90.0	0.09	0.88	0.991	20.29	18.67	0.92	0.46
163.0	95.0	0.10	0.93	0.991	20.30	19.89	0.98	0.49
175.0	100.0	0.10	0.98	0.990	20.31	21.35	1.05	0.53
185.0	105.0	0.11	1.03	0.990	20.32	22.57	1.11	0.56
195.0	110.0	0.11	1.08	0.989	20.33	23.79	1.17	0.59
200.0	115.0	0.12	1.13	0.989	20.34	24.40	1.20	0.60



ENSAYO DE COMPRESION SIN CONFINAR

Muestra N° SUELO # 3 (A-6) Diámetro: 5.06 cm  
 Gs: 2.86 Area inicial: 20.11 cm Anillo N°: 1516  
 Long. inicial: 10.15 cm Calibración: 0.122 kg/div  
 Foto de Falla

Lectura dial de carga	Deformación vertical $\Delta L$		Deformación axial unitaria $\epsilon = \Delta L / L_0$ (%)	$1 - \epsilon$	Area corregida $A = A_0 / (1 - \epsilon)$	Carga ( kg )	Esfuerzo unitario ( kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante ( kg/cm <sup>2</sup> )
	( mm/100 )	( cm )						
0.0	0.0	0.00	0.00	1.000	20.11	0.00	0.00	0.00
25.0	5.0	0.01	0.05	1.000	20.12	3.05	0.15	0.08
53.0	10.0	0.01	0.10	0.999	20.13	6.47	0.32	0.16
91.0	15.0	0.02	0.15	0.999	20.14	11.10	0.55	0.28
180.0	20.0	0.02	0.20	0.998	20.15	21.96	1.09	0.54
237.0	25.0	0.03	0.25	0.998	20.16	28.91	1.43	0.72
285.0	30.0	0.03	0.30	0.997	20.17	34.77	1.72	0.86
320.0	35.0	0.04	0.34	0.997	20.18	39.04	1.93	0.97
390.0	40.0	0.04	0.39	0.996	20.19	47.58	2.36	1.18
458.0	45.0	0.05	0.44	0.996	20.20	55.88	2.77	1.38
495.0	50.0	0.05	0.49	0.995	20.21	60.39	2.99	1.49
530.0	55.0	0.06	0.54	0.995	20.22	64.66	3.20	1.60
565.0	60.0	0.06	0.59	0.994	20.23	68.93	3.41	1.70
595.0	65.0	0.07	0.64	0.994	20.24	72.59	3.59	1.79
625.0	70.0	0.07	0.69	0.993	20.25	76.25	3.77	1.88
654.0	75.0	0.08	0.74	0.993	20.26	79.79	3.94	1.97
674.0	80.0	0.08	0.79	0.992	20.27	82.23	4.06	2.03
695.0	85.0	0.09	0.84	0.992	20.28	84.79	4.18	2.09
705.0	90.0	0.09	0.89	0.991	20.29	86.01	4.24	2.12
725.0	95.0	0.10	0.94	0.991	20.30	88.45	4.36	2.18
735.0	100.0	0.10	0.99	0.990	20.31	89.67	4.42	2.21
745.0	105.0	0.11	1.03	0.990	20.32	90.89	4.47	2.24
755.0	110.0	0.11	1.08	0.989	20.33	92.11	4.53	2.27
759.0	115.0	0.12	1.13	0.989	20.34	92.60	4.55	2.28



**TERRATEST  
5000 BT USB**

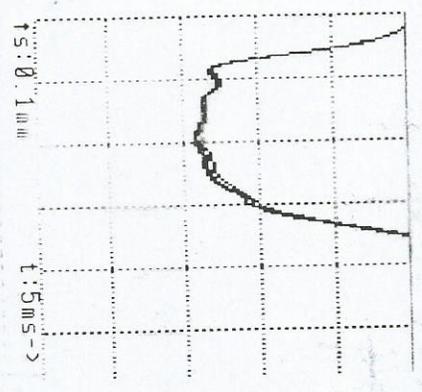
SW: 000.28  
TYP: 3000mm 10kg #142288

DYNAMIC TEST WITH LIGHT  
WEIGHT DEFLECTOMETER  
RECORDING TO GERMAN TEST  
SPECIFICATION  
TP BF-518 Teil B 8.3

Date: WED 24.09.2014 22:54:30

Place: GPS  
10° 36.2983' N  
066° 58.9284' W

**Evd = 79.2 MPa**



S [mm]	V [mm/s]
4: 0.279	131.1
5: 0.285	134.4
6: 0.289	132.3

INPUT  
s/v = 2.141 ms  
AAAB PRUEBH1

JSB

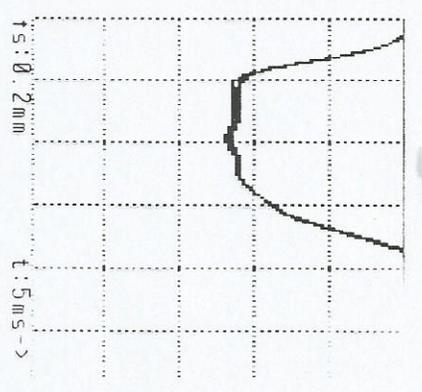
42288

DYNAMIC TEST WITH LIGHT  
WEIGHT DEFLECTOMETER  
RECORDING TO GERMAN TEST  
SPECIFICATION  
TP BF-518 Teil B 8.3

Date: WED 24.09.2014 23:23:28

Place: GPS  
10° 36.2974' N  
066° 58.9232' W

**Evd = 47.6 MPa**



S [mm]	V [mm/s]
4: 0.482	177.2
5: 0.474	174.2
6: 0.465	173.5

INPUT  
s/v = 2.704 ms

TERRATEST  
5000 BT USB

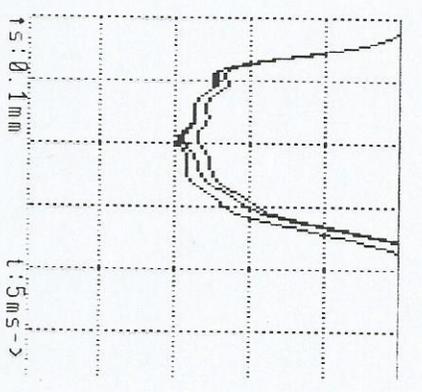
SW: 000.28  
TYP: 3000mm 10kg #142288

DYNAMIC TEST WITH LIGHT  
WEIGHT DEFLECTOMETER  
RECORDING TO GERMAN TEST  
SPECIFICATION  
TP BF-518 Teil B 8.3

Date: WED 24.09.2014 23:20:43

Place: GPS  
10° 36.2967' N  
066° 58.9224' W

**Evd = 78.4 MPa**



S [mm]	V [mm/s]
4: 0.291	113.7
5: 0.297	112.5
6: 0.274	108.3

INPUT  
s/v = 2.573 ms

TERRATEST  
5000 BT USB

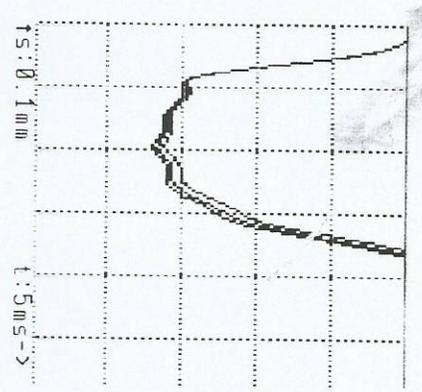
SW: 000.28  
TYP: 3000mm 10kg #142288

DYNAMIC TEST WITH LIGHT  
WEIGHT DEFLECTOMETER  
RECORDING TO GERMAN TEST  
SPECIFICATION  
TP BF-518 Teil B 8.3

Date: WED 24.09.2014 23:22:04

Place: GPS  
10° 36.2968' N  
066° 58.9217' W

**Evd = 67.6 MPa**



S [mm]	V [mm/s]
4: 0.340	131.8
5: 0.335	131.5
6: 0.325	132.4

INPUT  
s/v = 2.524 ms

TERRATEST  
5000 BT USB

SW: 000.28  
TYP: 3000mm 10kg #142288

DYNAMIC TEST WITH LIGHT  
WEIGHT DEFLECTOMETER  
RECORDING TO GERMAN TEST  
SPECIFICATION  
TP BF-518 Teil B 8.3

Date: WED 24.09.2014 23:22:04

Place: GPS  
10° 36.2968' N  
066° 58.9217' W

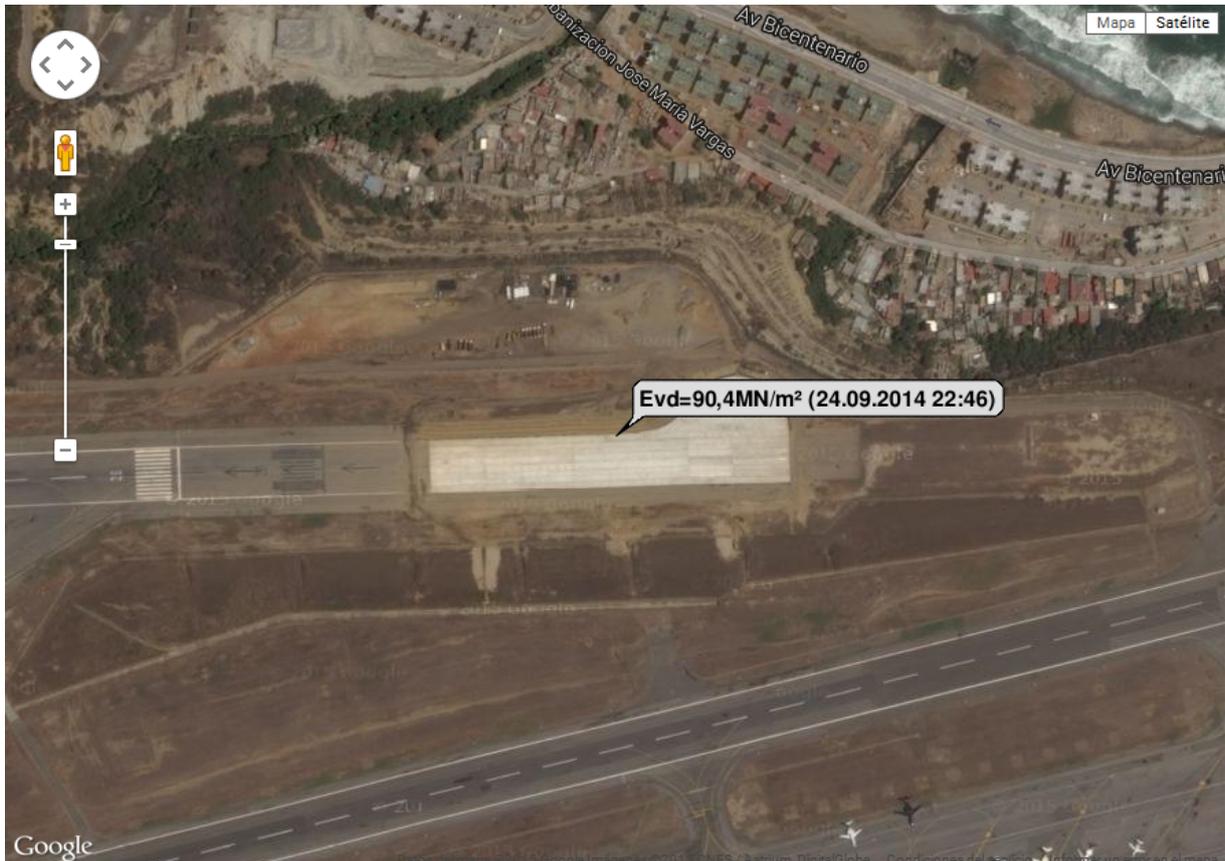
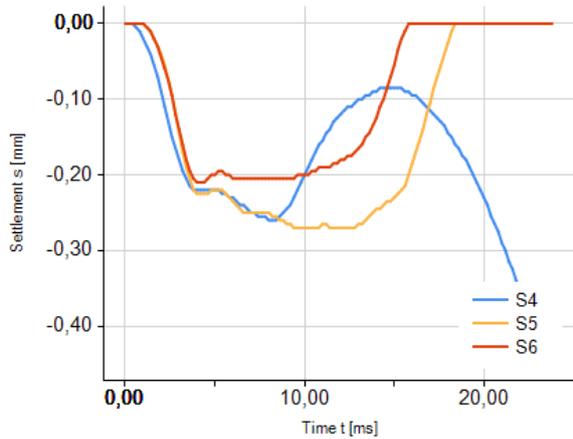
*Plataforma Remota*  
*Suelo #1*  
*64,02 MPa*

# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:		Layer:	
Construct. project:		Soil type:	
Loc. test. point:		Soil classification:	
Comments:		Consistency:	
Conducted by:		Weather/Temp.:	
Test date/ time:	24.09.2014 22:46	Record number:	0
Serial number:	090720142288	Manufacturer:	TERRATEST GmbH
GPS coordinates:	10° 36.2978N, 66° 58.9281W	UTM coordinates:	E 42 279230 N 1173016

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,261	0,273	0,212	0,249	<b>90,4</b>	<b>0,0</b>	<b>90,4</b>	2,409	<b>0,0</b>

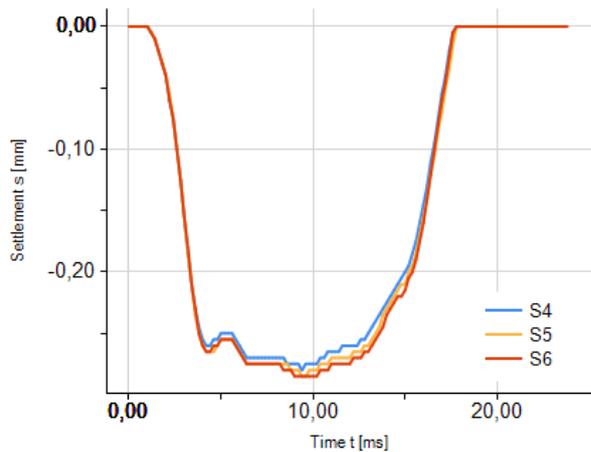


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:		Layer:	
Construct. project:		Soil type:	
Loc. test. point:		Soil classification:	
Comments:	AAAB PRUEBA1	Consistency:	
Conducted by:		Weather/Temp.:	
Test date/ time:	24.09.2014 22:54	Record number:	1
Serial number:	090720142288	Manufacturer:	TERRATEST GmbH
GPS coordinates:	10° 36.2983N, 66° 58.9284W	UTM coordinates:	E 42 279230 N 1173017

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,279	0,285	0,289	0,284	<b>79,2</b>	<b>0,0</b>	<b>79,2</b>	2,142	<b>0,0</b>

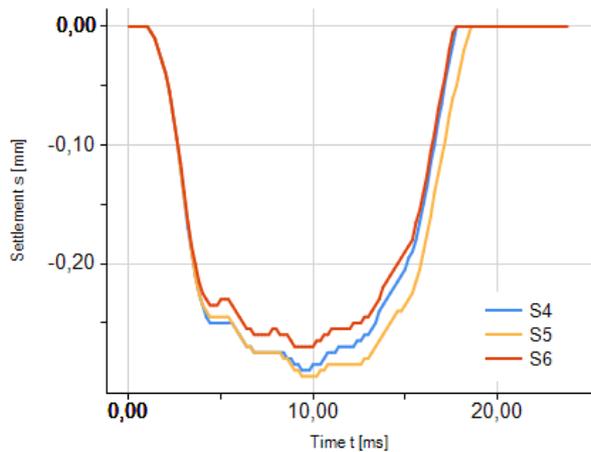


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:	Layer:
Construct. project:	Soil type:
Loc. test. point:	Soil classification:
Comments:	Consistency:
Conducted by:	Weather/Temp.:
Test date/ time: 24.09.2014 23:20	Record number: 3
Serial number: 090720142288	Manufacturer: TERRATEST GmbH
GPS coordinates: 10° 36.2967N, 66° 58.9224W	UTM coordinates: E 42 279219 N 1173014

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,291	0,297	0,274	0,287	<b>78,4</b>	<b>0,0</b>	<b>78,4</b>	2,574	<b>0,0</b>

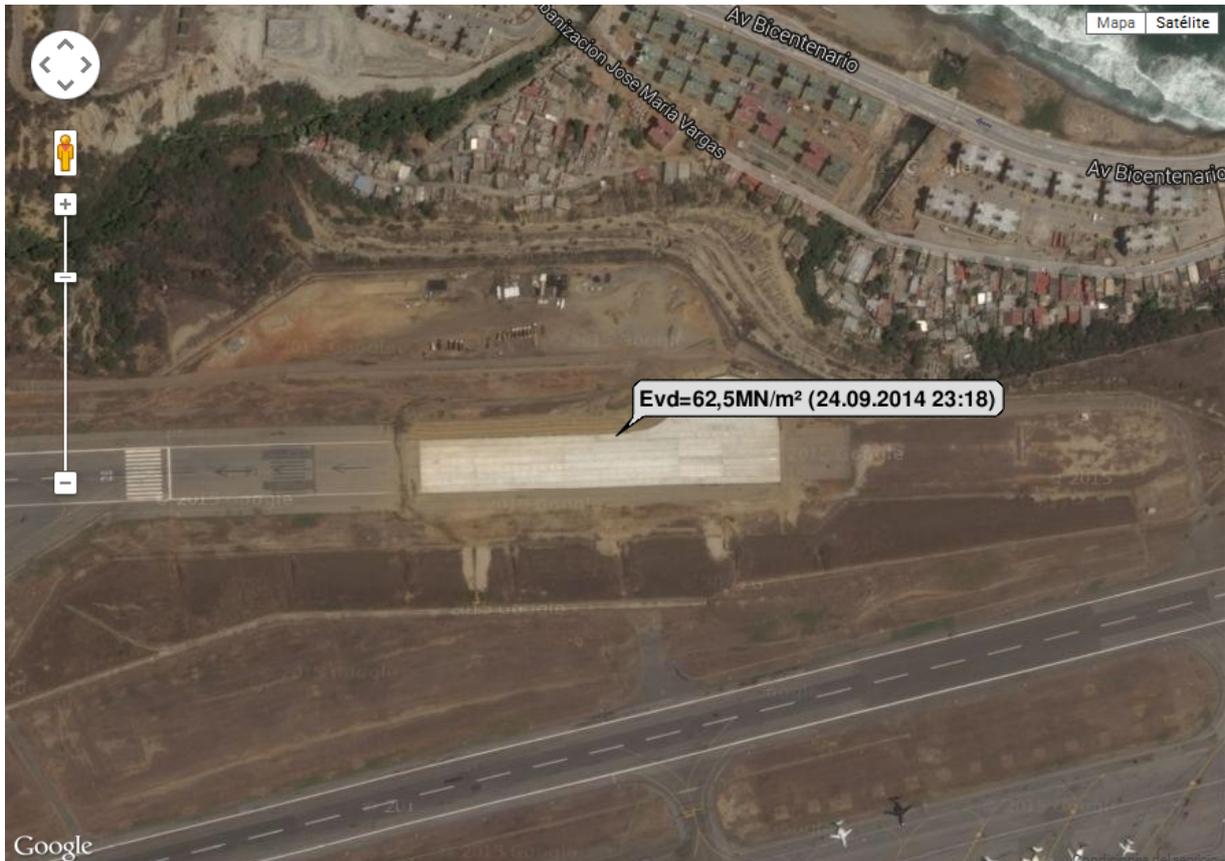
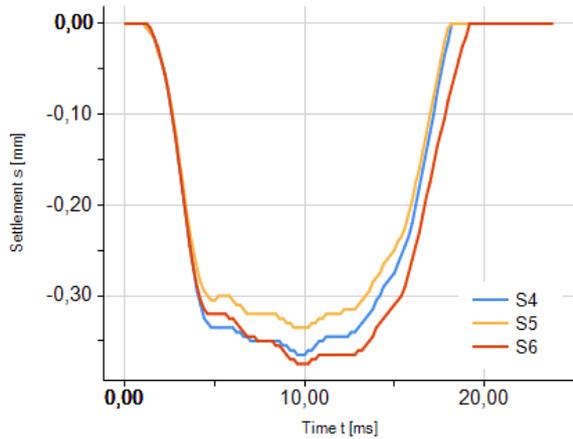


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:		Layer:	
Construct. project:		Soil type:	
Loc. test. point:		Soil classification:	
Comments:		Consistency:	
Conducted by:		Weather/Temp.:	
Test date/ time:	24.09.2014 23:18	Record number:	2
Serial number:	090720142288	Manufacturer:	TERRATEST GmbH
GPS coordinates:	10° 36.2973N, 66° 58.9240W	UTM coordinates:	E 42 279222 N 1173015

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,366	0,338	0,376	0,360	<b>62,5</b>	<b>0,0</b>	<b>62,5</b>	2,628	<b>0,0</b>



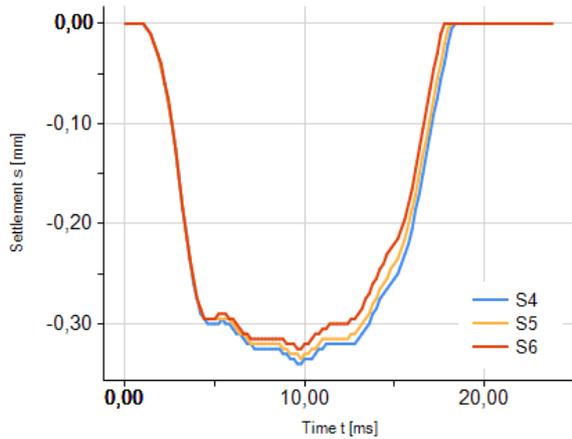
# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:  
 Construct. project:  
 Loc. test. point:  
 Comments:  
 Conducted by:  
 Test date/ time: 24.09.2014 23:22  
 Serial number: 090720142288  
 GPS coordinates: 10° 36.2968N, 66° 58.9217W

Layer:  
 Soil type:  
 Soil classification:  
 Consistency:  
 Weather/Temp.:  
 Record number: 4  
 Manufacturer: TERRATEST GmbH  
 UTM coordinates: E 42 279218 N 1173015

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,340	0,335	0,325	0,333	<b>67,6</b>	<b>0,0</b>	<b>67,6</b>	2,525	<b>0,0</b>

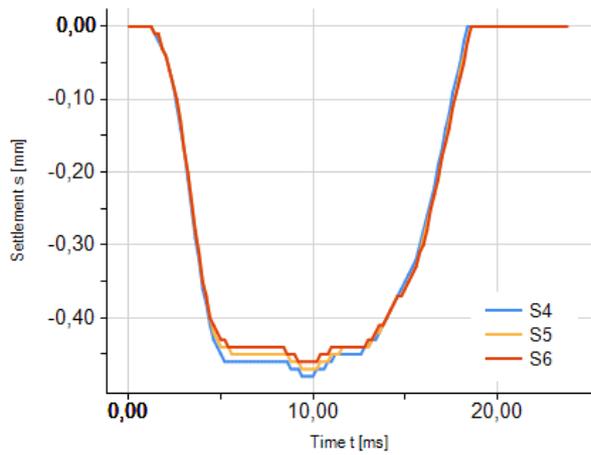


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:		Layer:	
Construct. project:		Soil type:	
Loc. test. point:		Soil classification:	
Comments:		Consistency:	
Conducted by:		Weather/Temp.:	
Test date/ time:	24.09.2014 23:23	Record number:	5
Serial number:	090720142288	Manufacturer:	TERRATEST GmbH
GPS coordinates:	10° 36.2974N, 66° 58.9232W	UTM coordinates:	E 42 279221 N 1173016

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,482	0,474	0,465	0,474	<b>47,5</b>	<b>0,0</b>	<b>47,5</b>	2,709	<b>0,0</b>

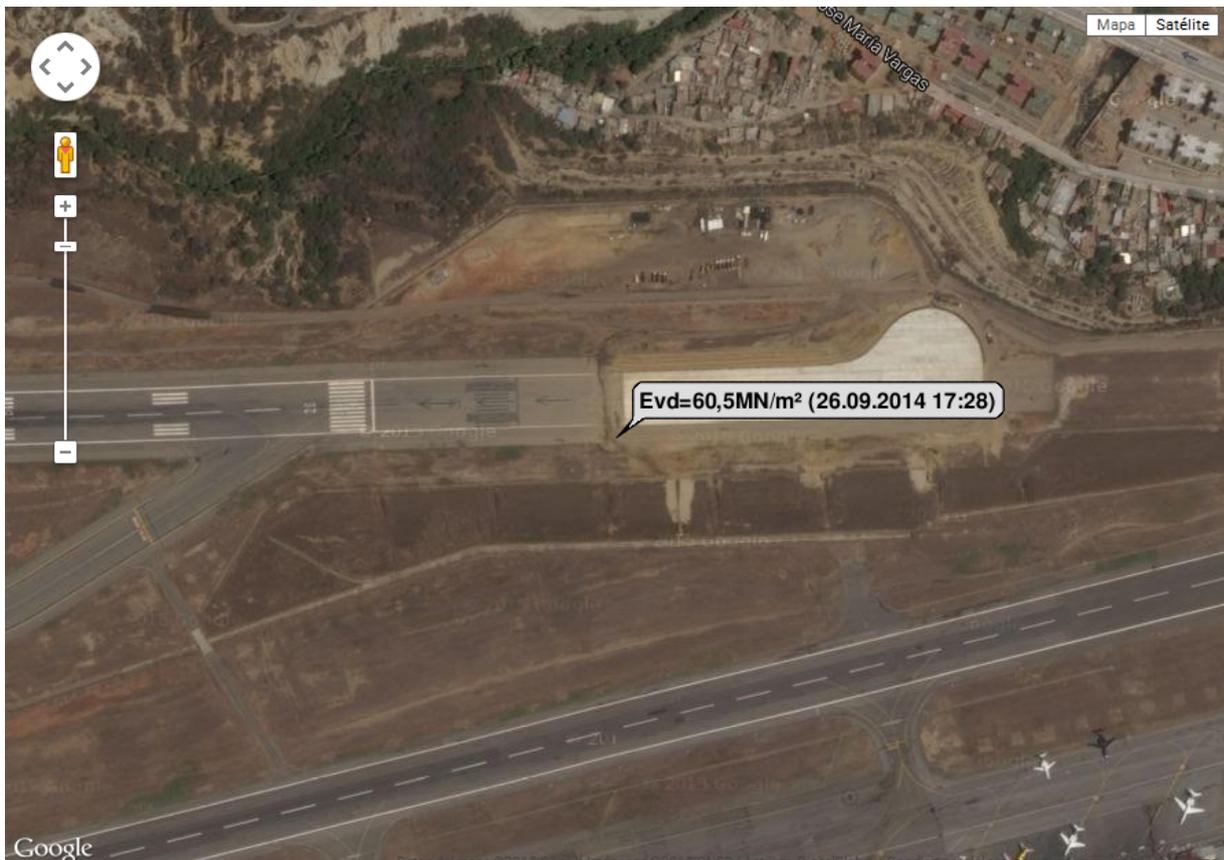
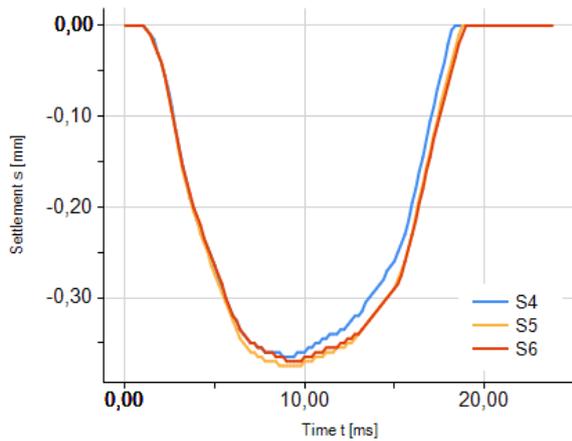


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:		Layer:	
Construct. project:		Soil type:	
Loc. test. point:		Soil classification:	
Comments:		Consistency:	
Conducted by:		Weather/Temp.:	
Test date/ time:	26.09.2014 17:28	Record number:	0
Serial number:	090720142288	Manufacturer:	TERRATEST GmbH
GPS coordinates:	10° 36.2656N, 66° 59.0188W	UTM coordinates:	E 42 279395 N 1172956

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,366	0,378	0,371	0,372	<b>60,5</b>	<b>0,0</b>	<b>60,5</b>	3,764	<b>0,0</b>

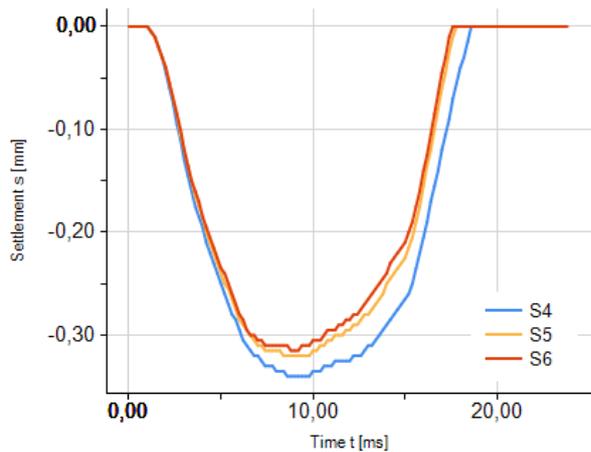


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:		Layer:	
Construct. project:		Soil type:	
Loc. test. point:		Soil classification:	
Comments:		Consistency:	
Conducted by:		Weather/Temp.:	
Test date/ time:	26.09.2014 17:30	Record number:	1
Serial number:	090720142288	Manufacturer:	TERRATEST GmbH
GPS coordinates:	10° 36.2661N, 66° 59.0192W	UTM coordinates:	E 42 279395 N 1172957

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,343	0,324	0,315	0,327	<b>68,8</b>	<b>0,0</b>	<b>68,8</b>	3,919	<b>0,0</b>



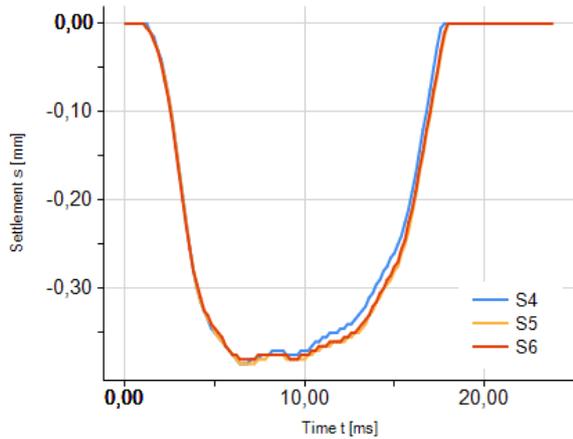
# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:  
 Construct. project:  
 Loc. test. point:  
 Comments:  
 Conducted by:  
 Test date/ time: 26.09.2014 17:36  
 Serial number: 090720142288  
 GPS coordinates: 10° 36.2707N, 66° 59.0050W

Layer:  
 Soil type:  
 Soil classification:  
 Consistency:  
 Weather/Temp.:  
 Record number: 4  
 Manufacturer: TERRATEST GmbH  
 UTM coordinates: E 42 279369 N 1172965

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,385	0,386	0,382	0,384	<b>58,6</b>	<b>0,0</b>	<b>58,6</b>	2,657	<b>0,0</b>

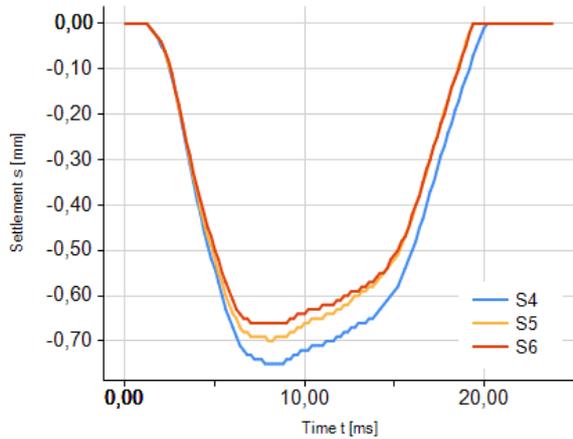


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:	Layer:
Construct. project:	Soil type:
Loc. test. point:	Soil classification:
Comments:	Consistency:
Conducted by:	Weather/Temp.:
Test date/ time: 05.11.2014 17:22	Record number: 0
Serial number: 090720142288	Manufacturer: TERRATEST GmbH
GPS coordinates: 10° 36.3475N, 66° 58.9100W	UTM coordinates: E 42 279197 N 1173108

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,754	0,700	0,668	0,707	<b>31,8</b>	<b>0,0</b>	<b>31,8</b>	3,959	<b>0,0</b>

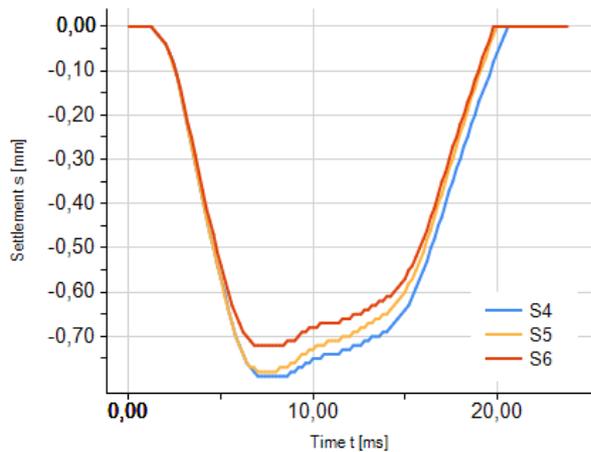


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:		Layer:	
Construct. project:		Soil type:	
Loc. test. point:		Soil classification:	
Comments:		Consistency:	
Conducted by:		Weather/Temp.:	
Test date/ time:	05.11.2014 17:24	Record number:	1
Serial number:	090720142288	Manufacturer:	TERRATEST GmbH
GPS coordinates:	10° 36.3485N, 66° 58.9130W	UTM coordinates:	E 42 279203 N 1173110

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,797	0,784	0,728	0,770	<b>29,2</b>	<b>0,0</b>	<b>29,2</b>	4,139	<b>0,0</b>

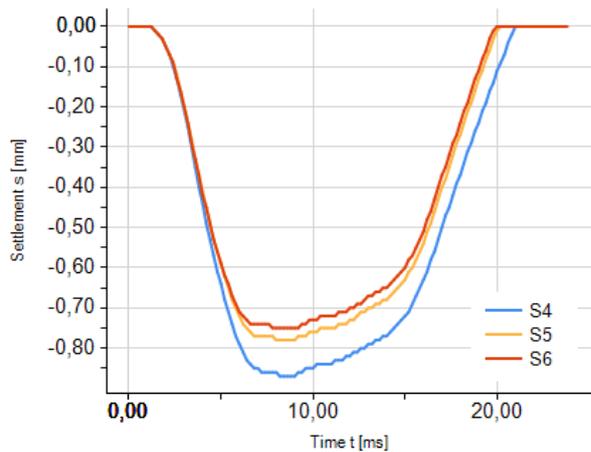


# Dynamic Plate Load Test

Determination of dynamic deflection modulus according to TP BF-StB Part B 8.3

Client:		Layer:	
Construct. project:		Soil type:	
Loc. test. point:		Soil classification:	
Comments:		Consistency:	
Conducted by:		Weather/Temp.:	
Test date/ time:	05.11.2014 17:25	Record number:	2
Serial number:	090720142288	Manufacturer:	TERRATEST GmbH
GPS coordinates:	10° 36.3491N, 66° 58.9085W	UTM coordinates:	E 42 279194 N 1173111

Settlement s4 (mm)	Settlement s5 (mm)	Settlement s6 (mm)	Mean value (mm)	<b>Evd (MN/m<sup>2</sup>)</b>	Required Evd (MN/m <sup>2</sup> )	Difference Evd (MN/m <sup>2</sup> )	s/v (ms)	Required Ev2 (MN/m <sup>2</sup> )
0,872	0,784	0,756	0,804	<b>28,0</b>	<b>0,0</b>	<b>28,0</b>	3,897	<b>0,0</b>





Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

## **ANEXO B**

### **Simulación del ensayo triaxial Plaxis 3D.**

---

Project description : Ensayo Triaxial

**Output Version 2013.2.16712.10959**

User name : Centeno Rodriguez &amp; Asociados SC

Project filename : Ensayo Triaxial

Date : 12/05/2015

Output : Información general

Page : 1

**Proyecto**

Nombre Ensayo Triaxial.PLX

Directorio C:\Users\Plaxis\Desktop\ejemplo manual\Ensayo Triaxial.P2DXDAT\

Título Ensayo Triaxial

**General**

Modelo Axisimetría

Elementos de 15 Nodos

**Aceleración**

Ángulo (gravedad) -90,00°

aceleración-x 0,000 G

aceleración-y 0,000 G

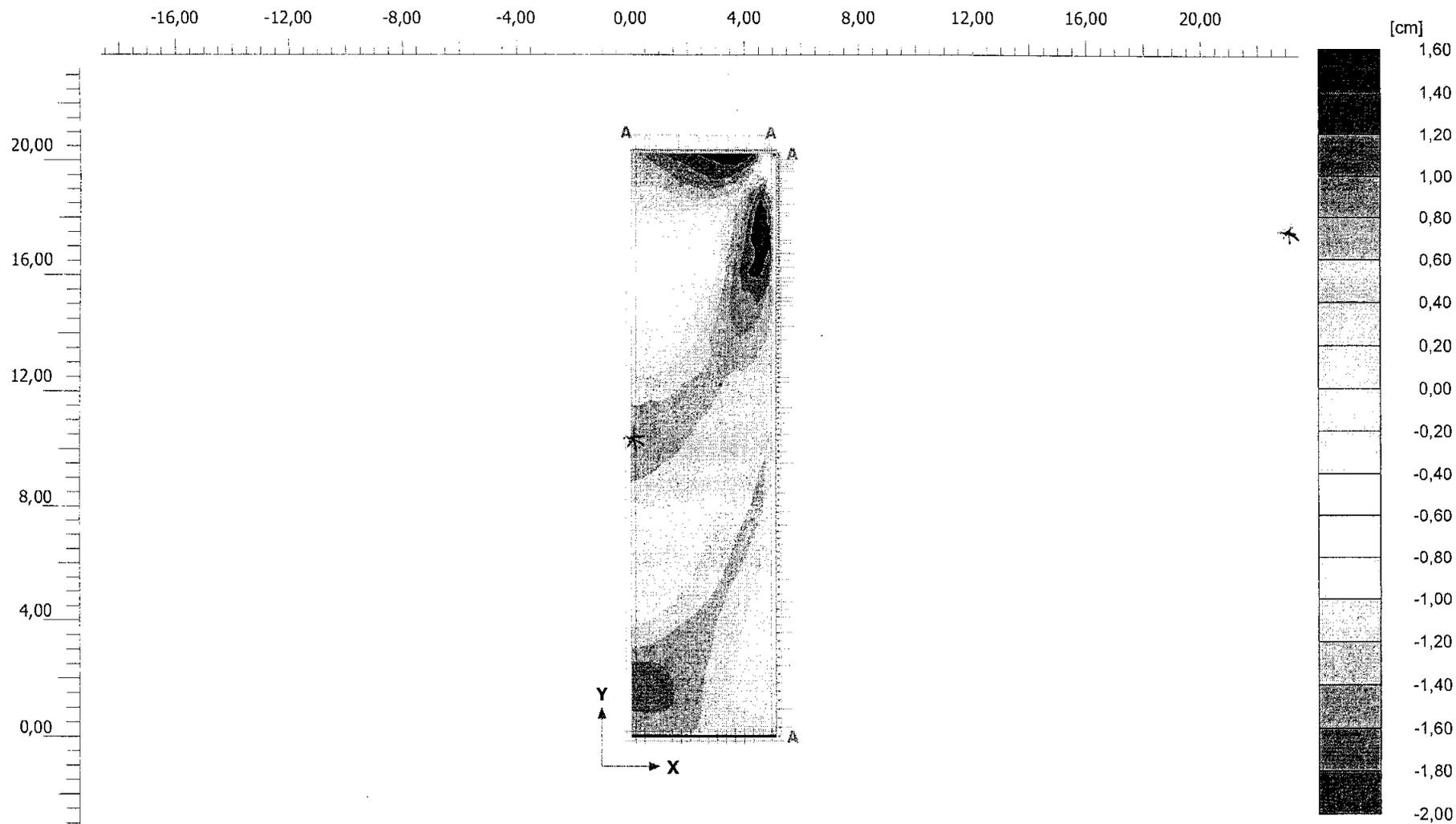
Gravedad 981,0 cm/s<sup>2</sup>**Malla**

No. de elementos de suelo 426

No. de nodos 3569

Tamaño medio de elemento 0,4930 cm

**Comentarios**



**Desplazamientos totales  $u_y$**

Valor máximo = 1,413 cm (Elemento 266 en Nodo 1484)

Valor mínimo = -1,961 cm (Elemento 426 en Nodo 319)

**PLAXIS**

*Project description*

**Ensayo Triaxial**

*Project filename*

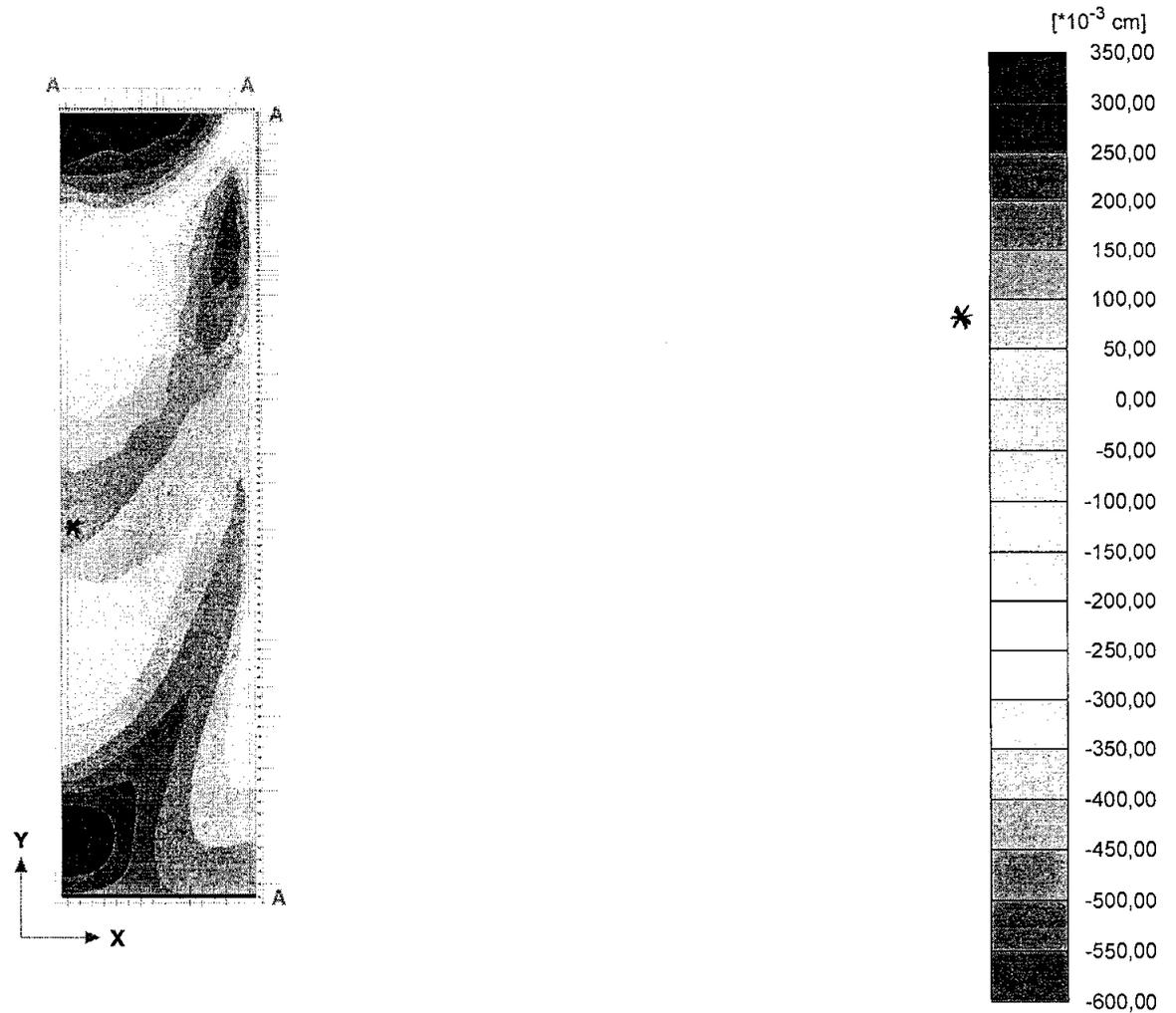
**Ensayo Triaxial**

*Date*

**12/05/2015**

*User name*

**Centeno Rodriguez & Asociados SC**



**Desplazamientos entre fases  $Pu_y$**

Valor máximo = 0,3367 cm (Elemento 406 en Nodo 175)

Valor mínimo = -0,5633 cm (Elemento 426 en Nodo 318)



*Project description*

**Ensayo Triaxial**

*Project filename*

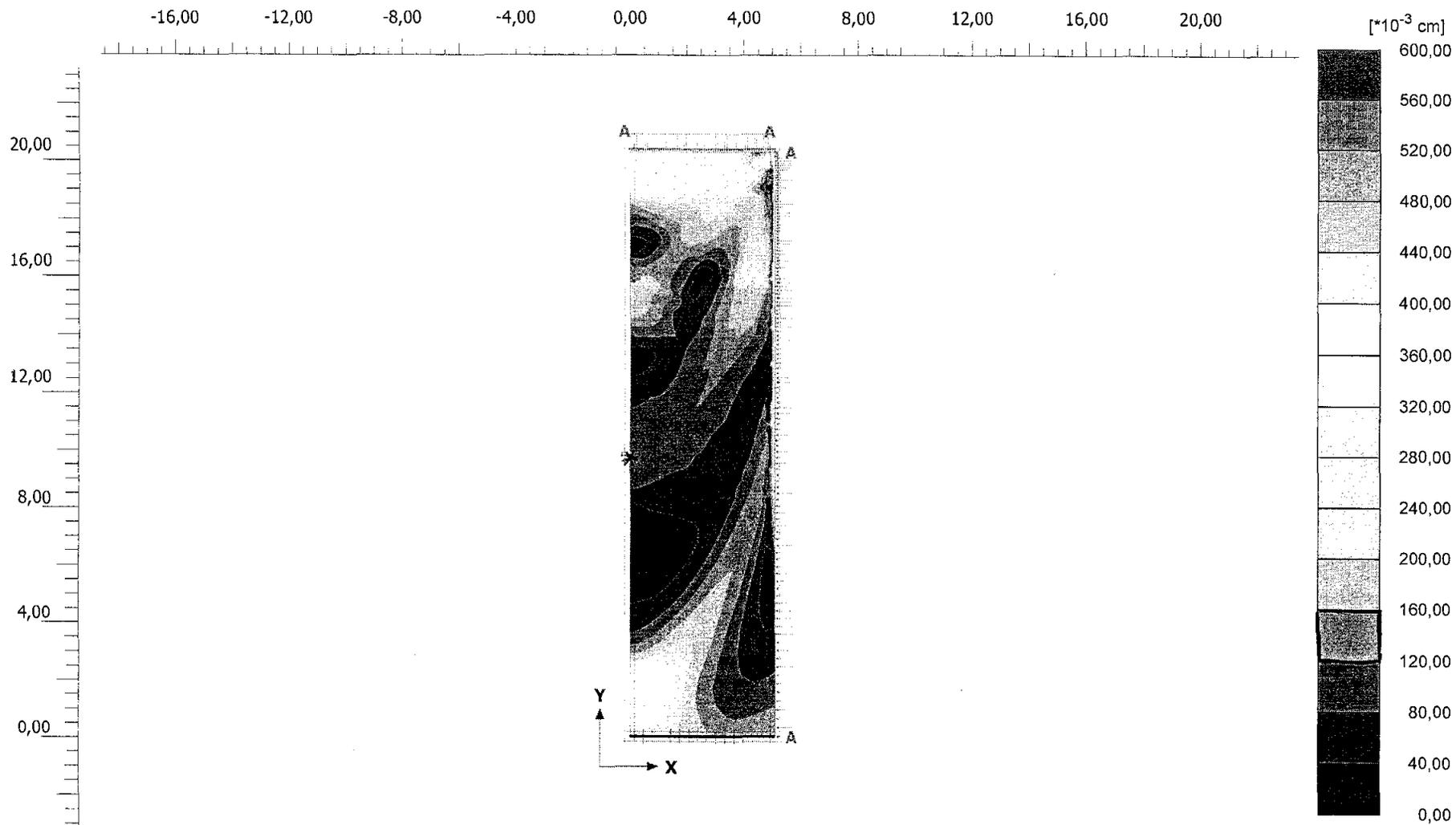
**Ensayo Triaxial**

*Date*

**12/05/2015**

*User name*

**Centeno Rodriguez & Asociados SC**



**Desplazamientos entre fases |Pu|**

Valor máximo = 0,5730 cm (Elemento 426 en Nodo 318)

**PLAXIS**

*Project description*

**Ensayo Triaxial**

*Date*

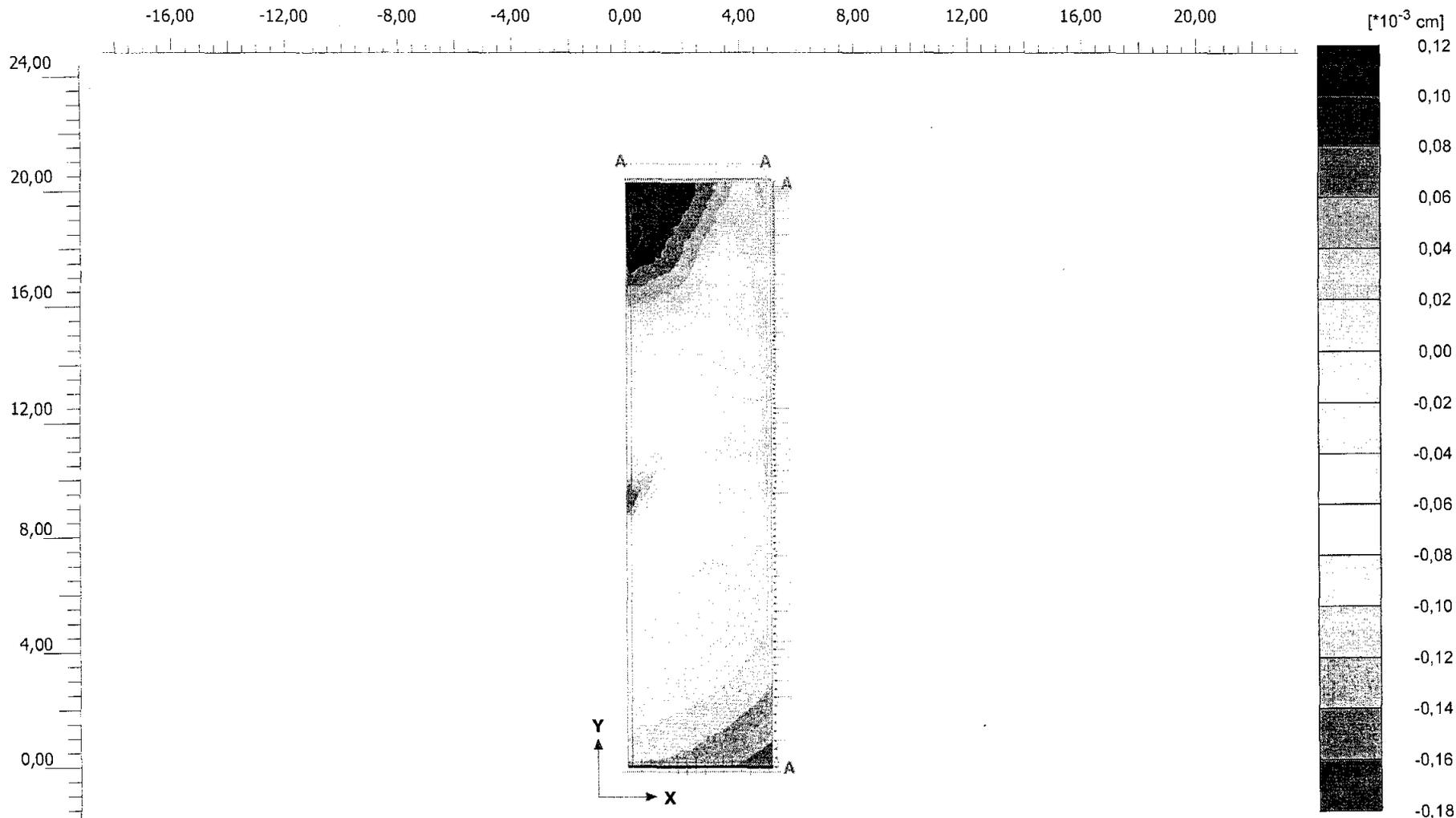
**12/05/2015**

*Project filename*

**Ensayo Triaxial**

*User name*

**Centeno Rodriguez & Asociados SC**



**Incrementos de desplazamientos  $\Delta u_y$**

Valor máximo =  $0,1146 \cdot 10^{-3}$  cm (Elemento 374 en Nodo 609)

Valor mínimo =  $-0,1607 \cdot 10^{-3}$  cm (Elemento 72 en Nodo 2993)



*Project description*

**Ensayo Triaxial**

*Date*

**12/05/2015**

*Project filename*

**Ensayo Triaxial**

*Step*

**724**

*User name*

**Centeno Rodriguez & Asociados SC**



Determinación del módulo resiliente teniendo como base la propagación de ondas de compresión (P) y el principio de piezoelectricidad.

---

## **ANEXO C**

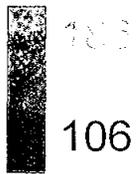
### **Análisis experimental por Desing Expert 7.1.6**

---

modulo resiliente

● Design points above predicted value

○

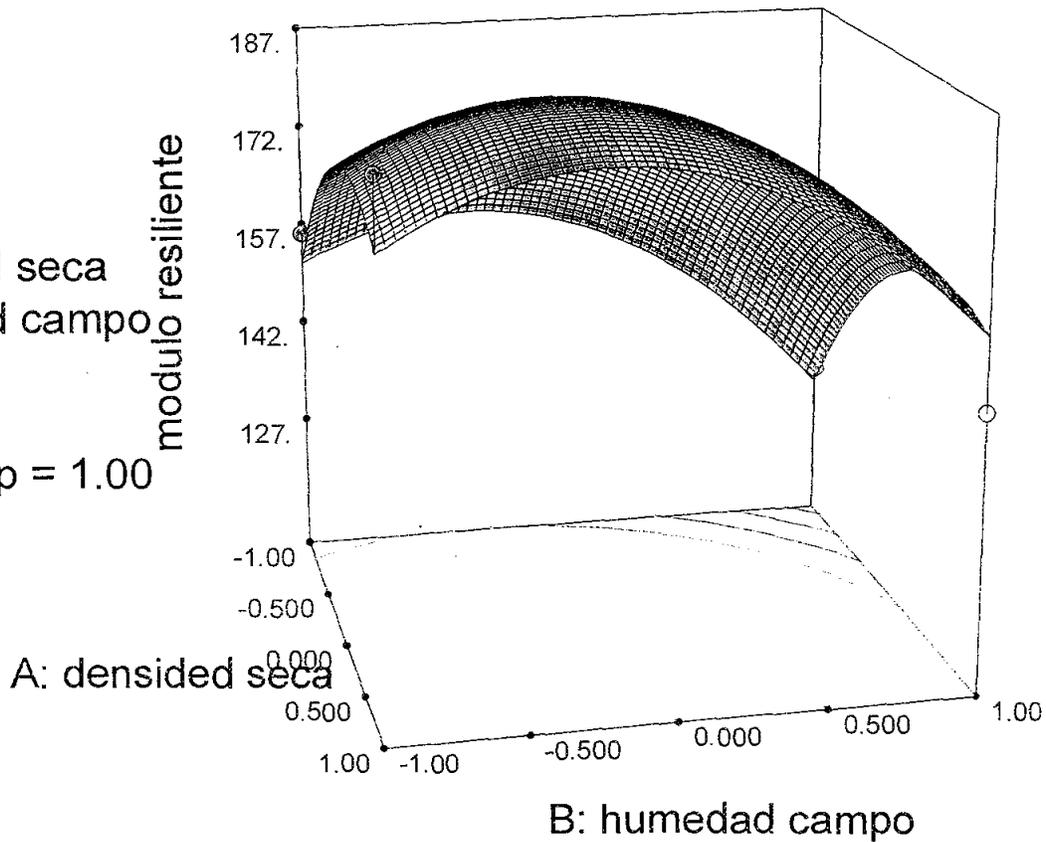


X1 = A: densidad seca

X2 = B: humedad campo

Actual Factor

C: velocidad peop = 1.00



modulo resiliente

● Design points above predicted value

○

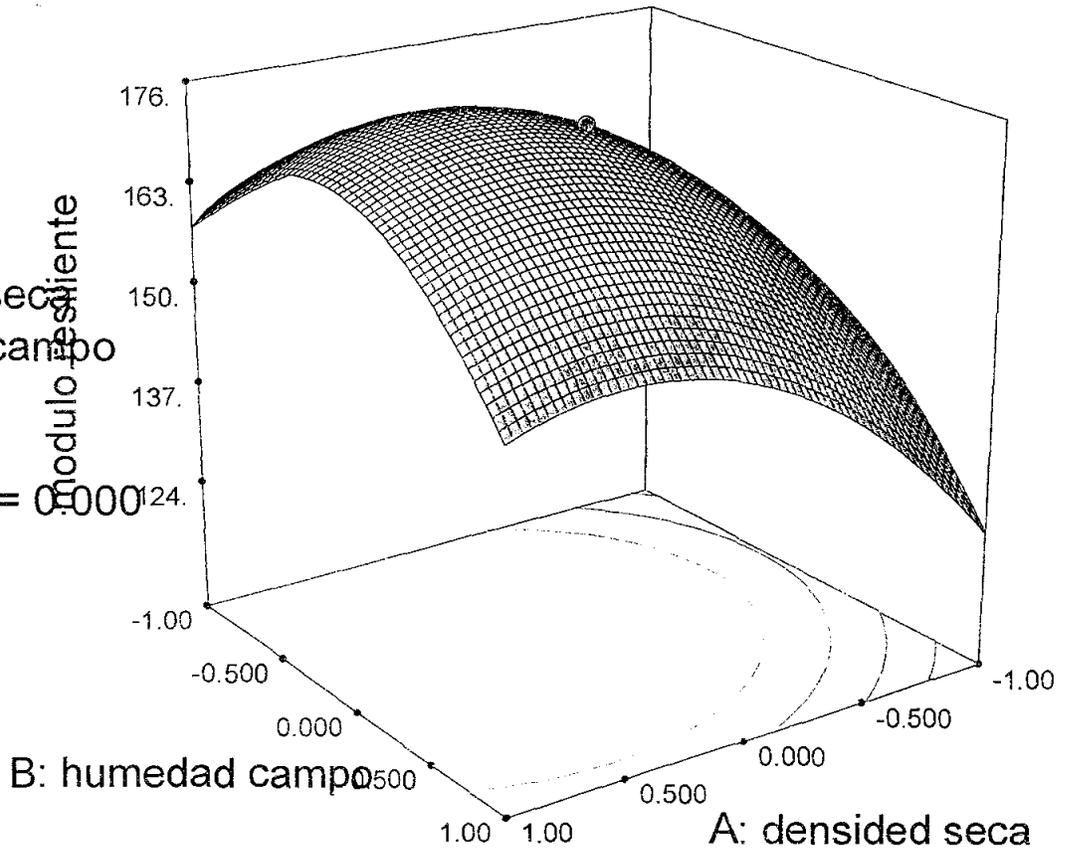


106

X1 = A: densidad seca  
X2 = B: humedad campo

Actual Factor

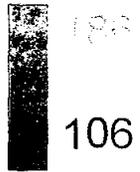
C: velocidad peop = 0.000



modulo resiliente

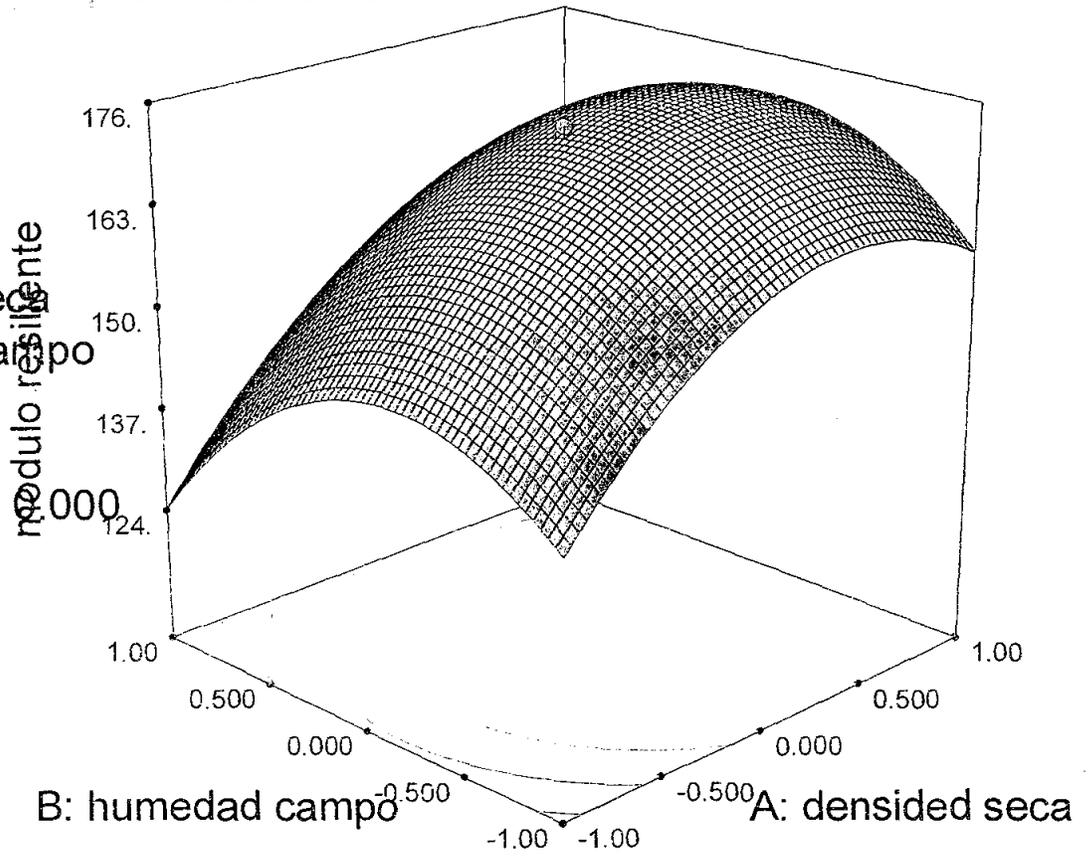
● Design points above predicted value

○



X1 = A: densided seca  
X2 = B: humedad campo

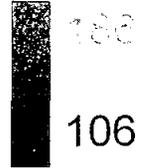
Actual Factor  
C: velocidad peop = 0.000



modulo resiliente

● Design points above predicted value

○



X1 = A: densidad seca  
X2 = B: humedad campo

Actual Factor  
C: velocidad peop = 0.000

