

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

VARIACIÓN DEL MODULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM

PRESENTADO POR:

BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERIO CIVIL

ASESOR:

DR. ING. ADÁN WILBERT SOLÓRZANO MONTESINOS

CUSCO – PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor DR. ING. ADÁN WILBERT SOLÓRZANO MONTESINOS.....
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesistitulada: VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO.....
LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL.....
PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO.....
0+000 - 10+500 KM.....

Presentado por: ELMER CASTRO CANAHUIRE..... DNI N° 76151703.....;
presentado por: ADDERLY PEREZ CANAHUIRE..... DNI N°: 46049831.....
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Civil.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02..... veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 4.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 9 de Octubre..... de 2025.....

Wilbert Solórzano Montesinos
.....
Firma

Post firma Dr. Ing° Adán Wilbert Solórzano Montesinos

Nro. de DNI 23857089.....

ORCID del Asesor 0000-0001-7072-618X.....

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:510063790.....

Adderly y Elmer Perez y Castro

VARIACIÓN DEL MODULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRAS...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:510063790

204 páginas

Fecha de entrega

8 oct 2025, 8:42 p.m. GMT-5

47.768 palabras

Fecha de descarga

8 oct 2025, 10:11 p.m. GMT-5

254.187 caracteres

Nombre del archivo

VARIACIÓN DEL MODULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS E....pdf

Tamaño del archivo

12.5 MB

4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para la...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
15 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada con todo mi amor y gratitud a mis padres y hermanos, quienes han sido mi base, mi apoyo y mi mayor inspiración a lo largo del camino.

En especial, a mi mamá, por su inquebrantable paciencia, su fe en mí, y por ser el ejemplo de esfuerzo, dedicación y amor incondicional. Sus palabras de aliento y su constante presencia que han sido mi fuente inagotable de fortaleza para seguir adelante.

A mi papá, por su guía, sus consejos y por enseñarme con su ejemplo el valor del trabajo, la responsabilidad y los buenos valores sembrados en mí.

A mis hermanos, por ser mi compañía, mi refugio y mi inspiración en los momentos difíciles. Su cariño, sus palabras de aliento y su apoyo incondicional han sido esenciales en este crecimiento profesional

Gracias por todo lo que han hecho por mí. Este logro también es suyo

Adderly Perez Canahuire

Esta tesis representa mucho más que un objetivo académico cumplido; es el resultado de un camino lleno de esfuerzo, dudas y aprendizajes, en la que muchas veces agradezco a varias personas que nos brindaron sus palabras de aliento y motivación para continuar.

Agradezco profundamente a mis padres, por su amor incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, el verdadero significado de la resiliencia. Su apoyo y sacrificio me dieron la fuerza para seguir adelante. A mi hermana, por tu presencia constante, tus palabras de aliento, fuiste guía y motivación; sin tu apoyo incondicional, este logro no habría sido posible. A mis amigos, gracias por su compañía, por sus palabras sinceras y por ofrecerme ánimos cuando más lo necesitaba.

A todos los ingenieros que brindaron su apoyo durante la ejecución de esta tesis, gracias por su tiempo, disposición y compromiso. Su orientación técnica y acompañamiento fueron fundamentales para concretar este trabajo. Este logro también les pertenece, porque sin su colaboración, no habría sido posible.

Elmer Castro Canahuire

Agradecimiento

En primer lugar, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por habernos brindado una formación académica integral y por ser el espacio donde adquirimos no solo conocimientos técnicos, sino también valores y principios que hoy guían nuestra carrera profesional.

A nuestras familias, por su amor incondicional, por su constante apoyo emocional y por ser la base que nos sostuvo en cada etapa de esta travesía. Gracias por su confianza, por creer en nosotros y por impulsarnos a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A nuestros amigos, por acompañarnos durante estos años de formación, por las palabras de aliento, por compartir alegrías, retos y aprendizajes. Su compañía hizo de este camino una experiencia más llevadera y enriquecedora.

De manera muy especial, expresamos nuestra profunda gratitud al Dr. Ing. Adán Wilbert Solórzano Montesinos, asesor de tesis, por su dedicación, guía y compromiso constante. Sus observaciones, sugerencias y acompañamiento técnico fueron fundamentales para la consolidación de este trabajo, así como para nuestro crecimiento profesional.

A todos quienes contribuyeron directa o indirectamente con este logro académico, les extendemos nuestro más profundo agradecimiento.

Bach. Perez Canahuire, Adderly

Bach. Castro Canahuire, Elmer

RESUMEN

La presente investigación evalúa el módulo de resiliencia de la subrasante en el tramo vial San Jerónimo – Paruro (0+000 – 10+500 km), considerando la influencia de los factores climáticos sobre su comportamiento mecánico y su incidencia en el diseño estructural de pavimentos flexibles. Este estudio es relevante porque el módulo resiliente varía en el tiempo debido a los cambios en el contenido de humedad y las condiciones ambientales estacionales. Para ello, se realizaron ensayos triaxiales de carga repetida conforme a la norma AASHTO T 307-99 sobre muestras representativas de dos tipos de suelo. Los resultados obtenidos se compararon con valores estimados mediante correlaciones empíricas basadas en el índice CBR y con las predicciones del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM), el cual simula variaciones mensuales de humedad y temperatura del suelo a partir de datos meteorológicos históricos y determina el grado de saturación mensual.

Los resultados muestran que el módulo de resiliencia disminuye en periodos de alta saturación, con reducciones superiores al 20 % en suelos finos y mayores al 40 % en suelos con predominancia granular. Asimismo, se evidenció que las correlaciones empíricas no estiman adecuadamente la rigidez del material, mientras que los ensayos triaxiales y la simulación climática reflejan de forma más precisa el comportamiento estacional del suelo.

Se concluye que la inclusión de ensayos directos del módulo de resiliencia y la consideración de la variabilidad climática en el diseño permiten mejorar la confiabilidad estructural del pavimento, reduciendo el riesgo de fallos prematuros por sobrestimación de la capacidad del suelo.

Palabras clave: Modulo de resiliencia, Factores climáticos, Subrasante, Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM)

ABSTRACT

The present research evaluates the resilient modulus of the subgrade along the San Jerónimo – Paruro road section (0+000 – 10+500 km), considering the influence of climatic factors on its mechanical behavior and their impact on the structural design of flexible pavements. This study is relevant because the resilient modulus varies over time due to changes in moisture content and seasonal environmental conditions. Repeated load triaxial tests were performed in accordance with AASHTO T 307-99 on representative samples of two soil types. The obtained results were compared with values estimated through empirical correlations based on the CBR index and with predictions from the Enhanced Integrated Climatic Model (EICM), which simulates monthly variations in soil moisture and temperature using historical meteorological data and determines the monthly degree of saturation.

The results show that the resilient modulus decreases significantly during periods of high saturation, with reductions exceeding 20% in fine-grained soils and over 40% in soils with a higher proportion of granular particles. Furthermore, it was found that empirical correlations do not accurately estimate the material stiffness, while triaxial tests and climatic simulations provide a more precise representation of the soil's seasonal behavior.

It is concluded that incorporating direct resilient modulus tests and accounting for climatic variability in the design process improve the structural reliability of pavements, reducing the risk of premature failures caused by overestimation of the soil's structural capacity.

Keywords: Resilience modulus, Climate factors, Subgrade, Enhanced Integrated Climatic Model (EICM)

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1 : ASPECTOS GENERALES	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1.1 Situación problemática	3
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.3.1 Teórica	4
1.3.2 Practica	4
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
CAPITULO 2 : MARCO TEORICO CONCEPTUAL	6
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1.1 Antecedentes a nivel Internacional	6
2.1.2 Antecedentes a nivel Nacional	8
2.2 BASES TEÓRICAS	9
2.2.1 Generalidades del desempeño de pavimentos	9
2.2.2 Módulo de resiliencia: Respuesta mecánica del suelo	12
2.2.3 Factores que afectan al módulo de resiliencia	15
2.2.4 Influencia de los factores ambientales en la subrasante	16
2.2.5 Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM): Condiciones climáticas en la subrasante	17
2.2.6 Modelos de predicción del Módulo resiliente por factores climáticos	20
2.2.7 Determinación del Módulo de resiliencia en laboratorio	21
2.2.8 Estimación del módulo de resiliencia mediante relaciones empíricas (CBR)	23
2.2.9 Teoría de Multicapa Elástica	23
2.3 MARCO LEGAL	26
2.3.1 Método de guía AASHTO 93 de diseño para pavimento flexible	26
2.3.2 Folleto de diseño para la determinación de la subrasante de diseño en Apoyo a la guía AASHTO 1993 (1997)	30
2.3.3 AASTHO T 307-99 (2012): Determinación del módulo de resiliencia de suelos y materiales agregados	32
2.3.4 Procesamiento de los resultados obtenidos en laboratorio (AASHTO T307-99)	34

2.3.5	<i>Manual de Carreteras: Suelos, Geología y Geotecnia – MTC (2014)</i>	36
2.3.6	<i>Manual de Ensayo de Materiales para Carreteras – MTC</i>	37
2.3.7	<i>Norma Técnica E.050: Suelos y Cimentaciones</i>	37
2.4	MARCO CONCEPTUAL	37
2.4.1	<i>Base</i>	37
2.4.2	<i>California Bearing Ratio (CBR)</i>	37
2.4.3	<i>Celda triaxial</i>	37
2.4.4	<i>Carpeta asfáltica</i>	38
2.4.5	<i>Drenaje</i>	38
2.4.6	<i>Deformación elástica</i>	38
2.4.7	<i>Deformación plástica</i>	38
2.4.8	<i>Diseño Mecánico-Empírico (MEPDG)</i>	38
2.4.9	<i>Infiltración</i>	38
2.4.10	<i>Homogeneidad geotécnica</i>	39
2.4.11	<i>Índice de Thornthwaite (TMI)</i>	39
2.4.12	<i>Módulo resiliente</i>	39
2.4.13	<i>Modelo climático integrado mejorado (EICM)</i>	39
2.4.14	<i>Esfuerzo de confinamiento</i>	39
2.4.15	<i>Esfuerzo de corte octaédrico</i>	39
2.4.16	<i>Esfuerzo desviador</i>	39
2.4.17	<i>Esfuerzos principales</i>	40
2.4.18	<i>Pavimentos flexibles</i>	40
2.4.19	<i>Pavimentos rígidos</i>	40
2.4.20	<i>Presión de inflado estándar</i>	40
2.4.21	<i>Factor de daño relativo</i>	40
CAPITULO 3 : HIPOTESIS Y VARIABLES		41
3.1	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	41
3.1.1	<i>Hipótesis general</i>	41
3.1.2	<i>Hipótesis específicas</i>	41
3.2	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES	41
3.2.1	<i>Variable independiente (X)</i>	41
3.2.2	<i>Variable dependiente (Y)</i>	42
3.2.3	<i>Dimensiones</i>	42
CAPITULO 4 : METODOLOGIA DE INVESTIGACION		43
4.1	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	43
4.2	ÁMBITO DE ESTUDIO: LOCALIZACIÓN POLÍTICA Y GEOGRÁFICA	43

4.3	TIPO, NIVEL Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	43
4.3.1	<i>Tipo de investigación</i>	43
4.3.2	<i>Nivel de investigación</i>	43
4.3.3	<i>Diseño de investigación</i>	43
4.4	UNIDAD DE ANÁLISIS	44
4.5	POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	44
4.6	MUESTRA.....	44
4.6.1	<i>Tamaño de la muestra</i>	44
4.6.2	<i>Características de la muestra en los ensayos de módulo de resiliencia</i>	44
4.7	TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	45
4.7.1	<i>Técnicas</i>	45
4.7.2	<i>Instrumentos</i>	46
4.8	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	46
4.9	DISEÑO METODOLÓGICO	47
4.10	EXPLORACIÓN DE CALICATAS	49
4.10.1	<i>Ubicación</i>	49
4.10.2	<i>Extracción de muestras a través de la excavación de calicatas</i>	50
4.11	ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO	53
4.11.1	<i>Ensayos para determinar las Características del Suelo</i>	53
4.11.2	<i>Ensayos para determinar las propiedades mecánicas del Suelo</i>	61
4.12	ENSAYO DEL MÓDULO RESILIENTE EN LABORATORIO	66
4.12.1	<i>Modulo Resiliente de suelos de subrasante (AASHTO T-307)</i>	67
4.12.2	<i>Variación del contenido de humedad de los especímenes</i>	74
4.12.3	<i>Relaciones constitutivas</i>	76
4.12.4	<i>Teoría multicapa elástica</i>	77
4.13	CÁLCULO DEL MÓDULO POR INFLUENCIA CLIMÁTICA	79
4.13.1	<i>Cálculo del Índice de Thornthwaite</i>	79
4.13.2	<i>Cálculo de la Evapotranspiración Potencial</i>	80
4.13.3	<i>Cálculo de succión del suelo</i>	82
4.13.4	<i>Cálculo de la saturación</i>	83
4.13.5	<i>Relación entre las mediciones directas y la estimación de los módulos resilientes</i>	85
	CAPITULO 5 : EQUIPO DE MEDICION DIRECTA MR.....	87
5.1	DESCRIPCIÓN	87
5.2	COMPONENTES DEL HARDWARE.....	88
5.2.1	<i>Servomotor (LEMA)</i>	88
5.2.2	<i>Celda triaxial</i>	89

5.2.3	<i>Unidad de control, emisor y receptor RM</i>	89
5.2.4	<i>LVDTs</i>	92
5.2.5	<i>Transductor de presión</i>	93
5.3	DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	93
5.3.1	<i>Main_Civil 19v</i>	94
CAPITULO 6 : RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....		97
6.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	97
6.1.1	<i>Subtramo: km 0+000 – 04+000</i>	97
6.1.2	<i>Subtramo: km 04+000 – 07+500</i>	99
6.1.3	<i>Subtramo: km 07+500 – 10+500</i>	103
6.1.4	<i>Resultados consolidados</i>	106
6.2	LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	107
6.2.1	<i>Limite liquido</i>	107
6.2.2	<i>Limite Plástico e índice de plasticidad</i>	118
6.3	GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS MEDIANTE PICNÓMETRO DE AGUA.....	124
6.4	ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO	125
6.5	ENSAYO CBR DE SUELOS.....	128
6.1	DATOS METEOROLÓGICOS	134
6.2	CURVA SWCC (SUCCIÓN MATRICIAL).....	137
6.2.1	<i>Constantes y parámetros para el cálculo del modelo de regresión SWCC</i>	137
6.2.2	<i>Modelamiento de la curva SWCC</i>	138
6.3	ENSAYO DE MODULO DE RESILIENCIA.....	141
6.3.1	<i>Primer Subtramo</i>	141
6.3.2	<i>Segundo Subtramo</i>	150
CAPITULO 7 : ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		159
7.1	PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	159
7.1.1	<i>Clasificación de suelos y límites de consistencia</i>	159
7.2	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO	161
7.2.1	<i>Compactación Proctor modificado</i>	161
7.2.2	<i>CBR (California Bearing Ratio)</i>	162
7.3	ESTADO DE TENSIÓN EN EL MODELO DE COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO RESILIENTE.....	162
7.3.1	<i>Graficas del estado de tensiones a diferentes contenidos de humedad en el primer subtramo</i>	164
7.3.2	<i>Graficas del estado de tensiones a diferentes contenidos de humedad en el segundo subtramo</i> ..	166
7.1	RESULTADOS DEL MÓDULO RESILIENTE POR MEDIO DE LA TEORÍA MULTICAPA ELÁSTICA.....	167
7.1.1	<i>Resumen consolidado de las graficas</i>	169

7.1.2	<i>Correlaciones que involucran el CBR</i>	171
7.2	MODULO RESILIENTE DE DISEÑO.....	172
7.2.1	<i>Factor ambiental</i>	173
7.2.2	<i>Cálculo del módulo resiliente mensual</i>	173
7.2.3	<i>Daño relativo y Modulo resiliente de diseño</i>	176
7.3	DISCUSIÓN DE RESULTADOS RESPECTO A LOS ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	178
	CAPITULO 8 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	180
8.1	CONCLUSIONES.....	180
8.2	RECOMENDACIONES	181
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	183
	ANEXOS	186

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Clasificación climática de Thornthwaite</i>	18
Tabla 2 <i>Coefficientes de capas estructurales</i>	29
Tabla 3 <i>Secuencia de prueba para el suelo de subrasante</i>	34
Tabla 4 <i>Serie de Tamices para el Análisis Granulométrico</i>	53
Tabla 5 <i>Módulos elásticos (E) y relación de poisson (v) típicos en materiales para pavimentación</i>	78
Tabla 6 <i>Propiedades de las capas del pavimento</i>	79
Tabla 7 <i>Constantes de regresión de TMI-P200/wPI para subrasantes</i>	82
Tabla 8 <i>Valores de los parámetros para el modelo de ajuste del Módulo Resiliente por clima</i> .	86
Tabla 9 <i>Lavado de material para la granulometría</i>	97
Tabla 10 <i>Granulometría de la calicata del kilómetro 01+500</i>	97
Tabla 11 <i>Granulometría de la calicata del kilómetro 02+200</i>	98
Tabla 12 <i>Granulometría de la calicata del kilómetro 03+060</i>	98
Tabla 13 <i>Lavado de material para la granulometría</i>	99
Tabla 14 <i>Granulometría de la calicata de kilómetro 04+040</i>	100
Tabla 15 <i>Granulometría de la calicata de kilómetro 05+360</i>	100
Tabla 16 <i>Granulometría de la calicata de kilómetro 06+550</i>	101
Tabla 17 <i>Granulometría de la calicata de kilómetro 07+400</i>	102
Tabla 18 <i>Lavado de material para la granulometría</i>	103
Tabla 19 <i>Granulometría de la calicata del kilómetro 08+300</i>	104
Tabla 20 <i>Granulometría de la calicata del kilómetro 09+630</i>	104
Tabla 21 <i>Granulometría de la calicata del kilómetro 10+500</i>	105
Tabla 22 <i>Lavado de material para la granulometría</i>	106
Tabla 23 <i>Análisis granulométrico por tamizado de todas las calicatas</i>	107
Tabla 24 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 01+500 km</i>	107
Tabla 25 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 02+200 km</i>	108
Tabla 26 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 03+060 km</i>	109
Tabla 27 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 04+040 km</i>	110
Tabla 28 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 05+360 km</i>	111
Tabla 29 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 06+550 km</i>	112
Tabla 30 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 07+400 km</i>	113
Tabla 31 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 08+300 km</i>	114
Tabla 32 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 09+630 km</i>	115
Tabla 33 <i>Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 10+500 km</i>	116

Tabla 34	<i>Contenido de Humedad para Limite Liquido de las Calicata</i>	117
Tabla 35	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 01+500</i>	118
Tabla 36	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 02+200</i>	118
Tabla 37	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 03+060</i>	119
Tabla 38	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 04+040</i>	119
Tabla 39	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 05+360</i>	120
Tabla 40	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 06+550</i>	120
Tabla 41	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 07+400</i>	121
Tabla 42	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 08+300</i>	122
Tabla 43	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 09+630</i>	122
Tabla 44	<i>Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 10+500</i>	123
Tabla 45	<i>Limite Plástico e Índice de Plasticidad para las calicatas</i>	123
Tabla 46	<i>Gravedad Especifica</i>	124
Tabla 47	<i>Gravedad Especifica</i>	124
Tabla 48	<i>Resumen consolidado de los resultados de Gravedad Especifica</i>	125
Tabla 49	<i>Datos del ensayo Proctor modificado primer subtramo</i>	125
Tabla 50	<i>Datos del ensayo Proctor modificado segundo subtramo</i>	126
Tabla 51	<i>Datos del ensayo Proctor modificado tercer subtramo</i>	127
Tabla 52	<i>Datos consolidados del ensayo Proctor modificado todas las calicatas</i>	127
Tabla 53	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 01+500</i>	128
Tabla 54	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 02+200</i>	128
Tabla 55	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 03+060</i>	129
Tabla 56	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 04+040</i>	130
Tabla 57	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 05+360</i>	130
Tabla 58	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 06+550</i>	131
Tabla 59	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 07+400</i>	132
Tabla 60	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 08+300</i>	132
Tabla 61	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 09+630</i>	133
Tabla 62	<i>Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 10+500</i>	134
Tabla 63	<i>Variables climáticas promedio Estación Kayra</i>	135
Tabla 64	<i>Cálculo del índice de Thornthwaite</i>	136
Tabla 65	<i>Constantes de regresión de TMI-P200/wPI por subtramos</i>	137
Tabla 66	<i>Parámetros de condición compactada por subtramos</i>	137
Tabla 67	<i>Parámetros de la curva SWCC por tramos</i>	138
Tabla 68	<i>Grado de saturación correspondiente a su succión matricial</i>	138
Tabla 69	<i>Grado de saturación por tramos para el año 2024</i>	140
Tabla 70	<i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: opt)</i>	141

Tabla 71 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 2.80)</i>	142
Tabla 72 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 4.47)</i>	143
Tabla 73 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 8.63)</i>	144
Tabla 74 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 9.38)</i>	145
Tabla 75 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 11.27)</i>	146
Tabla 76 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 14.50)</i>	147
Tabla 77 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 18.50)</i>	148
Tabla 78 <i>Ecuación constitutiva del primer subtramo respecto al contenido de humedad</i>	149
Tabla 79 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: opt)</i>	150
Tabla 80 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 1.50)</i>	151
Tabla 81 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 2.41)</i>	152
Tabla 82 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 4.04)</i>	153
Tabla 83 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 5.93)</i>	154
Tabla 84 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 9.97)</i>	155
Tabla 85 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 12.35)</i>	156
Tabla 86 <i>Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia (w%: 14.05)</i>	157
Tabla 87 <i>Ecuación constitutiva del segundo subtramo respecto al contenido de humedad</i>	158
Tabla 88 <i>Análisis granulométrico por tamizado de todas las calicatas</i>	159
Tabla 89 <i>Límites de consistencia y clasificación por método AASHTO</i>	160
Tabla 90 <i>Fracciones granulométricas para todas las calicatas</i>	160
Tabla 91 <i>Resumen de clasificación final de métodos SUCS y AASHTO de subrasante</i>	161
Tabla 92 <i>Resumen de porcentajes óptimos de agua</i>	162
Tabla 93 <i>Resumen de valores de CBR por calicatas al 1"</i>	162
Tabla 94 <i>Resultados ensayo modulo resiliente</i>	168
Tabla 95 <i>Resultados ensayo modulo resiliente</i>	169
Tabla 96 <i>Ecuación constitutiva del primer con el determinado estado tensional</i>	169
Tabla 97 <i>Ecuación constitutiva del segundo subtramo con el determinado estado tensional</i> ..	170
Tabla 98 <i>Calculo del Módulo de resiliencia por correlaciones de CBR</i>	171
Tabla 99 <i>Calculo del Módulo de resiliencia por correlaciones de CBR</i>	172
Tabla 100 <i>Calculo del Módulo de resiliencia por correlaciones de CBR</i>	172
Tabla 101 <i>Factor Ambiental para cada subtramo calculado para el año 2024</i>	173
Tabla 102 <i>Comparación de los datos de humedad del modelo climatico y los especimenes ensayados en el primer subtramo</i>	174
Tabla 103 <i>Comparación de resultados de laboratorio y el modelo a partir de parámetros alcanzados por Zapata et al. (2007)</i>	174
Tabla 104 <i>Comparación de los datos de humedad del modelo climatico y los especimenes ensayados en el segundo subtramo</i>	175

Tabla 105 <i>Comparación de resultados de laboratorio y el modelo a partir de parámetros alcanzados por Zapata et al. (2007)</i>	175
Tabla 106 <i>Resultado de Modulo resiliente por mes según el modelo propuesto</i>	176
Tabla 107 <i>Calculo del módulo de resiliencia de diseño a partir del daño relativo</i>	177
Tabla 108 <i>Calculo del módulo de resiliencia de diseño a partir del daño relativo</i>	177
Tabla 109 <i>Calculo del módulo de resiliencia de diseño a partir del daño relativo</i>	178

Índice de figuras

Figura 1 Estructura y distribución típica de esfuerzos del pavimento flexible	10
Figura 2 Estructura y distribución típica de esfuerzos del pavimento rígido	10
Figura 3 Partes que conforman el pavimento flexible.....	11
Figura 4 Estado de esfuerzos en la subrasante provocado por el paso de vehículos	12
Figura 5 Esquema de esfuerzos al que son sometidas muestras de ensayo.....	13
Figura 6 Secuencia de carga y descarga y los parámetros asociados	13
Figura 7 Deformaciones bajo un ensayo de carga repetida	14
Figura 8 Comportamiento del Módulo de resiliencia en suelos cohesivos y granulares	16
Figura 9 Movimiento de la humedad en la carretera	17
Figura 10 Curva característica suelo-agua para un suelo arenoso, un suelo limoso y un suelo arcilloso.....	19
Figura 11 Predicción de la curva SWCC	20
Figura 12 Variación del Factor ambiental en función al cambio de saturación	21
Figura 13 Equipo Triaxial cíclico	22
Figura 14 Esfuerzo y deformación en la subrasante debidas al paso de un vehículo	22
Figura 15 Modelo de un sistema elástico multicapa	24
Figura 16 Presión de contacto y presión de inflado de neumáticos.....	25
Figura 17 Espesores mínimos en función del Número Estructural	28
Figura 18 Cálculo del módulo de resiliencia de diseño a partir de valores estacionales.....	30
Figura 19 Pulso de carga Haversine.....	33
Figura 20 Numero de ciclos al cual la muestra presenta deformaciones elásticas	35
Figura 21 Grafica de dos ciclos de onda haversine: (a)Esfuerzo axial vs tiempo y (b)Desplazamiento del LVDT vs tiempo.....	36
Figura 22 Diagrama de flujo de la investigación.....	48
Figura 23 Diagrama de flujo para el cálculo del módulo resiliente	49
Figura 24 CU-123; Vía San Jerónimo a Paruro, tramo 0+000 - 10+500 KM.....	50
Figura 25 Superficie de rodadura de la vía de estudio	50
Figura 26 Exploración de calicatas	51
Figura 27 Exploración de calicatas	51
Figura 28 Excavación y extracción de Calicatas	52
Figura 29 Excavación y extracción de Calicatas	52
Figura 30 Excavación y extracción de Calicatas	52
Figura 31 Secado de suelos	54
Figura 32 Lavado de material por la malla # 200	55

Figura 33 <i>Análisis Granulométrico</i>	55
Figura 34 <i>Análisis Granulométrico</i>	55
Figura 35 <i>Equipos y Materiales usados para el Ensayo de Limite Liquido</i>	57
Figura 36 <i>Procedimiento del Ensayo de Limite Liquido</i>	57
Figura 37 <i>Procedimiento para la obtención del Limite Plástico</i>	58
Figura 38 <i>Pesaje del matraz con agua destilada y su introducción de suelo en el matraz</i>	60
Figura 39 <i>Utilización de la bomba de vacío para la eliminación del aire</i>	60
Figura 40 <i>Pesaje del suelo introducido en el matraz</i>	60
Figura 41 <i>Ensayo de Proctor Modificado con molde de 4" para suelo fino</i>	62
Figura 42 <i>Ensayo de Proctor Modificado con molde de 6" para suelo de grano grueso</i>	62
Figura 43 <i>Enrasado del suelo en el molde de 6"</i>	62
Figura 44 <i>Ensayo de Proctor Modificado con molde de 6" para suelo de grano grueso</i>	63
Figura 45 <i>Preparación y Compactación CBR</i>	64
Figura 46 <i>Preparado y compactado de muestras CBR</i>	64
Figura 47 <i>Enrasado e inmersión de moldes</i>	65
Figura 48 <i>Peso e Inmersión CBR</i>	65
Figura 49 <i>Lectura y Penetración CBR</i>	65
Figura 50 <i>Lectura y Penetración CBR</i>	66
Figura 51 <i>Equipo Triaxial Cíclico</i>	67
Figura 52 <i>Compactación de muestras Modulo Resiliencia</i>	69
Figura 53 <i>Pesaje de las muestras compactadas de diámetros de 10 cm y 7 cm</i>	69
Figura 54 <i>Muestras compactadas de diámetro de 10 cm</i>	70
Figura 55 <i>Materiales utilizados en el ensayo de módulo de resiliencia</i>	70
Figura 56 <i>Montaje de muestra de diámetro de 7cm</i>	71
Figura 57 <i>Montaje de la muestra dentro de la celda triaxial</i>	72
Figura 58 <i>Montaje finalizado de la muestra</i>	73
Figura 59 <i>Inicialización de Ensayo Modulo Resiliente</i>	73
Figura 60 <i>Especímenes post ensayo</i>	73
Figura 61 <i>Inyección de agua con el equipo Flowtrac II</i>	74
Figura 62 <i>Muestras post compactadas para su posterior proceso de saturación</i>	75
Figura 63 <i>Muestras de diámetro de 10 cm en el proceso de saturación</i>	76
Figura 64 <i>Muestras con distintos del contenido de humedad</i>	76
Figura 65 <i>Modelo MEPDG actual para predicción de FU</i>	85
Figura 66 <i>Equipo de medición directa del Módulo resiliente</i>	87
Figura 67 <i>Servomotor (LEMA)</i>	88
Figura 68 <i>Celda triaxial para muestras de diámetro de 10cm y 7 cm</i>	89
Figura 69 <i>Desarrollo de la unidad de control</i>	90

Figura 70 Unidad de control RM	90
Figura 71 Acondicionadores de señales.....	91
Figura 72 Servo drive Allen Bradley 2098-DSD-020.....	91
Figura 73 Tarjeta de Control	92
Figura 74 Transformador diferencial de variación lineal.....	93
Figura 75 Transductores de presión Honeywell.....	93
Figura 76 Diagrama de programación del ejecutable " Main_Civil 19v".....	94
Figura 77 Pagina 1 del ejecutable Main Civil_v19.....	95
Figura 78 Pagina 2 del ejecutable Main Civil_v19.....	96
Figura 79 Análisis de los resultados exportados en Python.....	96
Figura 80 Curva SWCC por subtramos.....	139
Figura 81 Succión matricial para cada mes bajo las constantes halladas por Zapata.....	140
Figura 82 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: opt).....	142
Figura 83 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 2.80).....	143
Figura 84 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 4.47).....	144
Figura 85 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 8.63).....	145
Figura 86 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 9.38).....	146
Figura 87 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 11.27).....	147
Figura 88 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 14.50).....	148
Figura 89 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 18.50).....	149
Figura 90 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: opt).....	150
Figura 91 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 1.50).....	151
Figura 92 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 2.41).....	152
Figura 93 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 4.04).....	153
Figura 94 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 5.93).....	154
Figura 95 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 9.97).....	155
Figura 96 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 12.35).....	156
Figura 97 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia (w%: 14.05).....	157
Figura 98 Grafica del módulo de resiliencia de la subrasante del primer subtramo con distinto contenido de humedad: (a)%w=2.8, (b)%w=4.47, (c)%w=8.63, (d)%w=9.38, (e)%w=11.27, (f)%w=12.5, (g)%w=14.5 y (h)%w=18.5.	164
Figura 99 Grafica del módulo de resiliencia de la subrasante del segundo subtramo con distinto contenido de humedad: (a)%w=1.5, (b)%w=2.41, (c)%w=4.04, (d)%w=5.93, (e)%w=9.46, (f)%w=9.97, (g)%w=12.35 y (h)%w=14.05.	166
Figura 100 Estructura para el cálculo del módulo resiliente	168

Índice de ecuaciones

Ecuación(1) <i>Modulo resiliente</i>	14
Ecuación(2) <i>Succión Matricial</i>	19
Ecuación(3) <i>Modelo de predicción del modulo resiliente</i>	20
Ecuación(4) <i>Modulo de resiliencia a partir del CBR 1</i>	23
Ecuación(5) <i>Modulo de resiliencia a partir del CBR 2</i>	23
Ecuación(6) <i>Ecuacion para el diseño de la estructura del pavimento</i>	26
Ecuación(7) <i>Numero estructural total</i>	28
Ecuación(8) <i>Daño relativo</i>	29
Ecuación(9) <i>Ecuación constitutiva MR 1</i>	31
Ecuación(10) <i>Ecuación constitutiva MR 2</i>	31
Ecuación(11) <i>Ecuación constitutiva MR 3</i>	32
Ecuación(12) <i>Ecuación constitutiva MR 4</i>	32
Ecuación(13) <i>Onda Haversine</i>	32
Ecuación(14) <i>Modulo de resiliencia laboratorio</i>	35
Ecuación(15) <i>Porcentaje que pasa la malla #200</i>	54
Ecuación(16) <i>Peso retenido</i>	54
Ecuación(17) <i>Porcentaje que pasa</i>	54
Ecuación(18) <i>Limite plastico</i>	58
Ecuación(19) <i>Indice de plasticidad</i>	58
Ecuación(20) <i>Gravedad especifica</i>	59
Ecuación(21) <i>Densidad Seca</i>	61
Ecuación(22) <i>Ecuación constitutiva MR 4</i>	77
Ecuación(23) <i>Suma de esfuerzos principales</i>	77
Ecuación(24) <i>Esfuerzo de corte octaédrico</i>	77
Ecuación(25) <i>Indice de humedad</i>	79
Ecuación(26) <i>Indice de aridez</i>	79
Ecuación(27) <i>Indice de thornthwaite</i>	79
Ecuación(28) <i>Indice de calor mensual</i>	80
Ecuación(29) <i>Indice de calor anual</i>	80
Ecuación(30) <i>Evapotranspiración sin corregir</i>	80
Ecuación(31) <i>Parametro "a"</i>	80
Ecuación(32) <i>Evapotranspiración corregido</i>	80
Ecuación(33) <i>Almacenamiento o reserva del mes 1</i>	81
Ecuación(34) <i>Almacenamiento o reserva del mes 2</i>	81

Ecuación(35) <i>Almacenamiento o reserva del mes 3</i>	81
Ecuación(36) <i>EXCESO</i>	82
Ecuación(37) <i>DEFICIT</i>	82
Ecuación(38) <i>Succión matricial</i>	82
Ecuación(39) <i>Indice de plasticidad ponderado</i>	82
Ecuación(40) <i>Contenido de humedad optimo volumetrico</i>	83
Ecuación(41) <i>Saturación optima</i>	83
Ecuación(42) <i>Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas</i>	83
Ecuación(43) <i>Ecuación SWCC</i>	83
Ecuación(44) <i>Función de corrección de la curva SWCC</i>	84
Ecuación(45) <i>Grado de saturación</i>	84
Ecuación(46) <i>Factor ambiental</i>	85

INTRODUCCIÓN

Existen diversas metodologías empleadas para el diseño de pavimentos. Una de las más reconocidas a nivel internacional son las guías de diseño American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), las cuales presentan parámetros como el módulo de resiliencia de la subrasante que es fundamental para el diseño de estructuras viales (Pérez García et al., 2012). Es por ello que en la presente investigación nos planteamos el estudio del módulo de resiliencia de la carretera San Jerónimo a Paruro (tramo 0+000-10+500 km) por ensayos cíclicos. El módulo de resiliencia no es un valor constante, ya que está sujeto a variaciones impuestas por factores ambientales propios del entorno geográfico donde se localiza la estructura vial. Dado que el pavimento se encuentra expuesto al medio ambiente, es de esperar que las condiciones climáticas influyan en su comportamiento (Hussan et al., 2013). Existe la necesidad de analizar el comportamiento del módulo de resiliencia en la subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro, ubicada en una región andina con variabilidad climática. Las marcadas fluctuaciones estacionales en el contenido de humedad del suelo pueden afectar el desempeño estructural del pavimento, por lo que deben ser consideradas en el diseño.

En la carpeta de rodadura, los cambios de temperatura pueden ablandarla o endurecerla, mientras que en los suelos y materiales granulares, la principal causa de variabilidad está asociada a los cambios en el contenido de humedad. De todos los factores climáticos, la precipitación se identifica como el más perjudicial, particularmente para la subrasante (Pérez García et al., 2012). A pesar de la implementación de medidas preventivas, la infiltración del agua hacia las capas inferiores de la estructura del pavimento es un fenómeno recurrente. Se estima que aproximadamente el 80 % de los problemas en pavimentos se deben a la presencia de agua (Birgisson & Ruth, 2003). En este sentido, la presente investigación busca comprender el comportamiento de dicho parámetro en distintas condiciones climáticas propias de la zona, particularmente durante períodos de lluvias intensas o sequías prolongadas.

Actualmente, la variabilidad temporal de las propiedades de los materiales como el módulo de resiliencia, la humedad y la temperatura; puede ser simulada mediante el uso del Modelo Climático Integrado Mejorado (Enhanced Integrated Climatic Model, EICM) (Zapata et al., 2009). No obstante, en regiones específicas como la nuestra, aún no se dispone de estudios locales que analicen de manera directa el comportamiento del módulo de resiliencia ante variaciones ambientales, lo cual motivó el desarrollo del presente estudio, orientado a evaluar su aplicabilidad en la subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 –

10+500 km. Por tanto, esta investigación se enfoca en analizar la interacción dinámica entre el clima y el comportamiento mecánico de la subrasante, con el objetivo de aportar fundamentos técnicos que permitan optimizar el diseño de pavimentos flexibles, incrementando su resiliencia estructural ante condiciones ambientales adversas.

Para el desarrollo de la investigación se organizó en ocho capítulos.

CAPÍTULO 1: Se expone el planteamiento del problema de investigación, así como su formulación, justificación, delimitación y los objetivos que orientan el estudio.

CAPÍTULO 2: Se presentan los antecedentes relevantes, el marco teórico que sustenta el estudio, el marco legal aplicable y las definiciones conceptuales necesarias para la comprensión del tema.

CAPÍTULO 3: Se establece la hipótesis de la investigación, junto con la identificación de las variables involucradas, sus respectivas dimensiones e indicadores.

CAPÍTULO 4: Se describe la metodología utilizada, incluyendo el tipo, nivel, diseño y alcance de la investigación. Asimismo, se define el ámbito de estudio, la población, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, y el procedimiento aplicado para su procesamiento y análisis.

CAPÍTULO 5: Se detalla la estructura funcional del sistema de medición directa del módulo de resiliencia (RM), describiendo la unidad de control, el emisor y el receptor del equipo empleado.

CAPÍTULO 6: Se presentan los resultados obtenidos durante el trabajo de campo y laboratorio, organizados por tramo analizado, considerando las características específicas de cada uno.

CAPÍTULO 7: Se realiza el análisis e interpretación de los resultados experimentales, con base en los datos obtenidos y su relación con los objetivos e hipótesis del estudio.

CAPÍTULO 8: Se exponen las conclusiones generales del trabajo y se formulan recomendaciones técnicas fundamentadas en los hallazgos descritos en los capítulos anteriores.

CAPITULO 1 :ASPECTOS GENERALES

1.1 Planteamiento del Problema

1.1.1 Situación problemática

Mena W. B. (2013) menciona que gran parte de la deflexión superficial del pavimento está directamente relacionada con las variaciones en el módulo de resiliencia de la subrasante, razón principal por la cual los pavimentos flexibles tienen a disminuir su vida útil. De ahí parte la importancia de conocer un valor correcto del módulo de resiliencia para el diseño de pavimentos flexibles.

Cabe señalar que el módulo de resiliencia no permanece constante una vez construida la estructura del pavimento, sino que varía significativamente con las condiciones climáticas del entorno. Este valor puede fluctuar hasta en 2.5 veces respecto a su condición óptima (Cary y Zapata, 2010 citados por Meza Soto, 2020).

Por tanto, resulta imprescindible analizar la variación del módulo de resiliencia de la subrasante bajo distintos factores climáticos, especialmente en función de las estaciones del año, con el fin de mejorar la precisión de los diseños estructurales y garantizar el desempeño adecuado del pavimento durante su vida útil.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

PG: ¿En qué medida varía el módulo de resiliencia de la subrasante en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, bajo la influencia de factores climáticos, y cómo afecta su aplicabilidad en el diseño estructural del pavimento flexible?

1.2.2 Problemas específicos

PE1: ¿Cuál es el valor óptimo del módulo de resiliencia en los suelos de subrasante presentes en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, para su aplicabilidad en el diseño estructural del pavimento flexible?

PE2: ¿Cómo se comporta el módulo de resiliencia de la subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, ante condiciones ambientales variables simuladas mediante el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM)?

PE3: ¿Cuánto es el Módulo de resiliencia de la subrasante cuando exista la variación del contenido de agua producidos por los factores climáticos en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km?

PE4: ¿Cuál es la relación entre los valores del módulo resiliente obtenidos mediante ensayos de carga cíclica y aquellos estimados a partir del ensayo de capacidad de soporte California (CBR) en la subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km?

1.3 Justificación

1.3.1 Teórica

El módulo de resiliencia, es una característica fundamental en el diseño de pavimentos, en la guía de diseño AASHTO 1993, es un parámetro importante a fin de caracterizar la respuesta elástica de la subrasante.

Cada vez se utilizan más los diseños que consideran la influencia de los factores climáticos sobre este parámetro mediante modelos predictivos (como por ejemplo los métodos mecanicista-empíricos). Sin embargo, estas predicciones requieren ser validadas con datos experimentales reales que reflejen las condiciones locales del suelo y del clima (Meza Soto, 2020).

En el contexto nacional, particularmente en nuestra región con alta variabilidad climática, se carece de investigaciones que evalúen directamente, a través de ensayos de laboratorio, la variación del módulo de resiliencia bajo condiciones de temperatura y humedad representativas del entorno natural. Esta ausencia de estudios limita la adaptación confiable de modelos internacionales y el desarrollo de propuestas metodológicas propias. Desde el punto de vista teórico, esta investigación contribuirá al conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los suelos en condiciones variables.

1.3.2 Práctica

En nuestro medio se utiliza únicamente características del suelo de manera constante para el periodo de diseño de pavimento, sin tener en cuenta los cambios estacionales. Conocer cómo varía el módulo de resiliencia bajo la influencia de factores climáticos permitirá mejorar la caracterización de la subrasante en los proyectos de pavimentación, a fin de fomentar el uso de ensayos de laboratorio en lugar de correlaciones analíticas con el CBR.

Es justamente lo que busca esta investigación tomar en cuenta los efectos del clima para el cálculo del módulo de resiliencia en la subrasante de la carretera de San Jerónimo a Paruro iniciando en la intersección de la vía evitamiento y la zona de Chimpahuaylla (KM: 0+000) y termina en la comunidad campesina de Ushpabamba (KM: 10+500) a fin de ver las condiciones en las cuales este se encuentra a lo largo de las estaciones anuales para entender el comportamiento del pavimento durante su vida de diseño.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

OG: Evaluar la variación del módulo de resiliencia de la subrasante en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, bajo la influencia de factores climáticos, para su aplicabilidad en el diseño estructural del pavimento flexible.

1.4.2 Objetivos específicos

OE1: Determinar el valor óptimo del módulo de resiliencia en los suelos de subrasante presentes en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, en su aplicabilidad en el diseño estructural del pavimento flexible.

OE2: Analizar el comportamiento del módulo de resiliencia de la subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, frente a condiciones climáticas variables simuladas mediante el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM).

OE3: Evaluar el módulo de resiliencia con variación de contenido de agua debido a factores climáticos en la subrasante de la carretera San Jerónimo a Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km.

OE4: Comparar los valores del módulo resiliente obtenidos mediante ensayos de carga cíclica con los estimados a partir del ensayo de capacidad de soporte California (CBR), en los suelos de subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km.

CAPITULO 2 :MARCO TEORICO CONCEPTUAL

2.1 Antecedentes de la Investigación

2.1.1 Antecedentes a nivel Internacional

Meza (2020) en su investigación titulada “ESTIMACIÓN DEL CAMBIO DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE POR EFECTOS DEL CLIMA EN ARCILLAS BLANDAS DEL NORTE DE BOGOTÁ”, desarrolló un estudio orientado a determinar cómo las condiciones climáticas influyen en la variación del módulo resiliente (Mr) en suelos de subrasante. La investigación combinó ensayos de laboratorio (como módulo resiliente y CBR) con modelos predictivos climáticos basados en el índice de humedad de Thornthwaite y curvas SWCC, integrando estos en la metodología propuesta por Witczak et al. y el modelo EICM. Entre sus principales resultados, se identificó que el módulo resiliente puede variar hasta 2,5 veces respecto al valor óptimo (M_{ropt}) debido a fluctuaciones climáticas anuales, especialmente por cambios en el contenido de humedad del suelo; estos varían desde módulos de resiliencia desde 9.3 MPa hasta 26.1 MPa. Se comprobó que los modelos climáticos pueden estimar adecuadamente la succión y grado de saturación mensual, permitiendo proyectar el comportamiento multitemporal del módulo resiliente.

Los resultados evidencian una correlación confiable entre los módulos resilientes obtenidos experimentalmente y aquellos estimados mediante modelos climáticos, lo que valida su aplicabilidad en el diseño estructural de pavimentos. Asimismo, se concluye que el módulo resiliente varía significativamente con las condiciones climáticas mensuales, por lo que no debe tratarse como un valor constante. Este enfoque permite mejorar la precisión del diseño de pavimentos flexibles, al incorporar la respuesta real y cambiante del suelo frente a factores ambientales.

Elsharief, Dafalla y Awad (2024) en su artículo titulado: “EFFECTS OF MOISTURE CONTENT ON THE RESILIENT MODULUS OF COMPACTED SUBGRADE SOILS IN AN ARID REGION”, realizaron un estudio enfocado en evaluar cómo la variación del contenido de humedad influye en el módulo de resiliencia (MR) de tres tipos de suelos subrasantes compactados representativos de la región árida de Khartoum, Sudán. Los ensayos incluyeron pruebas de CBR y módulo resiliente en condiciones secas, óptimas y húmedas (OMC \pm 2 % y \pm 4 %), conforme a los estándares AASHTO T 307 y BS 1377. Los resultados mostraron que el módulo de resiliencia disminuye significativamente al aumentar el contenido

de humedad, siendo este efecto más notable en suelos finos con alto contenido de arcilla plástica (Soil M y Soil H), en comparación con suelos más granulares y estables (Soil A). Se observó que, al compactar los suelos con 4 % por encima del contenido óptimo de humedad (OMC+4), el MR puede reducirse más de un 20 %, mientras que una compactación seca (OMC-4) produce los valores de MR más altos. En el caso de los suelos finos, se propuso reducir en un 10 % el valor de diseño del módulo resiliente para compensar la pérdida de rigidez inducida por la humedad.

El comportamiento del módulo de resiliencia (MR) está fuertemente influenciado por el tipo de suelo y su contenido de humedad, siendo especialmente sensibles aquellos con altos índices de plasticidad y presencia de minerales expansivos como la montmorillonita. Esta mineralogía incrementa la susceptibilidad del suelo a la saturación, afectando negativamente su rigidez. En el caso de suelos expansivos, se recomienda realizar la compactación con un contenido de humedad no mayor a OMC+2 %, con el fin de mantener un equilibrio entre la resistencia estructural y el control del hinchamiento. Por otro lado, para suelos granulares estables, el valor de MR obtenido a humedad óptima puede considerarse confiable y representativo para fines de diseño estructural.

Pérez García et al. (2016), en el Instituto Mexicano del Transporte publicó “MODELO PARA ESTIMAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA DE SUELOS FINOS COMPACTADOS EN LA CONDICIÓN ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN”, se desarrolló un modelo que adapta los suelos finos compactados a una condición óptima para estimar el módulo de resiliencia. El estudio respondió a la necesidad de contar con herramientas alternativas a los ensayos de carga repetida en laboratorio, los cuales requieren equipos costosos y personal especializado. Para ello, se analizó una base de datos construida a partir de resultados experimentales y bibliográficos, ajustando los datos de módulo de resiliencia a un modelo potencial con parámetros de calibración (k_1 y k_2), que luego fueron correlacionados con propiedades índice como el límite líquido, el índice de plasticidad, el contenido de agua óptimo y el grado de saturación. El estudio empleó el protocolo de ensayo NCHRP 1-28A mediante carga triaxial repetida y se enfocó en materiales representativos de distintas regiones de México. Los resultados experimentales mostraron que el módulo de resiliencia fluctuó entre 20 MPa y 90 MPa

El modelo propuesto mostró una adecuada capacidad predictiva para estimar el módulo de resiliencia bajo condiciones controladas, lo cual representa una herramienta práctica para el diseño de pavimentos en contextos donde no se cuenta con equipamiento especializado. Esta

investigación es relevante para el presente estudio, ya que proporciona una base metodológica útil para la validación de modelos predictivos del módulo resiliente, aunque también evidencia las limitaciones de las correlaciones empíricas, reforzando la importancia de realizar ensayos directos bajo condiciones climáticas variables. Los autores concluyeron que este tipo de modelos son útiles en contextos donde no se dispone de equipos para ensayos cíclicos, pero subrayaron la necesidad de ajustar las correlaciones empíricas a las condiciones locales para asegurar su confiabilidad en el diseño estructural de pavimentos.

2.1.2 Antecedentes a nivel Nacional

Herrera Montealegre (2014) en su investigación titulada “DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE DISEÑO DE PAVIMENTOS MEDIANTE CRITERIOS ASSHTO 1993 Y 2002”, se llevó a cabo un estudio comparativo entre los métodos AASHTO 1993 y AASHTO 2002 con el objetivo de determinar el Módulo Resiliente del afirmado, usando ensayos de laboratorio y fórmulas empíricas definidas en ambas metodologías. La investigación se centró en suelos utilizados como afirmado en la carretera Puno - Mazocruz.

Los resultados mostraron que el módulo resiliente en estado saturado varió entre 9,560 psi y 14,214 psi, dependiendo del tipo de suelo y del nivel de saturación, con valores más bajos registrados en los estratos con mayor contenido de humedad. Finalmente, se aplicó el criterio del módulo resiliente estacional, obteniendo un valor de diseño ponderado de 13,397.66 psi, el cual considera las condiciones de humedad a lo largo de los 12 meses del año.

Las conclusiones del estudio destacan que el método AASHTO 2002 ofrece una mayor confiabilidad para el diseño estructural de pavimentos, debido a su base mecanicista-empírica, en comparación con el enfoque puramente empírico del AASHTO 1993. Además, la autora concluyó que el uso de módulos estacionales permite un diseño más realista y eficiente del pavimento, mejorando su desempeño ante condiciones ambientales variables. Asimismo, recomendó el uso de este procedimiento como criterio técnico en futuros estudios de diseño vial en regiones con marcada estacionalidad climática.

En el **XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil (2003)**, se presentó un estudio titulado “*DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA DE SUELOS DE LA REGIÓN IQUITOS*”, cuyo objetivo principal fue evaluar el comportamiento resiliente de suelos locales mediante ensayos triaxiales cíclicos.

Durante la investigación, se analizaron muestras de suelo recolectadas en diversas zonas de la región Iquitos, representativas de materiales utilizados en subrasantes. El módulo

de resiliencia se determinó mediante la aplicación de cargas repetidas en condiciones controladas, obteniéndose valores que variaron entre 15 MPa y 70 MPa, dependiendo del tipo de suelo y su contenido de humedad. Los suelos arcillosos mostraron los valores más bajos, mientras que los suelos granulares presentaron mayores módulos resilientes.

El estudio evidenció que el módulo de resiliencia presenta una notable variabilidad según el tipo de suelo y el grado de compactación. Además, se determinó que el contenido de humedad tiene un efecto determinante en el valor del módulo resiliente, disminuyendo significativamente cuando el suelo supera su nivel óptimo de humedad. Estos hallazgos permiten ajustar con mayor precisión los parámetros utilizados en los métodos de diseño mecanicistas, contribuyendo así a una mejor representación del comportamiento real del pavimento y a una mayor eficiencia estructural en su desempeño a largo plazo.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Generalidades del desempeño de pavimentos

El pavimento se compone de una serie de capas de materiales seleccionados que reciben directamente las cargas vehiculares y las distribuyen hacia las capas inferiores de manera uniforme. Estas capas no solo cumplen una función estructural, sino que también conforman la superficie de rodamiento, la cual debe permitir una circulación cómoda y eficiente (Meza Soto, 2020).

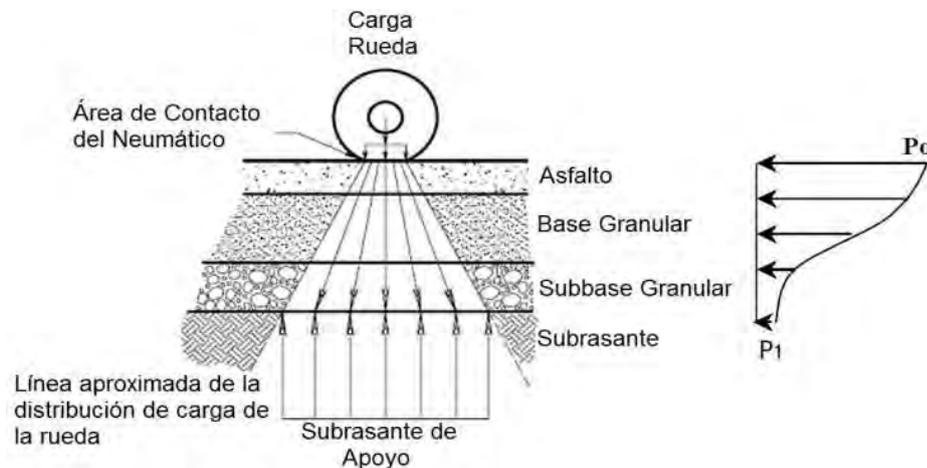
Según los principios de análisis de esfuerzos y las observaciones de campo, los materiales utilizados en cada capa deben poseer la resistencia adecuada al nivel de carga que recibirán. Por este motivo, las capas más profundas pueden construirse con materiales de menor calidad, siempre que sean capaces de soportar los esfuerzos transmitidos desde las capas superiores (Maximiliano Velásquez, 2016).

En las terracerías, los materiales deben cumplir requisitos mínimos de calidad, lo que permite aprovechar fuentes locales y optimizar costos. La calidad y espesor de las capas del pavimento dependen directamente de las propiedades mecánicas de la subrasante, por lo que tanto el tránsito proyectado como las condiciones del suelo influyen directamente en el diseño estructural del pavimento.

Además, la superficie de rodamiento debe adaptarse a los requerimientos del tipo de vía. En autopistas, por ejemplo, se espera alcanzar velocidades superiores a 80 km/h, lo que exige condiciones geométricas óptimas. En contraste, en caminos secundarios, la velocidad

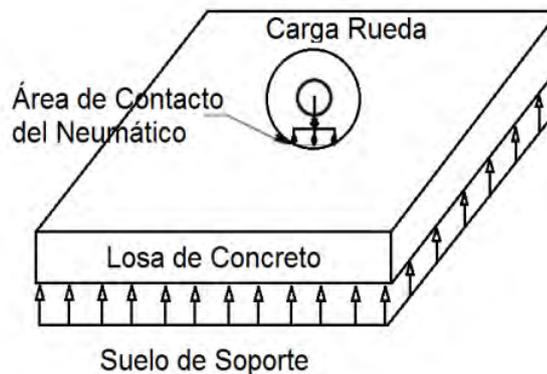
puede reducirse considerablemente debido a limitaciones en el diseño horizontal y vertical, sin que esto implique un diseño inadecuado, ya que se ajusta al tipo de vía y a las expectativas del usuario (Mena Abadía, 2013).

Figura 1 Estructura y distribución típica de esfuerzos del pavimento flexible



Nota. Distribución de la carga en un pavimento flexible. Fuente: Mena W. B., 2013

Figura 2 Estructura y distribución típica de esfuerzos del pavimento rígido



Nota. Distribución de la carga en un pavimento flexible. Fuente: Mena W. B., 2013

Pavimentos Flexibles

La carpeta asfáltica actúa como superficie de rodadura y distribuye las cargas vehiculares hacia las capas inferiores mediante la interacción por fricción y cohesión de los materiales granulares. Esta capa presenta una flexibilidad suficiente para adaptarse a las pequeñas deformaciones de la estructura subyacente sin fracturarse. Un pavimento flexible está conformado por tres capas estructurales principales: carpeta asfáltica, base y subbase, las cuales están sobre la subrasante.

Figura 3 Partes que conforman el pavimento flexible



Nota. Estructuración de Vías Terrestres. Fuente: Mancera, (2017)

Funciones de las capas de un pavimento flexible:

Subbase granular

La subbase granular cumple funciones estructurales y de transición dentro del sistema de pavimento. Su diseño evita la migración de materiales entre la base y la subrasante, actuando como barrera filtrante que previene la contaminación por finos. Además, mitiga deformaciones inducidas por variaciones volumétricas de la subrasante —asociadas principalmente a cambios de humedad o temperatura— impidiendo su propagación hacia la superficie. Estructuralmente, debe ser capaz de soportar y distribuir las cargas transmitidas desde las capas superiores, y en condiciones particulares, facilitar el drenaje interno, evitando tanto el ascenso capilar como la infiltración de agua proveniente de la superficie o los laterales.

Base granular

La base granular tiene como función principal proporcionar resistencia estructural intermedia, permitiendo una distribución eficiente de los esfuerzos generados por el tránsito vehicular hacia las capas inferiores. Su capacidad mecánica es fundamental para mantener la integridad del sistema y reducir tensiones en la subbase y subrasante.

Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica constituye la superficie de rodadura y debe ofrecer condiciones de textura, estabilidad y uniformidad adecuadas para la circulación vehicular. Su impermeabilidad contribuye a proteger las capas inferiores frente a la infiltración de agua, y su resistencia a

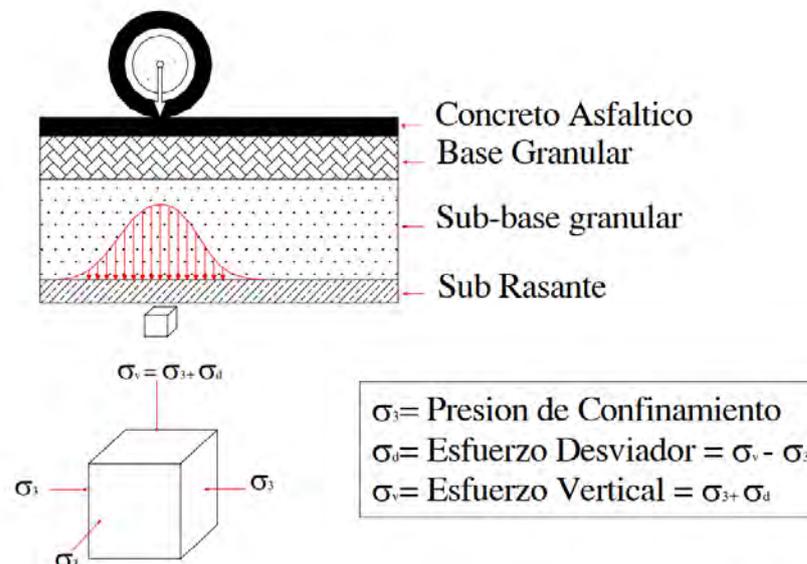
tracción complementa el desempeño estructural general del pavimento, actuando además como barrera contra el desgaste superficial provocado por el tránsito.

2.2.2 Módulo de resiliencia: Respuesta mecánica del suelo

Durante el paso de un vehículo sobre la estructura de pavimento, las cargas transmitidas a través de los neumáticos son absorbidas progresivamente por las diferentes capas, generando un estado de esfuerzos en los elementos del suelo ubicados en la subrasante. Estos esfuerzos inducen deformaciones elásticas en el material como se representa en la Figura 4. Suponiendo un comportamiento lineal, elástico, isótropo y homogéneo del suelo (según las hipótesis clásicas de la mecánica de suelos), las relaciones entre esfuerzos y deformaciones quedan definidas por el módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (ν) del material.

No obstante, la respuesta real del sistema estructural depende de las propiedades intrínsecas de los materiales que lo componen, de la naturaleza dinámica y transitoria de las cargas inducidas por el tránsito vehicular. Estas cargas se aplican en tiempos muy breves, generando una deformación total que, al ser removida la carga, es recuperada parcialmente, en correspondencia con el comportamiento resiliente del suelo.

Figura 4 Estado de esfuerzos en la subrasante provocado por el paso de vehículos

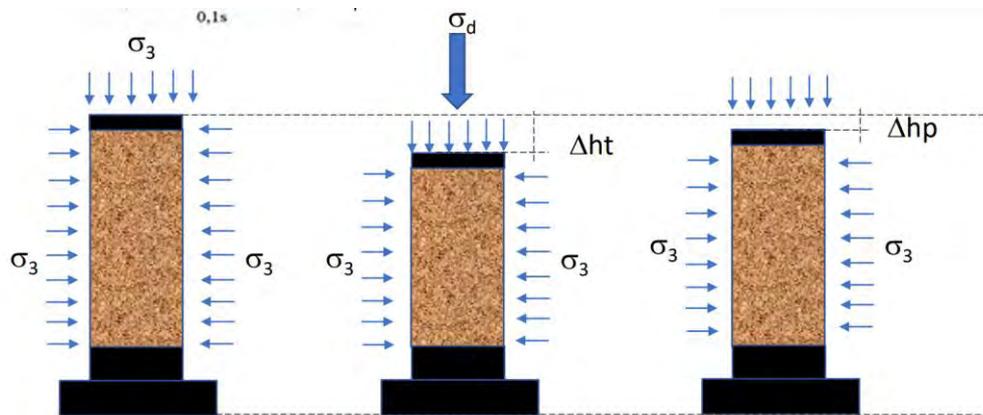


Nota. Fuente: (XIV Congreso Nacional de Ingeniería CIVIL - Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Iquitos, 2003)

Cuando se trabajan bajo deformaciones en una idealización supuesta de un comportamiento elástico, la resiliencia en los suelos se entiende como la capacidad que tienen éstos para recuperarse después de una sollicitación de carga. El esquema de esfuerzos al que

son sometidas las muestras de ensayo, se puede representar según lo que se muestra en la siguiente figura.

Figura 5 Esquema de esfuerzos al que son sometidas muestras de ensayo



Nota. Fuente: J. Vidal y R. Osorio, 2002

Este comportamiento puede interpretarse del siguiente modo: al aplicarse una carga creciente, la deformación del material también aumenta; al reducirse la carga, parte de esa deformación se recupera, mientras que otra porción permanece como deformación plástica. En consecuencia, la deformación total se compone de una componente permanente y una componente elástica o resiliente, siendo esta última la que se considera para el cálculo del módulo resiliente. La Figura 6 ilustra el ciclo típico de carga-descarga y los parámetros involucrados en su evaluación.

Figura 6 Secuencia de carga y descarga y los parámetros asociados



Nota. Fuente: (Asociación Paraguaya de Carreteras, 2021)

El módulo resiliente representa la capacidad de un material para absorber y almacenar energía bajo cargas repetitivas sin experimentar deformaciones permanentes, es decir, dentro

del rango elástico del comportamiento del material (Popov, 1990). Su determinación se realiza a través de un ensayo de respuesta dinámica, en el cual se aplica una carga cíclica y se mide la deformación elástica recuperable. Este parámetro se calcula como la razón entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación resiliente inducida durante el ciclo de carga (Huang, 2004).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

Donde:

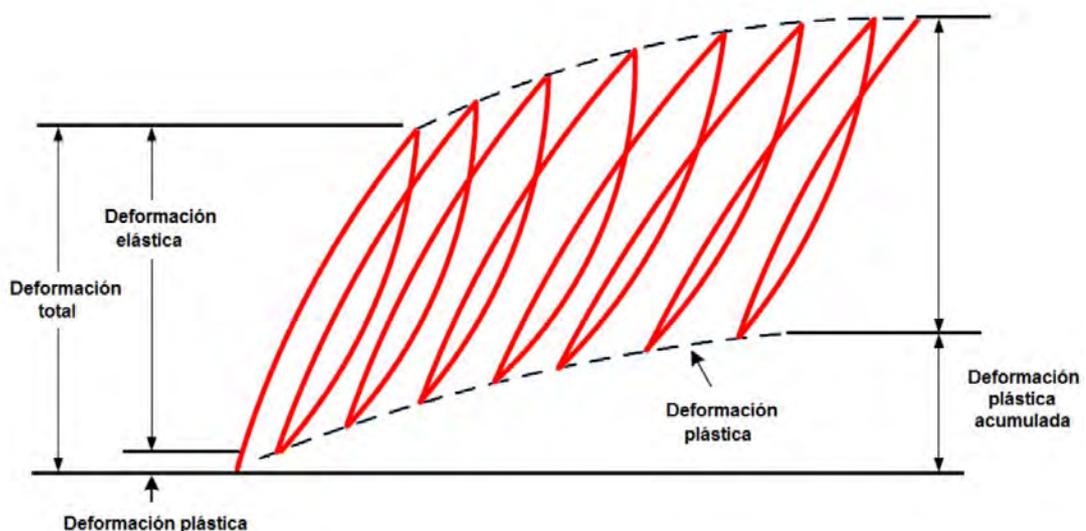
M_r : Módulo resiliente

σ_d : esfuerzo desviador

ε_r : deformación unitaria recuperable (resiliente)

Cuando un material es sometido a un ensayo de carga repetida, la aplicación inicial del esfuerzo genera tanto una deformación permanente (plástica) como una deformación recuperable (elástica). A medida que se incrementa el número de ciclos de carga, la magnitud de la deformación plástica tiende a estabilizarse o disminuir, de modo que el comportamiento del material pasa a estar dominado por una respuesta elásticamente recuperable, característica fundamental del comportamiento resiliente. (Huang, 2004).

Figura 7 Deformaciones bajo un ensayo de carga repetida



Nota. Fuente: Y. H. Huang, 2004

El módulo resiliente de los materiales cohesivos y granulares se obtiene a través del ensayo triaxial de carga repetida, el cual reproduce las condiciones de esfuerzo generadas por el tránsito vehicular sobre la estructura del pavimento. Este ensayo consiste en aplicar un pulso

de carga de tipo haversiano con magnitud constante, caracterizado por una duración de 100 milisegundos y un período de reposo de 900 milisegundos, sobre especímenes cilíndricos cuyas dimensiones suelen mantener una relación altura-diámetro de 2:1.

Durante el ensayo, el espécimen es sometido a un esfuerzo desviador cíclico de forma dinámica, mientras se mantiene un esfuerzo de confinamiento constante mediante una cámara triaxial presurizada. La deformación axial recuperable generada a lo largo de los ciclos de carga es registrada y utilizada para el cálculo del módulo resiliente, que representa la rigidez del material bajo condiciones de carga repetitiva.

2.2.3 Factores que afectan al módulo de resiliencia

Condiciones físicas del suelo

Desde la década de 1970 ya se evidenciaba cómo el módulo resiliente disminuía sus valores cuando se incrementaba el contenido de agua. El aumento del contenido de humedad genera mayores deformaciones, al mismo tiempo que el material va perdiendo rigidez. Coronado et al. (2005) reportaron un incremento en el módulo resiliente al reducirse el contenido de agua, debido al aumento de las fuerzas capilares. Este incremento de humedad provoca que las partículas reduzcan su contacto, lo que conlleva una disminución en las fuerzas de interacción entre ellas.

Por otra parte, la literatura señala que un material presenta mayor rigidez cuando posee una mayor densidad. Sin embargo, a diferencia de otros factores influyentes, este parámetro muestra un efecto relativamente reducido. A niveles de esfuerzo más elevados, la influencia de la densidad del material tiende a ser menor (Khogali y Zeghal, 2000).

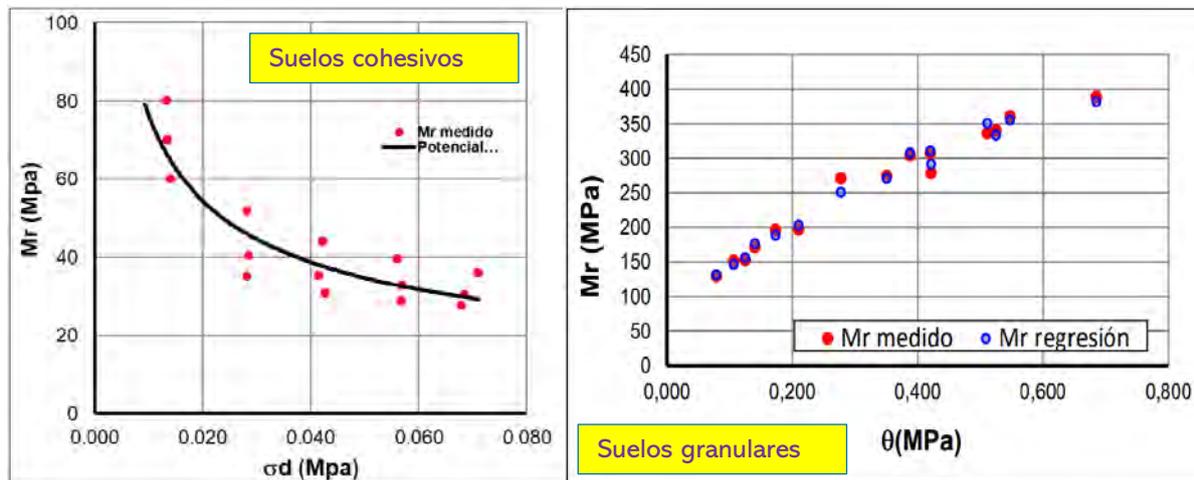
Condiciones de esfuerzo

El módulo de resiliencia es un parámetro que, generalmente, tiende a disminuir con el incremento del esfuerzo desviador, mientras que aumenta con el incremento de la presión de confinamiento. No obstante, esta influencia varía según el tipo de suelo evaluado en el estudio. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007)

En el caso de los suelos cohesivos, se ha observado que sus valores de módulo de resiliencia están considerablemente influenciados por el esfuerzo desviador. Sin embargo, con base en los resultados de ensayos realizados en laboratorio, se ha determinado que estos suelos no presentan una sensibilidad significativa ante cambios en la presión de confinamiento.

Por otro lado, en suelos granulares, el módulo de resiliencia muestra una clara dependencia con respecto a la presión de confinamiento (Seyhan et al., 2005). Este comportamiento ha sido evidenciado en ensayos triaxiales cíclicos, como en el estudio de Brown (1974), quien concluyó que, en suelos granulares, el esfuerzo desviador no genera un impacto relevante sobre el módulo mientras no se esté cerca del estado de falla.

Figura 8 Comportamiento del Módulo de resiliencia en suelos cohesivos y granulares



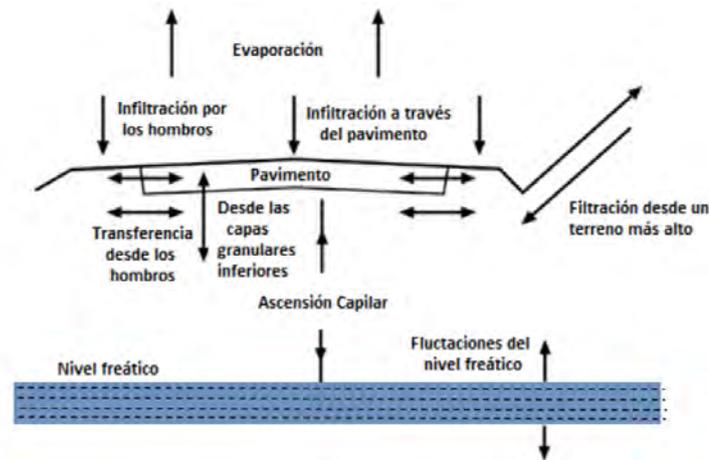
Nota. En la figura podemos observar el comportamiento no lineal de los suelos respecto a esfuerzo desviadores y la suma de esfuerzos principales. Fuente:(Asociación Paraguaya de Carreteras, 2021)

2.2.4 Influencia de los factores ambientales en la subrasante

Los pavimentos están diseñados para resistir las condiciones climáticas, usualmente el exceso de lluvias, el cambio brusco de temperaturas junto con el poco mantenimiento hace que la vida útil se vea reducido, es necesario la introducción de modelos climáticos para predecir estas variaciones (Meza, 2020).

Uno de los principales fenómenos naturales que afectan al pavimento es la precipitación, el agua derivada de ella se infiltra desde las capas superiores hasta las capas inferiores, conllevando a la degradación de la estructura.

Figura 9 *Movimiento de la humedad en la carretera*



Nota. Fuente: Austroads Ltd, 2012

Fluctuaciones del agua en el pavimento

El exceso del contenido de agua en las múltiples capas del pavimento, usualmente son perjudiciales en la vida útil del pavimento, de los problemas encontrados en los pavimentos, el 80% vienen a estar relacionados con la presencia del agua (Birgisson y Ruth, 2003 citados por Pérez et al. (2016)).

Variaciones del contenido de agua en la subrasante

En el estudio de Kersten (1944) (citado por Dempsey y Elzeftway, 1976) se realizó mediciones directas acerca de las variaciones del contenido de humedad, los datos extraídos son:

- En promedio las subrasantes presentan un grado de saturación del 73%, en el rango total se observa valores del 60% o 81%.
- Los suelos con alto grado de saturación fueron arcillas o arcillas limosas.
- En una de cada tres mediciones registradas, se superaron los niveles óptimos de contenido de agua.

2.2.5 Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM): Condiciones climáticas en la subrasante

Denominado The Enhanced Integrated Climatic Model (EICM) es un modelo unidimensional que relaciona el calor y la humedad acoplado al pavimento en el cual se simula los cambios de temperatura y humedad en la subrasante, así como en los diferentes componentes del pavimento. El modelo busca incluir las condiciones climáticas al pavimento en los años de operación (Zapata et al., 2009a).

Zapata et al. (2009) hacen un recuento del origen de estos principios, en los cuales desde 1970 se tenían conceptos bases para el modelo EICM, en sus orígenes no era tan relevantes los parámetros de contenido de humedad, desde 1999 se desarrollaron modelos superiores que abarcaban conceptos como el índice de humedad de Thornthwaite (TMI), a partir de este índice se puede conocer la curva característica de succión matricial (SWCC) ya que las guía de diseño de pavimentos mecanicista-empírico de la AASHTO indican la relación entre la succión del suelo y el contenido de humedad la cual es representado por la curva característica del agua del suelo (SWCC).

Índice de thornthwaite (TMI)

El Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI), propuesto por C.W. Thornthwaite en 1948, es un parámetro adimensional que oscila entre +100 y -100, representando condiciones climáticas desde muy húmedas hasta extremadamente áridas. Su cálculo se basa en la combinación de dos índices: el de aridez (Ia) y el de humedad (Ih), los cuales se determinan a partir del déficit hídrico (D) y el excedente o esorrentía (R) obtenidos mediante el balance hídrico. Aunque fue concebido inicialmente para clasificar zonas climáticas, su aplicación se ha extendido a campos como la agricultura, la hidrología y el diseño de infraestructuras como pavimentos y zapatas (AS2870, 2011; Austroads, 2004; Keim, 2010; Philp y Taylor, 2012).

Tabla 1 *Clasificación climática de Thornthwaite*

TMI	Símbolo	Tipo climático
>100	A	Excesivamente húmedo
80 a 100	B4	Muy húmedo
60 a 80	B3	Húmedo
40 a 60	B2	Moderadamente húmedo
20 a 40	B1	Ligeramente húmedo
0 a 20	C2	sub húmedo – húmedo
-20 a 0	C1	sub húmedo – seco
-40 a -20	D	Semiárido
<-40	E	Árido

Nota. Fuente: Thornwaite (1948)

Succión Matricial

La succión del suelo se describe como el estado de energía libre del agua presente en el suelo (Edlefsen y Anderson, 1943). Corresponde a la diferencia de presión entre el aire contenido en los poros y el agua que los ocupa, originada por efectos capilares y por la adsorción en suelos no saturados. La succión se calcula mediante la siguiente ecuación

$$\psi = u_a - u_w \quad (2)$$

Donde:

ψ : Succión matricial

u_a : Presión entre el aire y los poros del suelo

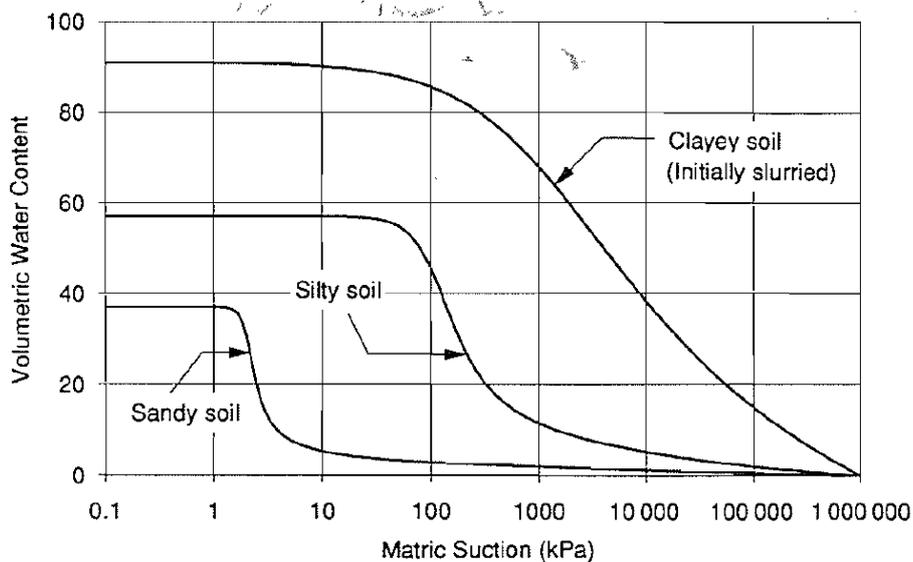
u_w : Presión intersticial del agua.

Curva característica de Succión en el suelo (SWCC)

Teóricamente la succión matricial es interpretada como la fuerza que retiene el agua dentro del suelo, debido a su interacción entre ellas, usualmente se representa con el concepto con la curva característica suelo-agua la cual relaciona el contenido de agua (gravimétrico, volumétrico o el grado de saturación) presente en los suelos y la succión del suelo (Meza Soto, 2020). La curva SWCC tuvo varios estudios donde se formularon ecuaciones que representan la curva, gran parte de estas ecuaciones fueron propuestas por Fredlund and Xing (1994).

Fredlund y Xing (1994), realizaron la comparación de varias pruebas de succión en un amplio rango de tipos de suelos con la modelación de una función sigmoidea, la cual comparando con los resultados de los estudios de modelos SWCC (curva característica de succión del suelo) se reflejó que era un modelo adecuado.

Figura 10 Curva característica suelo-agua para un suelo arenoso, un suelo limoso y un suelo arcilloso

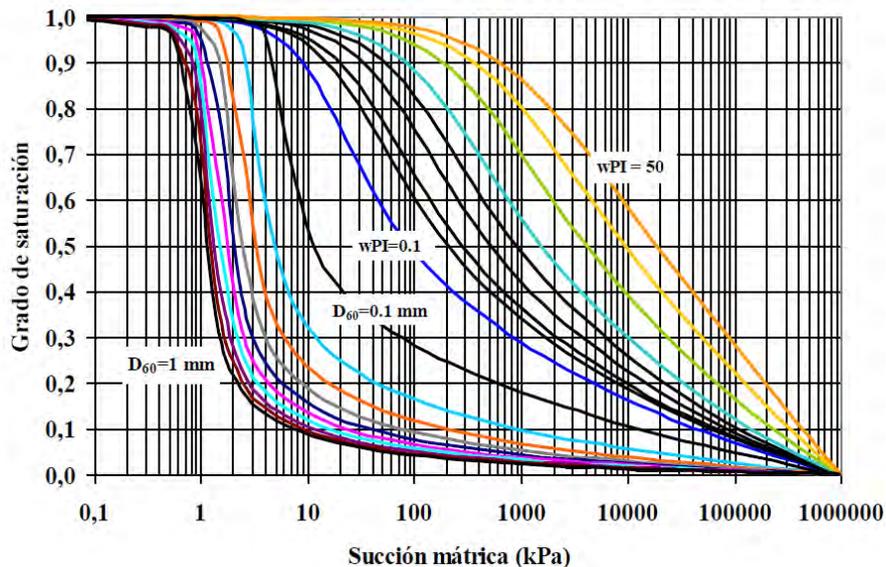


Nota. Se muestran varias curvas características para diferentes tipos de suelo, por las variaciones de la plasticidad y otros factores. Fuente: Fredlund y Xing (1994)

Relación entre la succión la saturación

El contenido de agua en el suelo puede representarse mediante el grado de saturación, el cual se ubica en el eje de las ordenadas, mientras que en el eje de las abscisas se representa la succión total. En el modelo EICM, correlaciona los datos de WPI y D_{60} para calcular los parámetros de la curva SWCC, Zapata et al. (2007) muestra los siguientes resultados.

Figura 11 Predicción de la curva SWCC



Nota. El gráfico es el modelamiento de la curva SWCC en base a los valores de WPI y D_{60}
Fuente: Zapata et al. (2007)

2.2.6 Modelos de predicción del Módulo resiliente por factores climáticos

Las pruebas demuestran que la variación del contenido de humedad influye en la respuesta de los materiales no ligados del pavimento. A pesar de que estos materiales estén compactados con su contenido óptimo, siempre se observan variaciones a lo largo del tiempo.

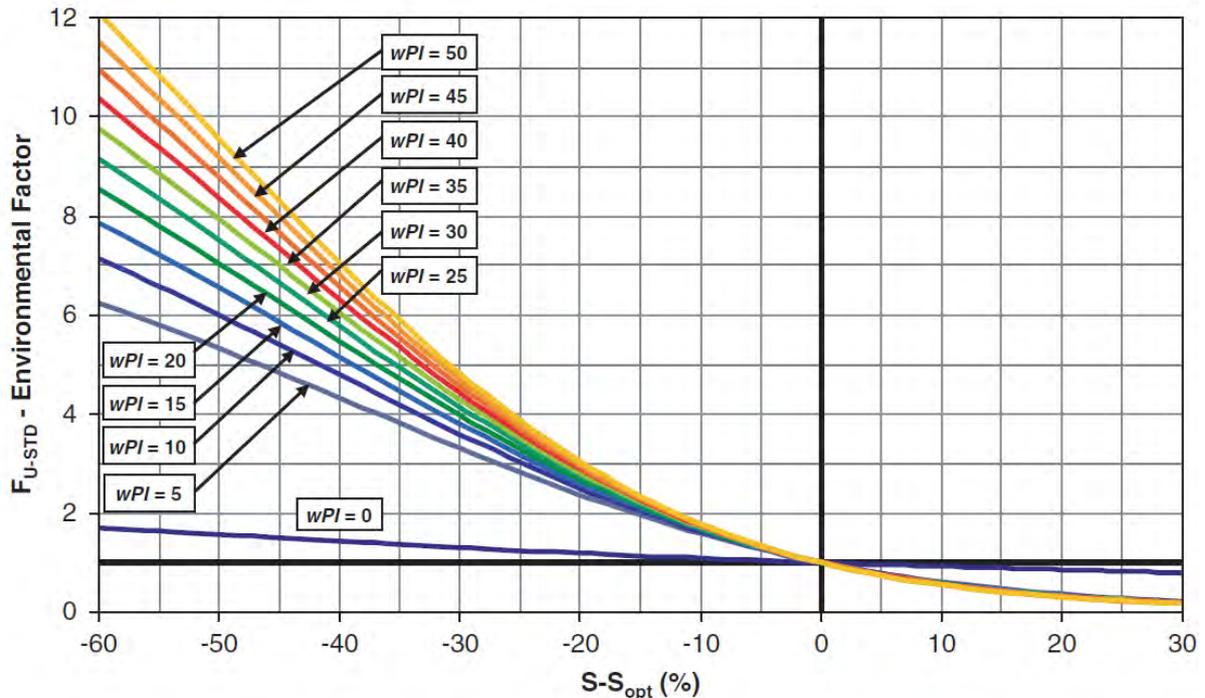
Si bien es cierto que el contenido de agua tiende a alcanzar un punto de equilibrio, este suele cambiar debido a la influencia de factores climáticos propios de las estaciones del año.

Las guías de diseño mecanístico-empírico en pavimentos (MEPDG) consideran estos cambios en el contenido de humedad, como se ha mencionado previamente mediante el uso del EICM (Modelo Climático Integrado Mejorado); por ello, Witczak et al. (2002) desarrollaron un modelo de predicción del módulo resiliente en función de la variación del contenido de humedad, utilizando un factor ambiental (F_{env}).

$$M_R = F_{env} \times M_{Ropt} \quad (3)$$

Este factor ambiental es una función en base a el clima, tipo de suelo y el régimen de la humedad. La siguiente imagen ilustra la variación del F_{env} para todos los tipos de suelo estudiados en la investigación de Cary y Zapata (2010), los cuales corresponden a materiales granulares no plásticos y suelos de subrasantes.

Figura 12 Variación del Factor ambiental en función al cambio de saturación



Nota. El grafico muestra como varia el factor ambiental para distintos tipos de suelo recolectados en Arizona. Fuente: Cary & Zapata (2010)

2.2.7 Determinación del Módulo de resiliencia en laboratorio

El cálculo del módulo de resiliencia por mediciones directas tiene como uno de los primeros protocolos AASTHO T274-82, en esta norma el ensayo tiene una duración de 5 horas. El protocolo fue duramente criticado por las cargas ejercidas, así como el tiempo de duración.

Por todo ello tubo sus modificaciones dando como nuevas nomenclaturas: AASTHO T292-91, AASTHO T294-92 y su última actualización AASTHO T307-99, la cual tiene como su última modificación en el año 2012. Las diferencias entre estas son las cargas aplicadas, así como la señal de onda aplicada.

La prueba se llevará a cabo utilizando una máquina de ensayo electrohidráulica de carga superior y circuito cerrado, equipada con un generador de funciones. Este sistema permite aplicar pulsos de carga con forma de onda Haversine, ajustables en cuanto a duración, intensidad y períodos de reposo.

Figura 13 Equipo Triaxial cíclico

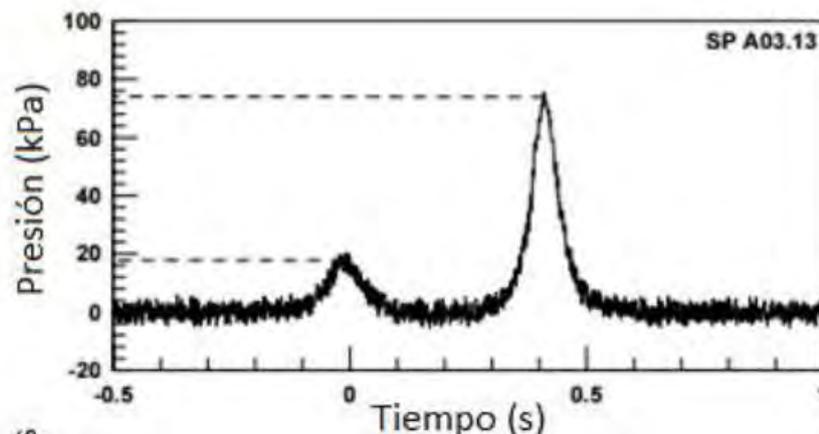


Nota. En la imagen se presenta el equipo *Standard Cyclic Triaxial LoadTrac II* utilizado para los ensayos de laboratorio. Fuente: «Resilient Modulus Test System», s. f.

Estados de esfuerzo utilizados en la prueba de Modulo de resiliencia

En el año 2007, Swett evaluó un pavimento en Maine (Estados Unidos) en un tramo de 60 metros, analizando los esfuerzos y las deformaciones de los materiales que conforman la estructura vial. Para esta prueba se utilizó un vehículo de dos ejes y se realizaron lecturas mediante sensores ubicados en la carpeta de rodadura, la subbase y la subrasante. Se observó que, a nivel de la subrasante, el esfuerzo máximo producido por el vehículo fue cercano a los 80 kPa.

Figura 14 Esfuerzo y deformación en la subrasante debidas al paso de un vehículo



Nota. Se puede constatar los esfuerzos en la subrasante cercanos a 80 kPa. Fuente: Perez Garcia et al., 2016

Otro estudio realizado en Londres evidenció que los valores de esfuerzo medidos en la subrasante pueden variar entre 10 kPa y 70 kPa (Perez Garcia et al., 2016).

2.2.8 Estimación del módulo de resiliencia mediante relaciones empíricas (CBR)

Cuando se refiere a la caracterización de suelos, la metodología de C.B.R. es ampliamente usada para conocer el esfuerzo cortante de un material; es común correlacionar el valor de módulo de resiliente con esta característica. (Parra et al., 2020).

Usualmente, los laboratorios en nuestra región no cuentan con equipos de carga cíclica, los cuales permiten determinar el módulo de resiliencia de manera directa. Por esta razón, durante más de 20 años se han venido utilizando modelos que correlacionan el valor del CBR con el módulo de resiliencia. Sin embargo, la principal desventaja de estos modelos es que las correlaciones fueron desarrolladas para un grupo específico de suelos, lo que ha generado desviaciones significativas al aplicarlos en otros contextos (Kim et al., citados en Pérez García et al., 2016).

Según el Manual de Carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos sección suelos y pavimentos recomienda la siguiente correlación respecto al CBR:

$$M_r(\text{psi}) = 2555 \times (\text{CBR})^{0.64} \quad (4)$$

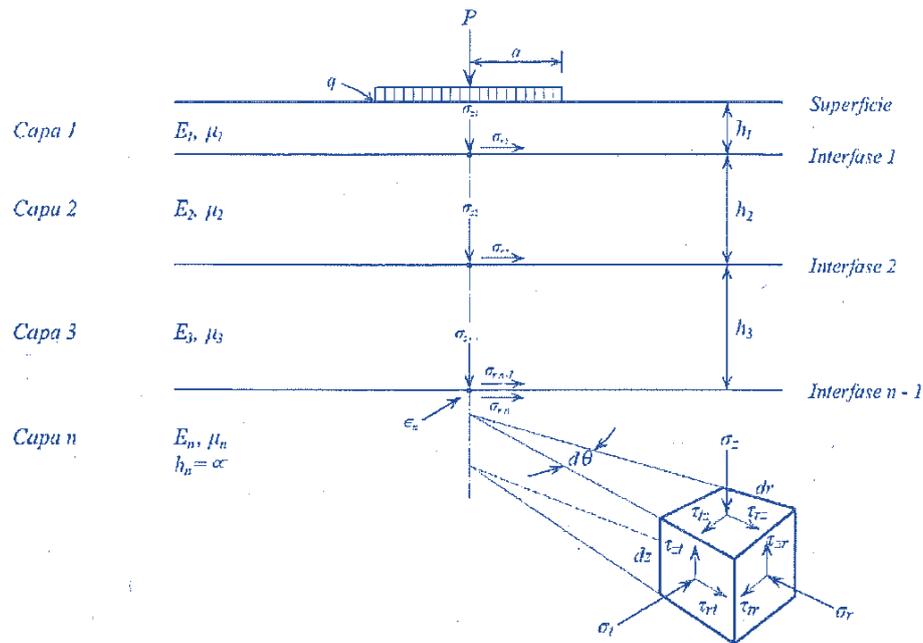
Ya que es un ensayo costoso, al momento de diseñar pavimentos un modelo bastante conocido fue propuesto por Heukelom y Klomp (1962).

$$M_r(\text{psi}) = 1500 \times \text{CBR} \quad (5)$$

2.2.9 Teoría de Multicapa Elástica

Esta teoría fue formalizada por Burmister (1943) y generalizada por Yoder y Witczak (1975), y es fundamental para predecir el comportamiento estructural del pavimento frente al tránsito repetido. Su uso permite estimar las tensiones en la subrasante y las deformaciones elásticas críticas en cada capa, parámetros esenciales para definir los espesores adecuados y garantizar el desempeño a largo plazo de la vía.

Figura 15 Modelo de un sistema elástico multicapa



Nota. Modelo generalizado del sistema multicapa elástica. Fuente: Yoder y Witzack, 1975

Teóricamente, en cada punto existen nueve componentes de esfuerzo. La teoría de multicapa es aplicable a cualquier tipo de material, permitiendo calcular esfuerzos y deformaciones a partir de las siguientes hipótesis:

- Las capas se representan mediante dos propiedades: módulo de elasticidad y relación de Poisson.
- Las capas mantienen las mismas propiedades en todos sus puntos, es decir, son isotrópicas, homogéneas y linealmente elásticas.
- Las capas son infinitas en su extensión horizontal y finitas en dirección vertical, excepto la última capa, que se considera de profundidad infinita.
- Se asume que la carga se aplica uniformemente sobre un área circular.

Cuando el sistema presenta más de tres capas, los cálculos para determinar valores como deflexiones, esfuerzos o deformaciones se vuelven complejos. Por ello, generalmente se recurre al uso de herramientas computacionales para facilitar estos análisis. (Loría Salazar et al., 2017a).

Presión aplicada en la superficie del pavimento

En el diseño estructural de pavimentos, las cargas de mayor magnitud son las más relevantes, ya que generan el mayor deterioro en la estructura; por ello, se emplean como

referencia principal para el dimensionamiento de los espesores de cada capa del sistema estructural. En el transporte carretero, los ejes con llantas neumáticas se clasifican en:

- Neumático simple o neumático doble.
- Ejes sencillos, ejes tándem o ejes tridem.

De acuerdo con la SCT (2014), los pesos máximos permitidos por eje sencillo (carga legal) oscilan entre 6,5 y 11 toneladas, correspondiendo este último valor a ejes motrices con cuatro llantas. En el caso de neumáticos dobles, la carga total se distribuye equitativamente entre ambas ruedas. Para cargas superiores a las establecidas, se recomienda incorporar un eje adicional (Yoder & Witczak, 1975).

Si no se considera el efecto de la deformación del neumático sobre el pavimento, la presión de contacto entre ambos se asume igual a la presión interna de aire del neumático. En presiones bajas, la máxima presión se concentra generalmente en la zona central de la huella. Es común suponer que la presión de contacto es uniforme en toda el área de apoyo del neumático (Coria Gutiérrez et al., 2018).

Aunque diversas agencias de transporte a nivel mundial han evidenciado, mediante estudios, que la huella de los neumáticos presenta geometrías irregulares, por motivos de simplicidad en el análisis se continúa asumiendo una forma circular para el área de contacto en la mayoría de los casos.

Figura 16 *Presión de contacto y presión de inflado de neumáticos*



Nota. En la figura se muestra el equilibrio de las presiones, así como la idealización de la huella circular. Fuente: Coria, Hernández y Garnica (2018).

2.3 Marco Legal

La presente investigación sobre el módulo de resiliencia de la subrasante en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, se desarrolla dentro del marco normativo nacional e internacional vigente, con el fin de garantizar la validez técnica y legal de los resultados obtenidos y su aplicabilidad en el diseño estructural de pavimentos flexibles. A continuación, se detallan las principales normas y documentos legales que respaldan este estudio.

2.3.1 Método de guía AASHTO 93 de diseño para pavimento flexible

Este procedimiento para estimar los espesores del pavimento se basa en modelos de comportamiento del pavimento, las cargas vehiculares y la resistencia de la subrasante. Su objetivo es determinar el Número Estructural (SN), el cual permite definir los espesores adecuados de cada capa que conforma la estructura del pavimento. Además, En la guía se da la importancia debida al nivel de la subrasante, pues esta es fundamental en el pavimento puesto que debe ser capaz de soportar las cargas vehiculares, manteniendo un nivel de serviciabilidad aceptable. M.C.S.G.G.P (M.T.C., 2014)

Periodo de diseño

El periodo de diseño para pavimentos flexibles se establece en un máximo de 10 años para vías con bajo volumen de tránsito. En otros casos, se pueden adoptar esquemas de diseño en dos etapas de 10 años cada una o un solo periodo continuo de 20 años, conforme a lo indicado en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (M.T.C., 2014).

Variabes

La ecuación fundamental para el diseño de la estructura de un pavimento flexible es la siguiente:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07 \quad (6)$$

Donde:

W_{18} : El tránsito en ejes equivalentes acumulados para el periodo diseño (Tn).

Z_R : Coeficiente estadístico de la desviación estándar normal

R: El parámetro de confiabilidad (%)

S_O: Error estándar combinado

M_R: El módulo de resiliencia efectivo, del material usado de la subrasante (psi).

ΔPSI : La pérdida o diferencia entre índices de serviciabilidad inicial y final.

SN: Numero estructural

Trafico W18

La metodología AASHTO 93 nos indica que la vida útil de un pavimento es influida directamente con el número de repeticiones de carga que puede soportar antes de alcanzar un nivel de serviciabilidad final predeterminado. Este enfoque permite estimar la capacidad estructural necesaria para que el pavimento mantenga un desempeño aceptable durante el periodo de diseño.

El método AASHTO 93 incorpora en su formulación el número de repeticiones esperadas de cargas equivalentes de ejes, lo que implica que, previo a la aplicación de las ecuaciones de diseño, debe realizarse la conversión de las cargas reales de los vehículos que circularán por la vía a ejes equivalentes simples de 18 kips (8.2 toneladas), denominados ESAL's (Equivalent Single Axle Load, por sus siglas en inglés) (M.C.S.G.G.P., M.T.C., 2014). Para el diseño de pavimentos flexibles, el Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (M.C.S.G.G.P.) del MTC clasifica el tránsito vehicular en tres categorías:

- a) Caminos de bajo volumen de tránsito: entre 150,001 y 1'000,000 ejes equivalentes (EE) en el carril de diseño.
- b) Caminos de tránsito medio: entre 1'000,001 y 30'000,000 ejes equivalentes (EE) en el carril de diseño.
- c) Caminos de alto volumen de tránsito: superiores a 30'000,000 ejes equivalentes (EE) en el carril de diseño.

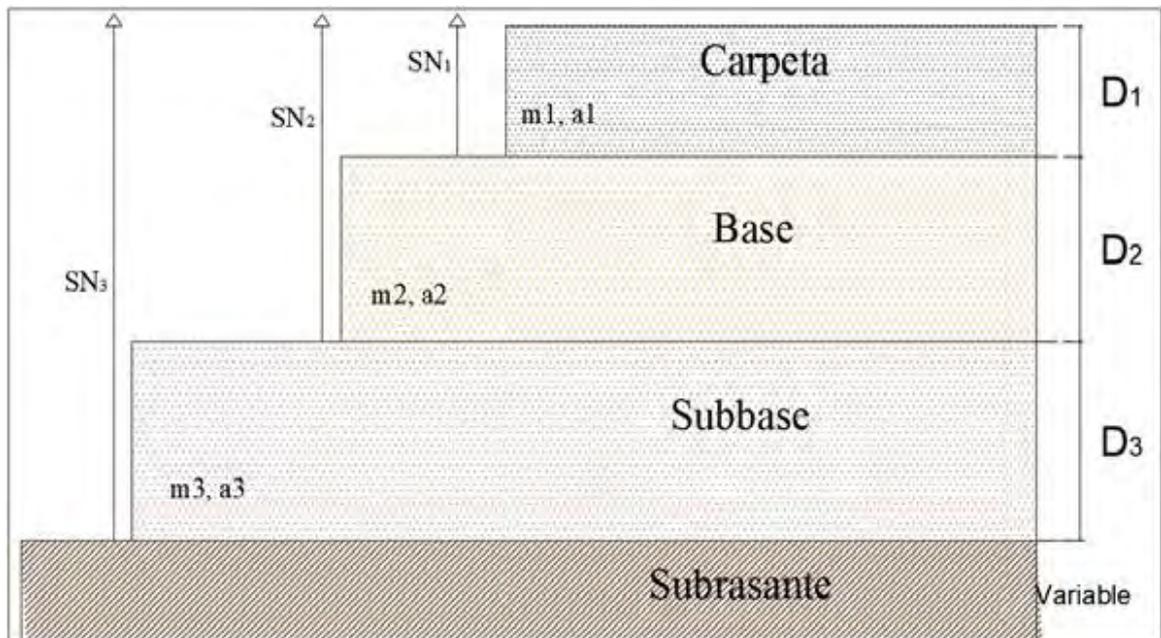
Módulo de resiliencia de la subrasante (MR)

El Módulo de Resiliencia (MR) es una medida de la rigidez del suelo de subrasante. Para su determinación, debe realizarse el ensayo de resiliencia conforme a las recomendaciones establecidas por la AASHTO. M.C.S.G.G.P. (M.T.C., 2014)

Número estructural requerido (SNR)

Los datos obtenidos se incorporan en la ecuación de diseño AASHTO para calcular el Número Estructural (SN), el cual representa el espesor total requerido del pavimento. Este valor debe ser descompuesto en espesores efectivos para cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento, como la carpeta de rodadura, la base y la subbase. Esta descomposición se realiza utilizando los coeficientes estructurales, tal como se ilustra en la Figura 17. La conversión se efectúa aplicando la Fórmula de número estructural total.

Figura 17 Espesores mínimos en función del Número Estructural



Nota. Adaptado de *Numero estructural de cada capa del pavimento*, Pizarro Y. Jhon, Huallpa C. Hugo, 2020, Tesis Ing. Civil UNSAAC

Formula:

$$SN_T = a_1 x d_1 + a_2 x m_2 x d_2 + a_3 x m_3 x d_3 \quad (7)$$

Donde:

SN_T = Numero estructural total

a₁, a₂, a₃ = Coeficientes estructurales de las capas de los materiales de la superficie de rodadura, base, subbase, respectivamente.

d₁, d₂, d₃ = Espesores (en centímetros) de las capas, superficial, base, subbase respectivamente.

m₂, m₃ = Coeficientes de drenaje para las capas de base y subbase respectivamente.

Coefficientes estructurales de las capas

El Manual de Carreteras – Suelos, Geotecnia y Pavimentos (M.C.S.G.G.P) del MTC considera diferentes coeficientes estructurales de capa (para subrasante, subbase y base), basándose en los lineamientos de la Guía AASHTO 1993. La Tabla 4 presenta los valores recomendados de estos coeficientes para cada una de las capas estructurales del pavimento.

Tabla 2 *Coefficientes de capas estructurales*

COMPONENTE DEL PAVIMENTO	CBR (%)	COEFICIENTE	VALOR COEFICIENTE ESTRUCTURAL ai (cm)
Carpeta asfáltica en caliente con módulo 430,000 PSI a 20 °C (68 o F)		a ₁	0.30/pulg (0.17/cm)
Base granular compactada a 100% de la MDS	100	a ₂	0.14 pulg (0.054/cm)
Sub Base Granula compactada 100% de la MDS	40	a ₃	0.13/pulg (0.047/cm)

Fuente. Guide for design of paviments structures de (AASHTO, 1993)

Determinación del módulo resiliente de diseño

La Guía de Diseño establece dos métodos alternativos para representar la variabilidad estacional del módulo resiliente de la subrasante. Uno de estos enfoques consiste en determinar experimentalmente, a nivel de laboratorio, la relación funcional entre el módulo resiliente y el contenido de humedad del suelo. Con base en esta relación, se ajustan los valores del módulo para cada periodo estacional, de acuerdo con las variaciones esperadas de humedad en el perfil del terreno.

Módulo resiliente efectivo de la plataforma de la carretera

Un aspecto clave en el procedimiento de diseño planteado por AASHTO, consiste en emplear un valor representativo promedio del módulo de resiliencia, que refleje el comportamiento global de la subrasante bajo condiciones climáticas variables. El método AASHTO propone calcular el daño relativo (u_f) asociado a cada módulo estacional, lo que permite ponderar su impacto estructural. La relación proporcionada en la Guía se presenta a continuación:

$$u_f = 1.18 \times 10^8 \times M_R^{-2.32} \quad (8)$$

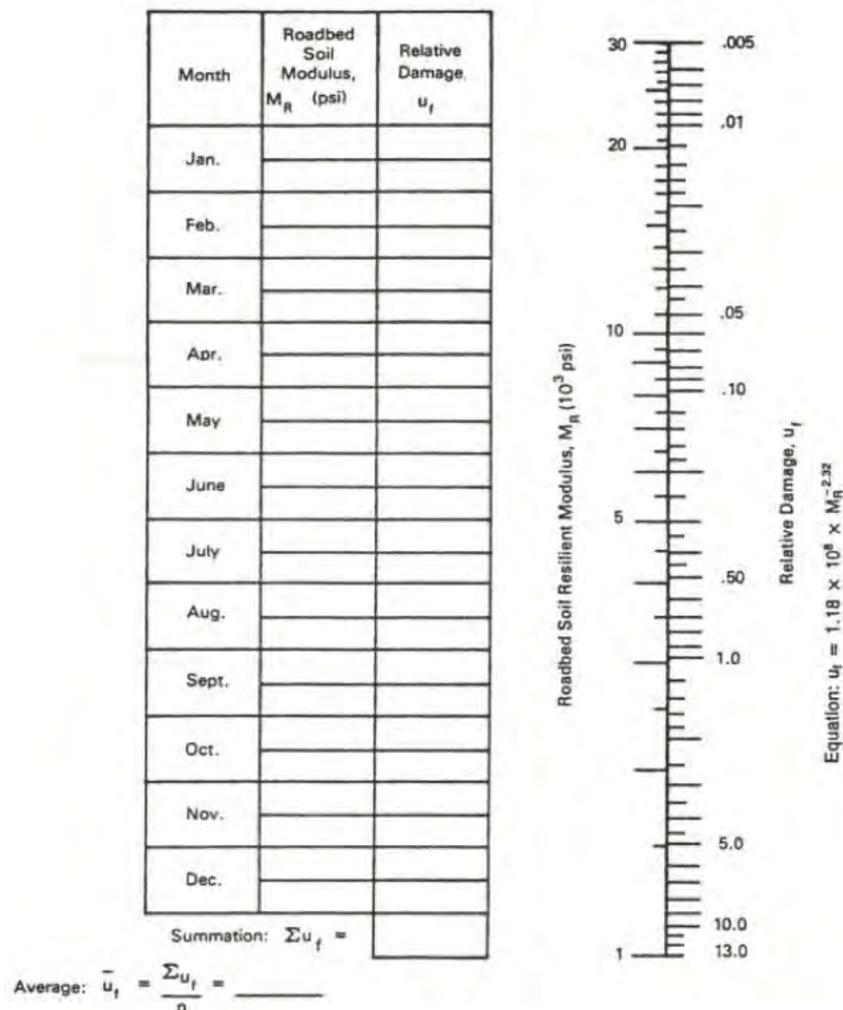
Donde:

M_R : Módulo resiliente del suelo de fundación, en psi.

u_f : Daño relativo.

A partir de la distribución mensual de módulos resilientes, se evalúa el módulo efectivo mediante una fórmula normativa, considerando la contribución relativa al daño estructural. El módulo de diseño final se obtiene calculando el daño medio y retro estimando el valor correspondiente del módulo resiliente que lo representa.

Figura 18 Cálculo del módulo de resiliencia de diseño a partir de valores estacionales



Fuente. Guide for design of pavements structures de (AASHTO, 1993)

2.3.2 Folleto de diseño para la determinación de la subrasante de diseño en Apoyo a la guía AASHTO 1993 (1997)

El módulo resiliente es el parámetro principal empleado para caracterizar el suelo de fundación en el diseño de pavimentos flexibles, según la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO (1993). Este valor representa una medida o estimación de la

propiedad elástica del material bajo un estado de tensión específico, asumiéndose equivalente al módulo de elasticidad. La Sección 2.3.1 de dicha guía establece el procedimiento para determinar el Módulo Resiliente Efectivo del Suelo de la Plataforma requerido en el diseño; sin embargo, no aborda ciertos aspectos prácticos relevantes. El objetivo de este documento es ampliar dichas indicaciones, ofreciendo criterios y recomendaciones adicionales para la determinación del módulo resiliente de diseño, aplicable tanto a proyectos de nueva construcción como de reconstrucción de pavimentos flexibles.

Pruebas de Modulo resiliente de laboratorio (Ecuaciones constitutivas)

Los ensayos triaxiales de compresión con carga repetida se emplean para determinar el módulo resiliente de los suelos de subrasante. Estas pruebas se realizan aplicando diferentes combinaciones de tensiones verticales y presiones de confinamiento, con el fin de evaluar el comportamiento elástico no lineal del material. En consecuencia, el ensayo no produce un único valor de módulo, sino que lo caracteriza para distintos estados de tensión. Dicho de otro modo, en la mayoría de los suelos de fundación, el módulo resiliente está condicionado por el estado de tensiones aplicado. Para representar los resultados obtenidos en suelos de grano grueso y fino mediante este tipo de ensayos, se han propuesto diversas formulaciones, de las cuales la Guía de Diseño AASHTO (1993) menciona cuatro en particular.

Para suelos de grano grueso:

$$M_R = K_1(\theta)^{K_2} \quad (9)$$

Donde:

K_1, K_2 : Constantes de regresión

θ : Suma de esfuerzos principales (bulk stress)

Para suelos de grano fino:

$$M_R = K_1(\sigma_d)^{K_3} \quad (10)$$

Donde:

K_1, K_3 : Constantes de regresión

σ_d : Esfuerzo desviador (desviador stress)

Se han propuesto y empleado diversas relaciones constitutivas para modelar y representar los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio de materiales de pavimento no ligados y suelos de subrasante, con el fin de describir con mayor precisión su comportamiento mecánico bajo diferentes condiciones de carga y estado de tensiones.

$$M_R = K_1(\sigma_d)^{K_3}(1 + \sigma_3)^{K_5} \quad (11)$$

Donde:

K_1, K_3, K_5 : Constantes de regresión
 σ_3 : Presión de confinamiento

$$M_R = K_1 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{K_2} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{K_3} \quad (12)$$

Donde:

K_1, K_2, K_3 : Constantes elásticas no lineales
 Pa : Presión atmosférica

Se recomienda el uso de esta última ecuación para representar los datos obtenidos en laboratorio, ya que se ha comprobado que proporciona de forma consistente un coeficiente de correlación múltiple más alto y resulta aplicable a una amplia variedad de materiales de pavimento no ligados y suelos de subrasante.

2.3.3 AASTHO T 307-99 (2012): Determinación del módulo de resiliencia de suelos y materiales agregados

La norma AASHTO T 307-99 (2012) establece el procedimiento estandarizado para determinar el módulo de resiliencia (M_r) de suelos y materiales granulares no ligados, bajo condiciones controladas de carga cíclica triaxial. Este parámetro es clave en el diseño mecanicista-empírico de pavimentos, ya que representa la respuesta elástica recuperable del suelo ante cargas repetidas similares al tránsito vehicular.

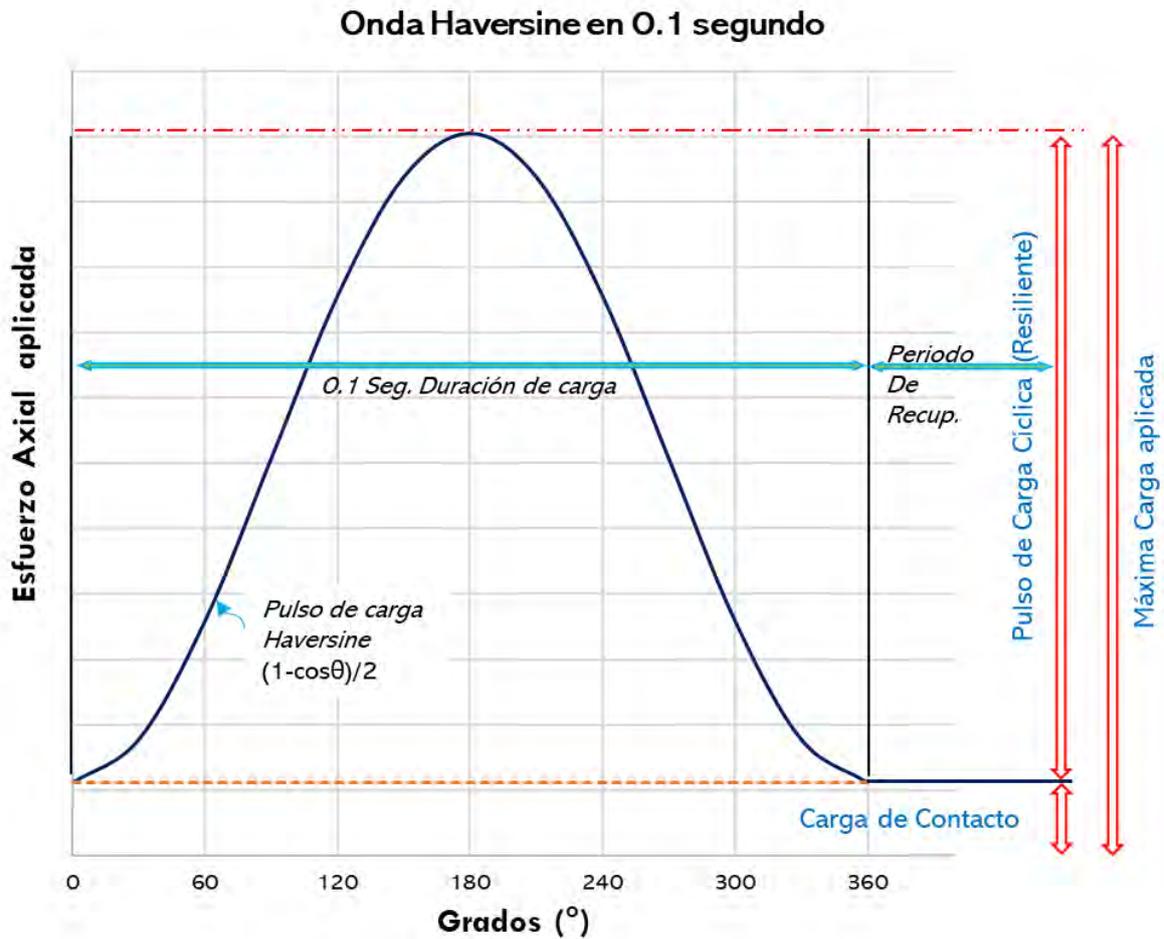
El método para la determinación del módulo resiliente abarca los suelos subrasantes y materiales de base/sub base sin tratar, simulando los estados de esfuerzos y condiciones físicas de los materiales que componen al pavimento flexible; los cuales están sujetos a las cargas transmitidas por las ruedas de los vehículos en movimiento.

La representación de las cargas se da por medio de pulsos, cuya forma es en función a la onda Haversine:

$$hav(\theta) = \frac{1 - \cos(\theta)}{2} \quad (13)$$

La onda Haversine, se aplica en un periodo de 0.1 segundo, el periodo de recuperación es de 0.9 segundos para dispositivos de carga.

Figura 19 Pulso de carga Haversine



Nota. Se aprecia la amplitud del pulso de carga Haversine, Fuente: Adaptado de la norma AASHTO T 307-99 (2012)

Como resumen se puede indicar que se aplica periódicamente un Esfuerzo axial cíclico de magnitud fija, donde la duración de un ciclo es de 1.0, tomándose la respuesta de deformación axial total resiliente (recuperable) para determinar el módulo de resiliencia.

Secuencia de cargas aplicadas en la subrasante

Las cargas aplicadas sobre el vástago del pistón, responde a la siguiente tabla de esfuerzos:

Tabla 3 *Secuencia de prueba para el suelo de subrasante*

Secuencia	Presión de confinamiento, S_3		Máximo Esfuerzo Axial, S_{max}		Esfuerzo Cíclico, S_{cyclic}		Esfuerzo de contacto, $0.1S_{max}$		Nro. De Cargas aplicadas
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
	0	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	
1	41.4	6	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
2	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
3	41.4	6	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
4	41.4	6	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
5	41.4	6	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	27.6	4	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
7	27.6	4	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
8	27.6	4	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
9	27.6	4	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
10	27.6	4	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	13.8	2	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
12	13.8	2	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
13	13.8	2	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
14	13.8	2	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
15	13.8	2	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100

Nota. En el ensayo de laboratorio se aplica las 16 series de carga. Fuente: AASHTO T 307-99 (2012)

Alcances

- La secuencia Nro. 0, se le denomina “acondicionamiento” en la cual se aplica un esfuerzo axial de tal manera que la altura de la muestra disminuya, de tal forma que se tenga al final de los 500 ciclos una deformación resiliente; si en este proceso se sigue presentando disminución de la altura se sigue los ciclos hasta las 1000 repeticiones.
- Si la tensión permanente de la muestra alcanza el 5 por ciento, la prueba tendrá que ser detenida y dar el informe en la hoja de trabajo correspondiente.
- Se utiliza como fluido de compresión aire en la cámara triaxial, la cual debe ser de un color transparente para la visualización de la muestra.

2.3.4 *Procesamiento de los resultados obtenidos en laboratorio (AASHTO T307-99)*

La norma AASHTO T307-99 (2012) nos indica la aplicación de 16 series a la muestra en el ensayo de módulo de resiliencia, la primera serie es considerada como como acondicionamiento de la muestra en donde se busca que la muestra pierda todas las deformaciones permanentes, a fin que en las posteriores series se pueda medir las deformaciones elásticas (resilientes).

Figura 20 Numero de ciclos al cual la muestra presenta deformaciones elásticas



Nota. Las muestras para ensayos de módulo de resiliencia tienen un comportamiento resiliente cuando el periodo de acondicionamiento es de 1000 ciclos. Fuente: (Asociación Paraguaya de Carreteras, 2021)

Cada serie está comprendida por 100 ciclos de onda haversine (abordada anteriormente), de estos 100 ciclos por serie únicamente se tomarán los últimos 5 ciclos.

Para el cálculo del módulo de resiliencia en laboratorio, según la norma AASHTO T 307-99, establece la relación del módulo de resiliencia según lo expresado en la Ecuación 1 como base

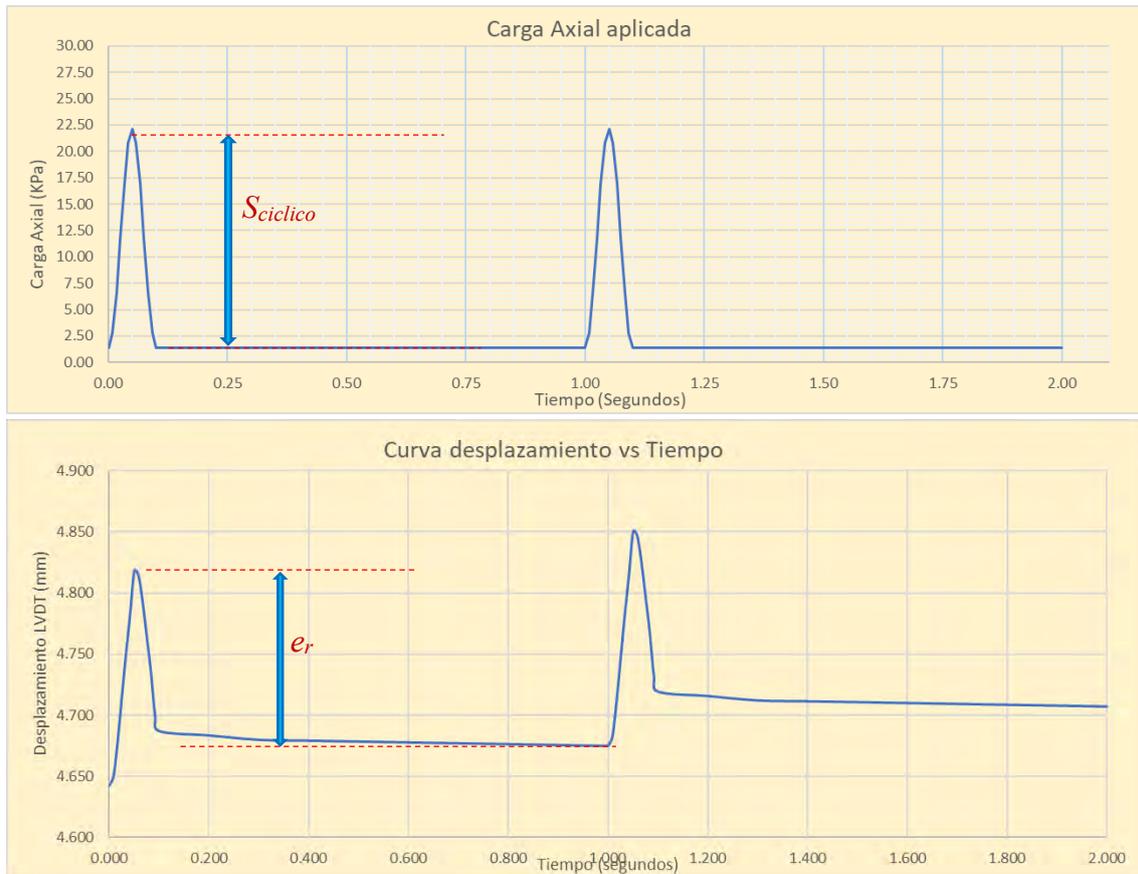
$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} = \frac{S_{ciclico}}{e_r/L} \quad (14)$$

Donde:

- M_r : Módulo resiliente
- σ_d : Esfuerzo desviador
- ε_r : Deformación unitaria recuperable (resiliente)
- $S_{ciclico}$: Esfuerzo axial cíclico
- e_r : Deformación recuperable (mm)
- L : Longitud inicial de la muestra (mm)

El cálculo del Esfuerzo axial cíclico “ $S_{ciclico}$ ” está dado por la diferencia entre el Esfuerzo máximo axial aplicado y el Esfuerzo de contacto (ver la figura siguiente), de igual forma para el cálculo de la deformación recuperable “ e_r ” resulta de la resta entre el desplazamiento máximo registrado por el LVDT y el valor de registrado por el LVDT al final del ciclo.

Figura 21 Grafica de dos ciclos de onda haversine: (a) Esfuerzo axial vs tiempo y (b) Desplazamiento del LVDT vs tiempo.



Nota. Fuente: Elaboración propia

El proceso se repite para los 5 últimos ciclos de cada serie y luego se saca el promedio de estos para tener el valor del módulo de resiliencia correspondiente a cada serie.

2.3.5 Manual de Carreteras: Suelos, Geología y Geotecnia – MTC (2014)

Emitido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC), este manual establece de forma detallada los procedimientos y criterios técnicos para la investigación, caracterización y evaluación de suelos en el marco de proyectos viales. Contempla la identificación y clasificación de la subrasante, reconociendo al módulo de resiliencia (M_r) como un parámetro clave para determinar la capacidad estructural y de soporte del suelo bajo condiciones de carga repetitiva, aspecto esencial en el diseño de pavimentos flexibles. El documento proporciona lineamientos para la obtención del M_r mediante ensayos de laboratorio normalizados, así como su estimación indirecta a través de correlaciones con propiedades físicas y mecánicas del suelo, asegurando coherencia y validez técnica en el proceso de diseño.

2.3.6 *Manual de Ensayo de Materiales para Carreteras – MTC*

Este manual, de carácter técnico-normativo y también emitido por el MTC, constituye la referencia obligatoria para la ejecución, control y validación de ensayos de laboratorio en el ámbito de la ingeniería vial. Define de manera estandarizada las metodologías para la evaluación de suelos, agregados, mezclas asfálticas y otros materiales empleados en la construcción de carreteras, asegurando uniformidad en los procedimientos, trazabilidad de los resultados y confiabilidad técnica de los datos generados. Su aplicación garantiza que los análisis y ensayos se realicen conforme a parámetros nacionales e internacionales de calidad.

2.3.7 *Norma Técnica E.050: Suelos y Cimentaciones*

Si bien está enfocada principalmente al ámbito de la edificación y las cimentaciones, esta norma técnica proporciona criterios fundamentales para la caracterización y clasificación geotécnica de suelos. Incluye la determinación de parámetros complementarios al módulo de resiliencia, tales como el CBR (California Bearing Ratio), la densidad seca máxima, la compacidad relativa y la humedad óptima. En proyectos de ingeniería civil vinculados a infraestructura vial, esta norma puede emplearse de manera referencial para realizar una evaluación más completa y correlacionada del comportamiento mecánico del terreno.

2.4 Marco Conceptual

2.4.1 *Base*

Capa estructural del pavimento ubicada entre la subbase y la carpeta asfáltica. Su función es distribuir las cargas del tránsito hacia las capas inferiores, contribuyendo a la estabilidad y durabilidad de la estructura (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2018).

2.4.2 *California Bearing Ratio (CBR)*

Método empírico que evalúa la capacidad de soporte de un suelo mediante la penetración controlada de un pistón estándar en una muestra previamente compactada y acondicionada en humedad. Es un parámetro ampliamente utilizado para la clasificación de suelos y el diseño de capas de pavimento (ASTM, 2018).

2.4.3 *Celda triaxial*

Equipo de laboratorio diseñado para aplicar esfuerzos tridimensionales a muestras cilíndricas de suelo. Permite controlar la presión de confinamiento lateral y la carga axial, con

el fin de simular condiciones de campo y estudiar el comportamiento mecánico de los materiales bajo cargas controladas.

2.4.4 *Carpeta asfáltica*

Capa superficial conformada por una mezcla de agregados minerales y asfalto, cuya función principal es proporcionar una superficie de rodadura durable, segura y resistente a la acción del tránsito y las condiciones climáticas (Instituto del Asfalto, 2015).

2.4.5 *Drenaje*

Proceso mediante el cual el agua contenida en los poros del suelo es evacuada hacia el exterior. En ensayos triaxiales, el drenaje se controla para simular condiciones drenadas o no drenadas, lo que influye en la respuesta mecánica del material.

2.4.6 *Deformación elástica*

Fracción de la deformación total que se recupera por completo una vez retirada la carga aplicada. Es clave para el cálculo de parámetros como el módulo resiliente y refleja el comportamiento reversible del material.

2.4.7 *Deformación plástica*

Porción de la deformación que permanece en el material tras retirar la carga, asociada a cambios permanentes en la estructura interna del suelo. Generalmente disminuye con la repetición de ciclos de carga debido a la reacomodación de partículas.

2.4.8 *Diseño Mecánico-Empírico (MEPDG)*

Enfoque que combina principios de la mecánica de materiales con datos empíricos para predecir el desempeño estructural de pavimentos bajo condiciones específicas de carga, clima y materiales. Permite optimizar el diseño en función de variables de campo (NCHRP, 2004).

2.4.9 *Infiltración*

Proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo desde la superficie, desplazándose hacia capas más profundas. Este fenómeno modifica el contenido de humedad y, por ende, influye en la resistencia y deformabilidad del material.

2.4.10 Homogeneidad geotécnica

Condición en la que las propiedades del suelo se mantienen uniformes en una zona determinada. En ingeniería, garantiza que las variaciones espaciales no afecten de forma significativa los resultados de análisis o el comportamiento estructural esperado.

2.4.11 Índice de Thornthwaite (TMI)

Parámetro climático que expresa el grado de humedad de una región, calculado a partir de la relación entre precipitación y evapotranspiración potencial. Se emplea en la clasificación climática y en el análisis de la influencia del clima sobre suelos y pavimentos (Thornthwaite, 1948).

2.4.12 Módulo resiliente

Medida de la rigidez de un suelo bajo cargas repetidas, definida como la relación entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación elástica recuperable, generalmente obtenida mediante ensayos triaxiales (AASHTO, 1993).

2.4.13 Modelo climático integrado mejorado (EICM)

Herramienta computacional unidimensional que simula, de forma acoplada, el flujo de calor y humedad en las capas del pavimento y la subrasante. Permite reproducir las variaciones de temperatura y contenido de humedad a lo largo del tiempo, en función de las condiciones climáticas durante la vida útil de la vía (Zapata et al., 2009).

2.4.14 Esfuerzo de confinamiento

Presión aplicada perpendicularmente al eje de una muestra en un ensayo triaxial para reproducir el confinamiento que experimenta el suelo en campo, simulando un estado tridimensional de esfuerzos.

2.4.15 Esfuerzo de corte octaédrico

Magnitud que representa la parte de distorsión del estado tensional en un material. Es útil para establecer correlaciones con la resistencia y las deformaciones en suelos bajo carga.

2.4.16 Esfuerzo desviador

Diferencia entre el esfuerzo axial aplicado (σ_1) y el esfuerzo de confinamiento (σ_3) en un ensayo triaxial. Representa la carga neta que provoca la deformación del espécimen (Das, 2010).

2.4.17 Esfuerzos principales

En un ensayo triaxial, corresponden a la tensión axial máxima (σ_1) y la tensión radial o de confinamiento mínima (σ_3) aplicadas a la muestra, parámetros clave para determinar su resistencia al corte (Head, 1992).

2.4.18 Pavimentos flexibles

Estructuras formadas por capas de materiales que transmiten las cargas hacia la subrasante mediante la distribución progresiva de esfuerzos, manteniendo continuidad en la deformación entre capas (Yoder & Witczak, 1975).

2.4.19 Pavimentos rígidos

Estructuras en las que la capa de rodadura, usualmente de concreto hidráulico, actúa como una losa capaz de distribuir las cargas sobre un área extensa, transmitiendo los esfuerzos por flexión a las capas inferiores (Yoder & Witczak, 1975).

2.4.20 Presión de inflado estándar

Valor de presión de aire recomendado para los neumáticos utilizados en pruebas de diseño de pavimentos. Comúnmente se adopta un valor cercano a 750 kPa, dentro del rango típico de 600–800 kPa, para simular condiciones de carga representativas.

2.4.21 Factor de daño relativo

Coefficiente empleado para estimar el deterioro acumulado en la estructura del pavimento en función de la variación mensual del módulo resiliente. Según la metodología AASHTO, permite calcular un módulo resiliente de diseño representativo del comportamiento a largo plazo.

CAPITULO 3 :HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis de la investigación

3.1.1 Hipótesis general

HG: La variación del módulo de resiliencia de la subrasante en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, inducida por los factores climáticos genera diferencias significativas respecto a su valor óptimo, afectando su aplicabilidad en el diseño estructural del pavimento flexible.

3.1.2 Hipótesis específicas

HE1: El módulo de resiliencia óptimo determinado en laboratorio para los suelos de subrasante en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 es adecuado para su aplicación en el diseño estructural del pavimento flexible bajo condiciones ideales de compactación y humedad.

HE2: El módulo de resiliencia de la subrasante en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 disminuye significativamente ante condiciones ambientales variables simuladas mediante el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM), en comparación con los valores obtenidos en condiciones óptimas.

HE3: El incremento del contenido de agua, producto de los factores climáticos, influye directamente en la reducción del módulo de resiliencia de la subrasante en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500.

HE4: Existe una diferencia significativa entre los valores del módulo resiliente obtenidos mediante ensayos de carga cíclica y aquellos estimados a partir del ensayo CBR en la en la subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km evidenciando que las correlaciones empíricas presentan limitaciones frente a métodos experimentales.

3.2 Identificación de variables e indicadores

3.2.1 Variable independiente (X)

Influencia de los factores climáticos en el terreno de fundación.

Sus indicadores son:

- Temperatura

- Precipitación
- Succión Matricial
- Grado de saturación

3.2.2 *Variable dependiente (Y)*

Cálculo del Módulo de resiliencia del terreno de fundación.

Sus indicadores son:

- Esfuerzos principales
- Deformaciones elásticas
- Contenido de Finos

3.2.3 *Dimensiones*

- Comportamiento del módulo resiliente frente a los estados de esfuerzo (Esfuerzo desviador, Presión de confinamiento).
- Composición del material del terreno de fundación.
- Influencia del contenido de agua en los especímenes del suelo.
- Datos meteorológicos de estación Granja Kayra.

CAPITULO 4 :METODOLOGIA DE INVESTIGACION

4.1 Alcance de la investigación

Por su alcance la investigación es correlacional, bajo los conceptos de Hernández Sampieri (2014) se someten a análisis fenómenos para especificar las propiedades y características de dos o más variables en las que existe una relación. En nuestro caso se busca especificar y dimensionar como el módulo de resiliencia se relaciona con los factores climáticos.

4.2 Ámbito de Estudio: Localización Política y Geográfica

Ámbito Geográfico: San Jerónimo – Cusco

Localización : Carretera CU-123 (tramo 0+000 – 10+500)

4.3 Tipo, Nivel y Diseño de Investigación

4.3.1 Tipo de investigación

Aplicada, Porque el trabajo está enfocado a la comprensión de la variación del módulo de resiliencia por factores climáticos.

Cuantitativa, Porque los resultados se basan en la cuantificación y el cálculo de los mismos.

4.3.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación comprende dos enfoques. En primer lugar, es descriptivo, dado que se analizan las características y rasgos relevantes de la influencia de los factores climáticos con el propósito de determinar el comportamiento del módulo de resiliencia. Asimismo, es correlacional, puesto que se evalúa la relación existente entre las variables objeto de estudio.

4.3.3 Diseño de investigación

La investigación es de tipo experimental, pues se exploró y se realizó ensayos manipulación la variable independiente para observar su efecto sobre una variable dependiente, bajo condiciones controladas. En nuestro caso se observó como el módulo de resiliencia variaba, así mismo se buscó medir el efecto de los factores climáticos.

4.4 Unidad de análisis

La unidad de análisis de la presente investigación está dada por la subrasante (terreno de fundación) de la carretera San Jerónimo a Paruro CU-123.

4.5 Población de estudio

Dado que la investigación se fundamenta en el análisis de la variación del módulo de resiliencia en función de los factores climáticos, la población de estudio está conformada por la subrasante de la carretera CU-123, comprendida en un tramo de 10,5 kilómetros que atraviesa las comunidades de Collana, Pallpancay, Sunco, Usphabamba, Conchacalla y Cachupata, pertenecientes al distrito de San Jerónimo, en la ciudad del Cusco.

4.6 Muestra

Considerando que en el Perú no existen especificaciones normativas claramente establecidas respecto a la variación del módulo de resiliencia bajo la influencia de factores climáticos, se optó por una muestra no probabilística mediante muestreo por conveniencia. Este tipo de muestreo se justifica en función de la disponibilidad, accesibilidad y viabilidad técnica de las secciones de subrasante analizadas, permitiendo recopilar información representativa del fenómeno en estudio.

4.6.1 Tamaño de la muestra

Se realizarán calicatas tomándose en cuenta el MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS. Conforme a dicha normativa, el programa de exploración e investigación de campo contempla la ejecución de calicatas o pozos exploratorios, cuyo espaciamiento se define principalmente por las características geotécnicas de los materiales subyacentes en el trazo de la vía. En el presente estudio, las calicatas se dispusieron con un espaciamiento promedio de 1.000 metros

4.6.2 Características de la muestra en los ensayos de módulo de resiliencia

En el ensayo de medición directa del módulo de resiliencia se emplearon muestras cilíndricas con una relación entre diámetro y altura (D:H) de 1:2, se adoptó por una compactación del 95 % de la densidad seca máxima (Proctor Modificado, MTC E-115) con el fin de cumplir con los estándares técnicos de carreteras, como el Manual de Carreteras del MTC – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, que establecen que las capas de subrasante compactadas deben cumplir como mínimo tal valor y criterios internacionales de agencias

viales de Estados Unidos (DOTs), asegurando estabilidad estructural de la subrasante y minimizando asentamientos diferenciales de forma eficiente en costos.

4.7 Técnicas e Instrumento de recolección de datos

4.7.1 Técnicas

Al ser una investigación correlacional, se utilizaron métodos sistemáticos para la recolección de datos, partiendo desde una observación estructurada basada en la medición experimental realizada en laboratorio. Asimismo, se emplearon registros documentales provenientes de bases de datos para la obtención de información meteorológica. De igual forma, para el correcto desarrollo de la investigación, se recurrió al uso de artículos científicos, publicaciones especializadas y normas tanto nacionales como internacionales (MTC, AASHTO, entre otras).

A continuación, se presentan las siguientes técnicas de recolección:

Exploración de suelos por medio de calicatas

Después de una visita preliminar, se realizó la exploración de suelos por medios de calicatas a una profundidad de 1.5 metros respecto al nivel de subrasante tomándose en cuenta el MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.

Recolección de datos meteorológicos

Para conocer las condiciones climáticas de la zona de estudio, se usó la información publicada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) proveniente de la estación GRANJA KAYRA

Ensayos de laboratorio

En una primera etapa, los ensayos estuvieron dirigidos a la identificación y caracterización de los suelos con el propósito de determinar su clasificación; posteriormente, en una segunda etapa, se evaluaron sus propiedades físico-mecánicas. Todas las pruebas fueron ejecutadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Acondicionamiento y preparación de especímenes

El MTC permite la segmentación del tramo de estudio ya que es fundamental para los análisis geotécnicos y de diseño. En nuestro caso, mediante la exploración de calicatas se identificó una similitud de suelos a lo largo del recorrido; adicionalmente, los ensayos de

laboratorio permitieron reconocer las variaciones presentes en el material. Con base en ello, se decidió homogeneizar sectores denominados subtramos, lo que facilita la realización de análisis detallados, como el cálculo del módulo resiliente, en contextos geotécnicamente homogéneos.

En esta investigación se definieron tres subtramos con características comunes. Respecto a la elección del tamaño de muestra, la norma AASHTO T 307-99 establece que el tamaño máximo de partícula no debe superar el 25 % del diámetro de la probeta. Bajo este criterio:

- Primer subtramo: suelo arcilloso, se emplearon muestras de 70 mm de diámetro y 140 mm de altura.
- Segundo subtramo: para representar de manera más precisa el tipo de suelo, se utilizaron probetas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura.
- Tercer subtramo: el suelo no presentó cohesión, lo que impidió la ejecución del ensayo de medición directa del módulo resiliente.

Para acondicionar las muestras se sometió a los especímenes a trayectorias de humedecimiento y secado, a fin de darles las condiciones de saturación que representan los efectos de los factores climáticos.

4.7.2 Instrumentos

Los instrumentos utilizados están orientados a medir y caracterizar de las propiedades mecánicas del suelo; de igual forma con las condiciones climáticas.

- Datos meteorológicos Estación Granja Kayra
- Equipo triaxial cíclico (Sistema LoadTrac-II)
- Unidad de control, emisor y receptor RM
- Ejecutable Main_Civil v19 (Software LabView)
- Medidores de deformación (LVDTs)
- Instrumentos del laboratorio para Clasificación de suelos
- Equipo de penetración de muestras para el cálculo del CBR

4.8 Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos

El análisis de datos consiste en examinar detalladamente cada procedimiento realizado en laboratorio y su influencia en el estudio del efecto de los factores climáticos sobre el módulo

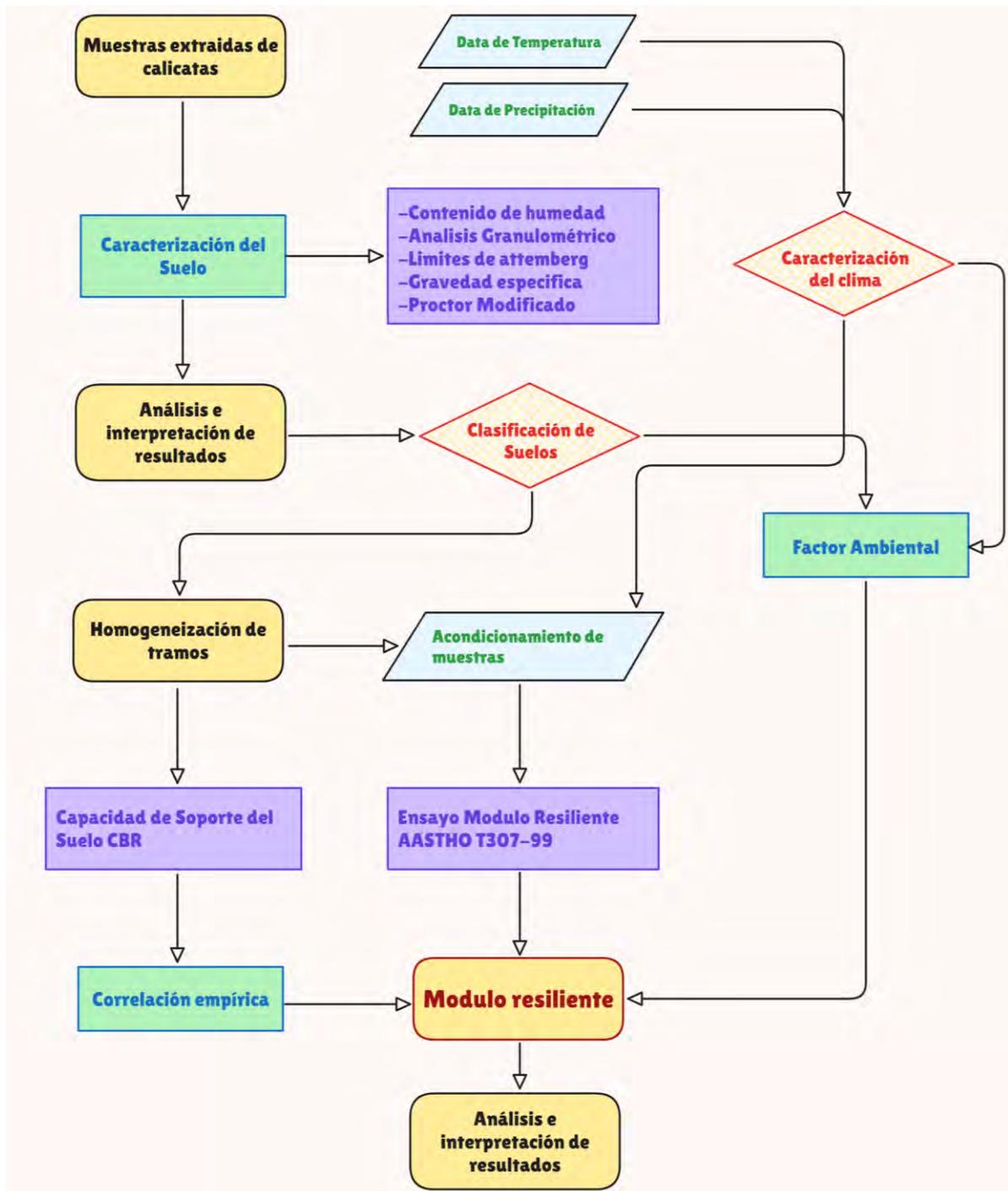
de resiliencia, asegurando el cumplimiento de los objetivos planteados y preservando la consistencia de las variables e indicadores definidos. Para este propósito, se aplicarán las siguientes normas en el tratamiento de los datos:

- Análisis Granulométrico por Tamizado (MTC E 107)
- Limite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad (MTC E-110, E-111)
- Humedad Natural (MTC E-108)
- Clasificación de suelos método SUCS (ASTM D-2487)
- Clasificación de suelos método AASHTO (AASHTO M-145)
- Gravedad Específica de los sólidos del suelo (MTC E 113)
- Proctor Modificado (MTC E 115)
- California Bearing Ratio (CBR) (MTC E 132)
- Determinación del Módulo Resiliente de Suelos y Materiales Agregados (AASHTO T307-99)

4.9 Diseño Metodológico

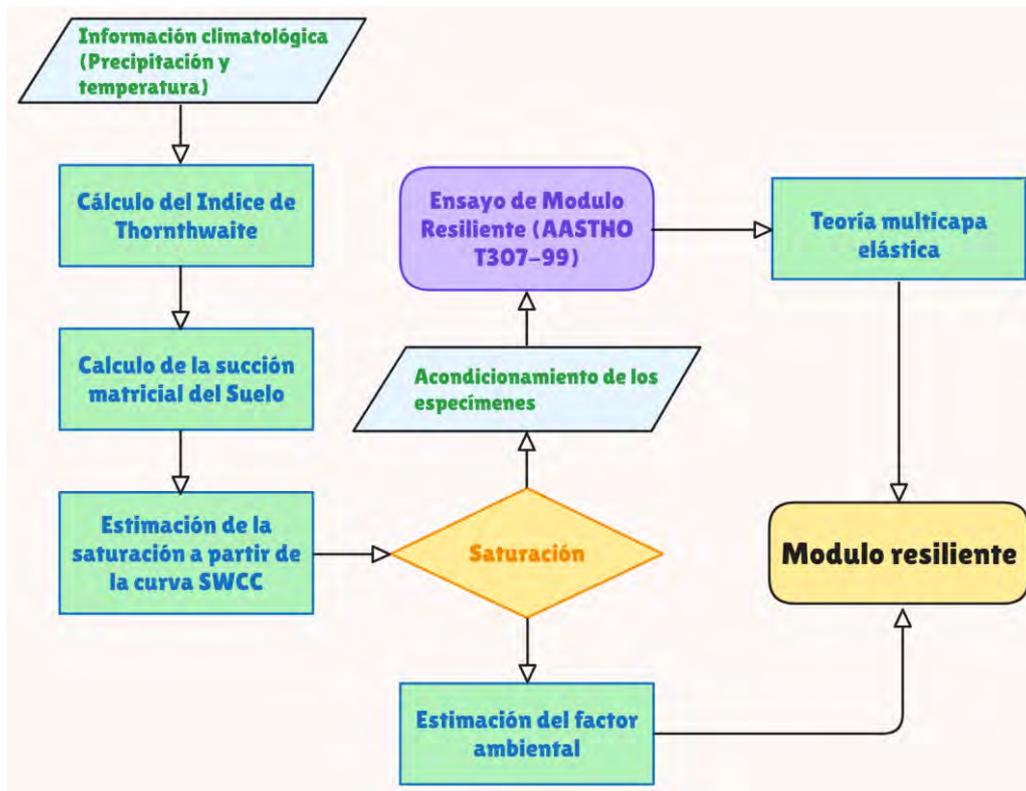
El proceso para la presente investigación se realizará según el siguiente diagrama de flujo.

Figura 22 Diagrama de flujo de la investigación



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 23 Diagrama de flujo para el cálculo del módulo resiliente



Nota. Fuente: Elaboración propia

4.10 Exploración de Calicatas

4.10.1 Ubicación

El sector de la carretera, material de estudio, se encuentra ubicada en la carretera San Jerónimo – Paruro (CU-123) teniendo como punto inicial el kilómetro 0+000, en la intersección con la vida de evitamiento en la zona de Chimpahuaylla y termina en el kilómetro 10+500 en la comunidad campesina de Ushpabamba, en el distrito de San Jerónimo, provincia y departamento de Cusco. La Figura 24 muestra la ubicación de la zona de estudio dentro del sistema nacional de carreteras, La Figura 25 muestra la ruta de estudio, la cual posee como superficie de rodadura “afirmado” en todo el tramo analizado.

Figura 24 CU-123; Vía San Jerónimo a Paruro, tramo 0+000 - 10+500 KM



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 25 Superficie de rodadura de la vía de estudio



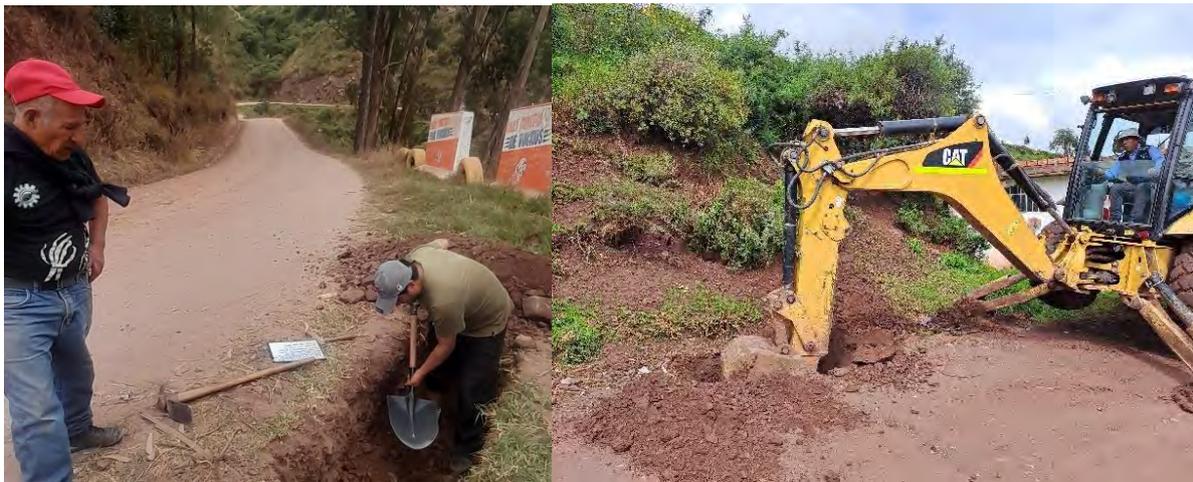
Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.10.2 Extracción de muestras a través de la excavación de calicatas

Para la exploración del suelo mediante calicatas, se empleó tanto equipo mecánico (retroexcavadora) como herramientas manuales. En total, se excavaron 10 calicatas distribuidas estratégicamente a lo largo del tramo de estudio.

La ubicación y apertura de estas calicatas se realizó de forma alternada, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma “Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Las muestras recolectadas fueron almacenadas en costales de color blanco, con un peso promedio de 45 kg por unidad. Cada costal fue etiquetado cuidadosamente con su respectivo código de identificación, el cual incluía el nombre del tema de investigación, la calicata correspondiente, las características del suelo, la norma de muestreo aplicada y la fecha de extracción.

Figura 26 *Exploración de calicatas*



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 27 *Exploración de calicatas*



Nota. Excavación y extracción de muestras del primer subtramo

Figura 28 *Excavación y extracción de Calicatas*



Nota. Excavación y extracción de muestras del segundo subtramo

Figura 29 *Excavación y extracción de Calicatas*



Nota. Excavación y extracción de muestras del segundo subtramo

Figura 30 *Excavación y extracción de Calicatas*



Nota. Excavación y extracción de muestras del tercer tramo

4.11 Ensayos realizados en laboratorio

4.11.1 Ensayos para determinar las Características del Suelo

Clasificación del suelo

Para determinar la clasificación del suelo mediante el sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS), se realiza el análisis granulométrico y se calcula sus índices de plasticidad.

Análisis Granulométrico de Suelos Por Tamizado (MTC E 107)

Para determinar los porcentajes del suelo que pasan por los distintos tamices hasta el de 74mm (N° 200), Se realiza el ensayo de una muestra representativa.

Equipos y Materiales

Balanza, Horno, Tamices, Recipientes y Cepillo. Según el manual de ensayo de materiales la serie de tamices de malla cuadrada a usar serán los indicados en la siguiente tabla:

Tabla 4 Serie de Tamices para el Análisis Granulométrico

TAMICES	ABERTURA (mm)
1 1/2"	38.100
1"	25.400
3/4"	19.050
1/2"	12.700
3/8"	9.525
#4	4.760
#10	2.000
#20	0.840
#40	0.420
#60	0.250
#100	0.149
#200	0.074

Nota. Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016)

Procedimiento

El ensayo se inició con el lavado del suelo a través del tamiz N.º 200, eliminando los finos. Posteriormente, el material retenido fue secado en horno por 24 horas para asegurar la completa eliminación de humedad antes del proceso de tamizado. El tamizado se realizó manualmente, aplicando movimientos circulares y laterales sobre la batería de tamices, con el fin de mantener la muestra en constante agitación y favorecer la clasificación granulométrica.

Finalizado el procedimiento, se pesó cada fracción retenida utilizando una balanza de precisión, permitiendo cuantificar la distribución de tamaños de partícula.

Procesamiento de datos

Se realiza el cálculo del porcentaje de material que pasa por el tamiz 0.074 mm (Malla N° 200) mediante la siguiente formula:

$$\%Pasa \#200 = \frac{Peso \ Total - \ PesoRetenido \ Malla\#200}{Peso \ Total} \times 100 \quad (15)$$

Asimismo, se calcula el porcentaje retenido sobre cada tamiz y los porcentajes que pasan haciendo uso de las siguientes formulas:

$$\%Retenido = \frac{PesoRetenido \ en \ el \ Tamiz}{Peso \ Total} \times 100 \quad (16)$$

$$\%Pasa = 100 - \%Retenido \ Acumulado \quad (17)$$

Con los datos obtenidos se procede a realizar la gráfica correspondiente a la curva granulométrica.

Figura 31 *Secado de suelos*



Nota. Se observa el secado de suelos al sol antes de realizar el lavado.

Figura 32 Lavado de material por la malla # 200



Nota. Lavado de material de muestras de calcatas por la malla N° 200.

Figura 33 Análisis Granulométrico



Nota. Se observa el procedimiento de tamizaje y obtención de material retenido de mallas para la granulometría de la progresiva Km 09+630.

Figura 34 Análisis Granulométrico



Nota. Se observa el procedimiento de tamizaje y obtención de material retenido de mallas para la granulometría de la progresiva Km 04+040.

Determinación del Límite Líquido (Norma MTC E 110)

El límite líquido es un parámetro fundamental para la caracterización y clasificación de suelos según los sistemas SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Este ensayo permite establecer correlaciones con diversas propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo.

Equipos y materiales utilizados

Cápsulas metálicas para secado, cuchara de Casagrande, ranurador estandarizado, recipiente de porcelana, gotero o frasco lavador, balanza de precisión, horno de secado y espátula.

Procedimiento

Se selecciona una muestra representativa de suelo que pase por el tamiz N.º 40, con una masa comprendida entre 150 y 200 gramos. A esta se le añade agua destilada en pequeñas cantidades, mezclando hasta lograr una pasta homogénea. Posteriormente, se deposita una porción de esta mezcla en la cuchara de Casagrande, nivelándola horizontalmente. Utilizando el ranurador normalizado, se traza una ranura en el centro de la muestra.

Se procede a accionar la cuchara de Casagrande, hasta que ambas mitades del suelo entren en contacto a lo largo de una longitud mínima de 13 mm. Se registra el número de golpes requeridos y se toma una submuestra para la determinación del contenido de humedad correspondiente. Este procedimiento se repite variando el contenido de agua, hasta obtener al menos tres resultados dentro del rango de 20 a 35 golpes.

Procesamiento y análisis de datos

Se representa gráficamente la relación entre el número de golpes (en escala logarítmica) y el contenido de humedad de cada ensayo. Se traza la curva de tendencia correspondiente y se determina el contenido de humedad que corresponde a 25 golpes, valor que se considera como el límite líquido del suelo.

Figura 35 Equipos y Materiales usados para el Ensayo de Limite Liquido



Nota. Se observa el procedimiento realizado para la obtención del Limite Liquido para la progresiva Km 06+550.

Figura 36 Procedimiento del Ensayo de Limite Liquido



Nota. Se observa el procedimiento realizado para la obtención del Limite Liquido para la progresiva Km 08+300.

Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad (MTC E 111)

El límite plástico corresponde al contenido de humedad en el que un suelo fino puede moldearse en hilos de 3.2 mm de diámetro antes de que comiencen a aparecer grietas. Este parámetro es clave en la clasificación de suelos según los sistemas SUCS y AASHTO, y se utiliza para estimar su comportamiento plástico.

Materiales y equipos utilizados

Vidrio esmerilado, espátula, balanza de precisión, horno de secado, tamiz N.º 40, agua, cápsulas metálicas y recipientes.

Método de ensayo

Se seleccionan 20 g de suelo seco que pasa por el tamiz N.º 40 y se mezcla con agua hasta obtener una masa plástica uniforme. La muestra se modela en pequeños cilindros y se rueda sobre la superficie esmerilada hasta que, al alcanzar un diámetro de 3.2 mm, se observen fisuras. Los fragmentos resultantes se recolectan para determinar su humedad, correspondiente al límite plástico.

Procesamiento de datos

El límite plástico se determina como el promedio de las humedades y se expresa como porcentaje de humedad, siguiendo la siguiente fórmula:

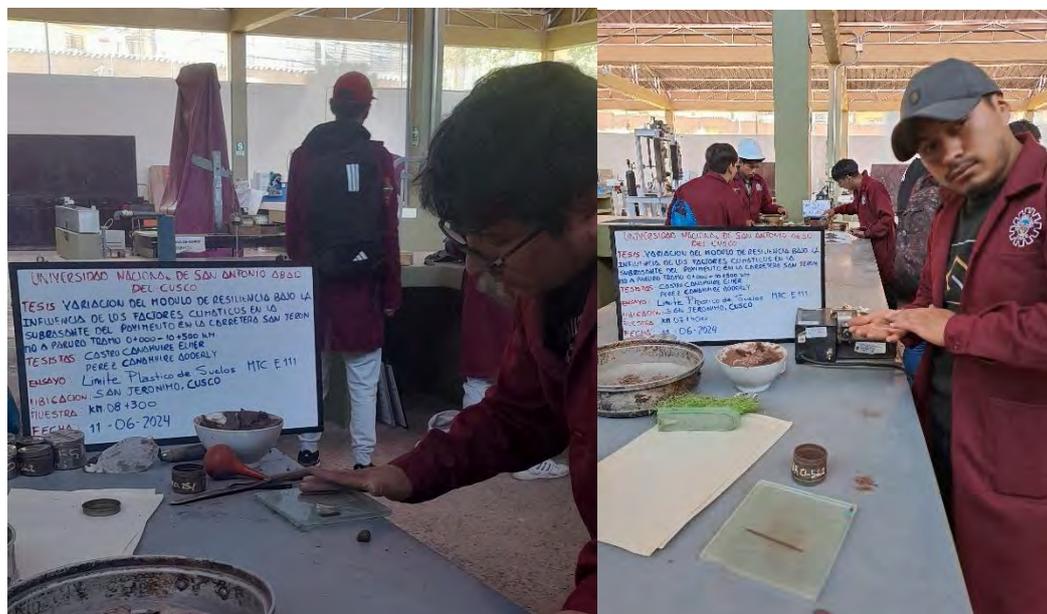
$$\text{Limite Plastico} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo seco al horno}} \times 100 \quad (18)$$

Una vez calculado el límite líquido y límite plástico se determina el índice de plasticidad

como la diferencia entre estos dos

$$\text{Indice de Plasticidad} = \text{Limite Liquido} - \text{Limite Plastico} \quad (19)$$

Figura 37 Procedimiento para la obtención del Límite Plástico



Nota. Fuente: Elaboración propia

Ensayo para la gravedad específica de sólidos de suelo mediante Picnómetro de agua (MTC E 113)

El ensayo, conforme a la norma MTC E 113, permite determinar la gravedad específica de los sólidos (G_s), definida como la relación entre el peso de un volumen dado de partículas sólidas del suelo y el peso de un volumen equivalente de agua destilada a 4 °C. Este parámetro es fundamental en ingeniería geotécnica para el cálculo de propiedades como porosidad, densidad seca y correlaciones con otras características del suelo.

Equipos requeridos

Matraz volumétrico (500 ml) o frasco de Le Chatelier, Balanza de precisión (0.01 g), Baño de agua (20 ± 2 °C), Horno (105–110 °C), Agua destilada, embudo, espátula y papel absorbente.

Procedimiento

Se seca una muestra representativa que pasa el tamiz N.º 40 y se lleva a peso constante. Se registra el peso del matraz seco (W_1), luego se introduce entre 50–100 g de suelo seco y se pesa nuevamente (W_2). Se añade agua destilada, eliminando el aire atrapado mediante agitación o vacío. Finalmente, se llena el matraz hasta la línea de aforo, se seca externamente y se pesa (W_3). Se registra la temperatura del agua para posibles correcciones según su densidad.

El cálculo de la gravedad específica (G_s) se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_1 + W_3} \quad (20)$$

Este ensayo es fundamental para la caracterización física de los suelos y sus resultados influyen directamente en varios cálculos y análisis en el diseño de cimentaciones y estructuras geotécnicas.

Figura 38 Pesaje del matraz con agua destilada y su introducción de suelo en el matraz



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 39 Utilización de la bomba de vacío para la eliminación del aire



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 40 Pesaje del suelo introducido en el matraz



Nota. Fuente: Elaboración propia

4.11.2 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas del Suelo

Compactación de Suelos en Laboratorio Utilizando una Energía Modificada (Proctor Modificado) (MTC E 115)

De acuerdo con el Manual de Ensayos del MTC (2016), este procedimiento permite determinar el contenido de humedad óptimo de compactación y la densidad seca máxima de un suelo, aplicando una energía modificada de $2700 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ (equivalente a $56\,000 \text{ ft}\cdot\text{lb}/\text{ft}^3$), superior a la del Proctor estándar.

Equipos necesarios

Molde de compactación (4" o 6"), martillo de 4.5 kg, espátula, cucharón, balanza de precisión, agua destilada, tamices N.º 4 y $\frac{3}{4}$ ", cápsulas de humedad y horno de secado.

Procedimiento

Se compactan cuatro muestras con contenidos de humedad distribuidos alrededor del valor óptimo estimado, incluyendo al menos dos con humedad superior y dos inferiores. Para materiales que pasan el tamiz N.º 4, se emplea el método A (5 capas con 25 golpes por capa), y para aquellos que pasan el tamiz de $\frac{3}{4}$ ", se aplica el método C (5 capas con 56 golpes por capa). Esta distribución garantiza una representación adecuada de la curva de compactación.

Procesamiento de datos

A partir de los resultados, se calcula la densidad seca de cada muestra y se construye la curva de densidad seca vs. contenido de humedad. El punto máximo de la curva indica la densidad seca máxima, y su correspondiente contenido de agua, la humedad óptima de compactación.

$$Densidad\ seca = \frac{Densidad\ Humeda}{1 + Humedad} \quad (21)$$

Con los datos obtenidos se procede a realizar la gráfica, unir los puntos correspondientes en una gráfica de humedad y densidad seca. Luego se halla la humedad óptima y la densidad máxima seca.

Figura 41 *Ensayo de Proctor Modificado con molde de 4" para suelo fino*



Nota. Se observa la compactación y enrasamiento con molde de 4" para la progresiva Km 03+060

Figura 42 *Ensayo de Proctor Modificado con molde de 6" para suelo de grano grueso*



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 43 *Enrasado del suelo en el molde de 6"*



Nota. Proctor Modificado con molde de 6" de la progresiva Km 04+040

Figura 44 Ensayo de Proctor Modificado con molde de 6" para suelo de grano grueso



Nota. Compactación y enrasamiento con molde de 6" de la progresiva Km 06+550

CBR en Suelos - Laboratorio (MTC 132)

El ensayo CBR (California Bearing Ratio), según la norma MTC E 132, tiene como finalidad evaluar la capacidad de soporte del suelo, expresada como un índice de resistencia relativa frente a una carga estándar.

Equipos requeridos

Molde cilíndrico de 15 cm de diámetro y 17.5 cm de altura, martillo de 4.5 kg, base rígida, espátula, cucharón, balanza, tamiz de $\frac{3}{4}$ ", cápsulas para humedad, diales de deformación y máquina de carga CBR.

Procedimiento

Se obtiene una muestra representativa, se tamiza a través del tamiz de $\frac{3}{4}$ " y se elimina el material retenido. La fracción faltante se compensa con suelo que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ " y queda retenido en el N.º 4. Se ajusta la humedad al valor óptimo y se compacta el material en el molde en 5 capas, aplicando 12, 26 o 56 golpes por capa, según el nivel de energía requerido.

Posteriormente, los moldes compactados se saturan por inmersión durante 96 horas, tras lo cual se mide la expansión volumétrica. Finalizada la saturación, se coloca el espécimen en la máquina CBR y se aplica una carga vertical a velocidad constante, registrando la fuerza aplicada y la deformación a intervalos de 0.25 mm cada 30 segundos.

Procesamiento de datos

El valor del CBR se calcula como el cociente entre la carga medida y la carga estándar: 1370 kg para una penetración de 2.5 mm y 2055 kg para 5.0 mm. Finalmente, se grafican los resultados obtenidos para comparar los valores de CBR correspondientes a la compactación al 100 % y 95 % del Proctor modificado.

Figura 45 Preparación y Compactación CBR



Nota. Preparación de material y compactación de muestras para progresiva Km 06+550

Figura 46 Preparado y compactado de muestras CBR



Nota. Preparación de moldes y compactación de CBR para progresiva Km 02+200 y Km 03+060

Figura 47 Enrasado e inmersión de moldes



Nota. Enrasamiento e inmersión de moldes para progresiva Km 02+200 y Km 03+060

Figura 48 Peso e Inmersión CBR



Nota. Toma de peso e inmersión de muestras para progresiva Km 06+550

Figura 49 Lectura y Penetración CBR



Nota. Lectura de muestras con dial de expansión y penetración de muestras para progresiva Km 06+550

Figura 50 Lectura y Penetración CBR

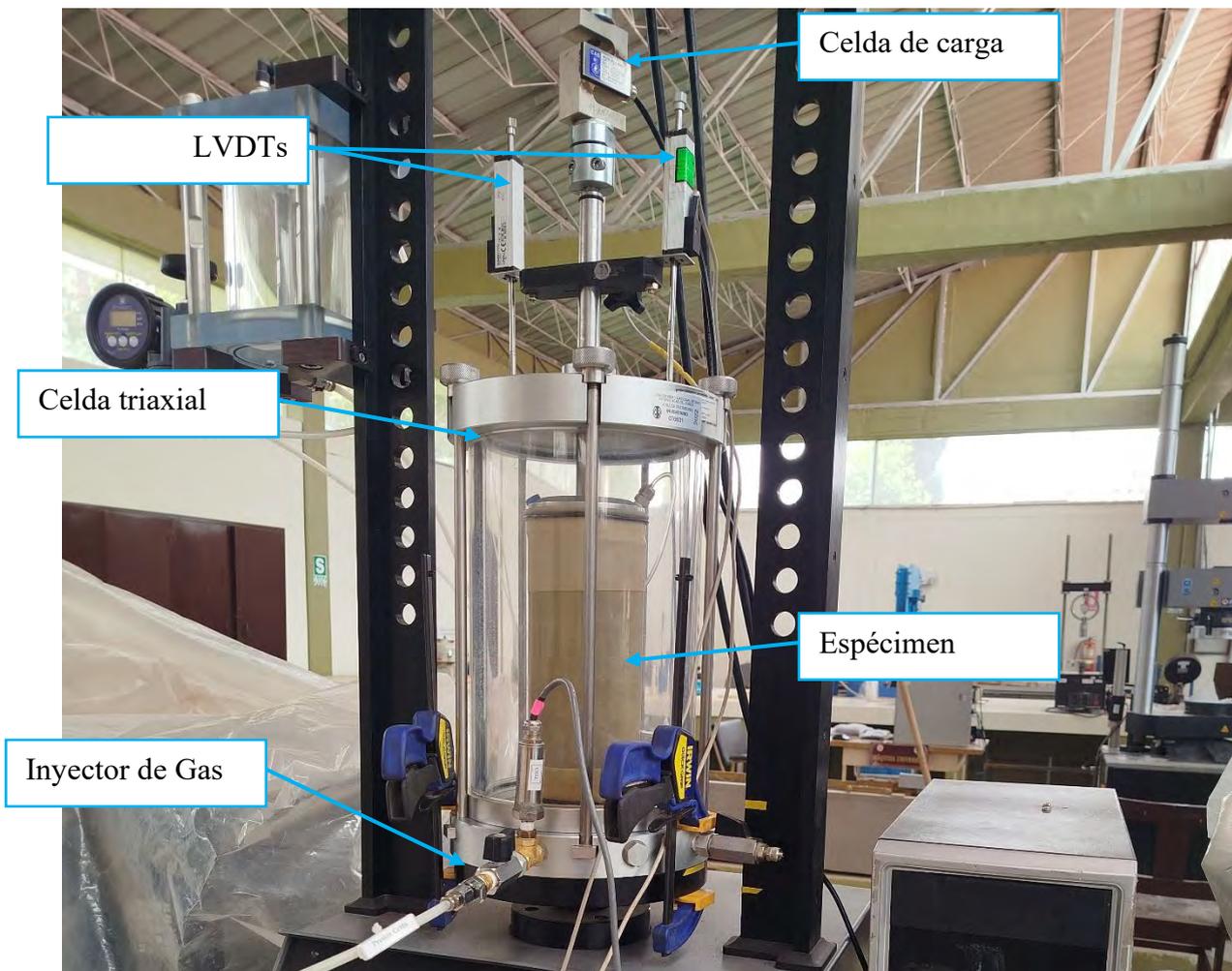


Nota. Lectura de moldes con dial de expansión y penetración de muestras para progresiva Km 02+200 y Km 03+060

4.12 Ensayo del módulo resiliente en laboratorio

El ensayo de módulo de resiliente, se realiza según la metodología descrita en el procedimiento de la norma AASHTO T 307-99 (2012). Se seleccionó los especímenes correspondientes de la zona de estudio. Las muestras fueron ensayadas en el laboratorio con el uso del marco de carga “LoadTrac II” a fin de conocer los valores de módulo de resiliencia. En la siguiente imagen se detalla las partes del equipo utilizado ubicado en el Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco:

Figura 51 Equipo Triaxial Cíclico



Nota. Montaje de una muestra en la celda triaxial. Fuente: Elaboración propia.

4.12.1 *Modulo Resiliente de suelos de subrasante (AASHTO T-307)*

El ensayo definido por la norma AASHTO T-307 permite determinar el módulo resiliente, considerado como una medida del comportamiento elástico dinámico de los suelos no tratados. Este procedimiento simula de manera representativa las condiciones físicas y estados de esfuerzos que experimenta la subrasante de un pavimento flexible bajo cargas vehiculares repetidas.

Equipos requeridos

Cámara triaxial de compresión: Contiene la muestra y el fluido de confinamiento durante el ensayo, permitiendo aplicar presiones laterales controladas.

Sistema de carga cíclica: Se emplea un equipo capaz de aplicar cargas repetitivas en ciclos constantes de carga y descarga.

Instrumentación para medición:

La celda de carga electrónica se ubica entre el pistón y el espécimen para cuantificar la carga axial aplicada. La presión en la celda triaxial se controla mediante manómetros o transductores de presión con adecuada sensibilidad.

Para registrar la deformación axial en suelos con módulos superiores a 40 000 kPa, se utilizan transformadores lineales diferenciales variables (LVDT), comúnmente dos por espécimen.

Preparación del ensayo

Los especímenes deben cumplir con una relación longitud-diámetro mínima de 2:1. El diámetro de la muestra no debe ser inferior a 71 mm, o en otro caso debe ser seis veces el tamaño de la partícula más grande. Se utilizan comúnmente muestras de 102 mm de diámetro y 203 mm de altura.

Muestras inalteradas: Se recortan conforme a las especificaciones de la norma AASHTO T-307-99 (2012).

Muestras compactadas en laboratorio: Se elaboran siguiendo el procedimiento del manual de ensayos de materiales, garantizando la estructura interna del suelo, especialmente en suelos cohesivos con alto contenido de arcilla, ya que su comportamiento resiliente depende del arreglo de partículas inducido por la compactación.

Compactación de muestras

La compactación se realiza utilizando moldes de 7 cm y 10 cm de diámetro. El suelo debe prepararse a su contenido óptimo de humedad, asegurando una densidad planteada.

Figura 52 Compactación de muestras Modulo Resiliencia



Nota. Compactación y elaboración de muestras de diámetro 100 mm para ensayo de Modulo Resiliente del subtramo 2.

Figura 53 Pesaje de las muestras compactadas de diámetros de 10 cm y 7 cm



Nota. Se busca llegar a la máxima densidad seca calculada previamente.

Figura 54 Muestras compactadas de diámetro de 10 cm



Nota. Muestras de diámetro 100 mm para ensayo de Modulo Resiliente del subtramo 2 correspondiente a las progresivas Km 04+000 - Km 07+500

Montaje de la muestra

Se coloca una piedra porosa y un papel filtro húmedos sobre la base del pedestal de la celda triaxial, y luego se ubica cuidadosamente la muestra. Utilizando un expansor de membrana con vacío, se ajusta la membrana sobre la muestra, asegurándola posteriormente con juntas tóricas en ambos extremos (inferior y superior). Finalmente, se coloca la placa superior con otra piedra porosa y filtro húmedo, sellando completamente el espécimen para iniciar el ensayo.

Figura 55 Materiales utilizados en el ensayo de módulo de resiliencia



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 56 Montaje de muestra de diámetro de 7cm



Nota. Muestras de diámetro 70 mm para ensayo de Modulo Resiliente del subtramo 1 correspondiente a las progresivas Km 0+000 - Km 04+000

La línea de drenaje inferior de la muestra se conecta a una fuente de vacío mediante una cámara intermedia, verificando cuidadosamente la ausencia de fugas debidas a conexiones defectuosas, perforaciones en la membrana o sellos inadecuados en la base. Un sellado hermético es fundamental para garantizar que la membrana permanezca adherida a la superficie del espécimen. En caso de filtraciones a través de la membrana, estas pueden mitigarse aplicando una capa de látex de caucho líquido o empleando una membrana adicional.

Una vez asegurada la estanqueidad del sistema, se interrumpe el vacío y se procede a montar la cámara triaxial sobre la placa base, colocando posteriormente la tapa superior. Se inserta el pistón de carga, asegurando su acoplamiento con la celda de carga, y se finaliza el ensamblaje ajustando firmemente las tuercas de la cámara.

Figura 57 Montaje de la muestra dentro de la celda triaxial



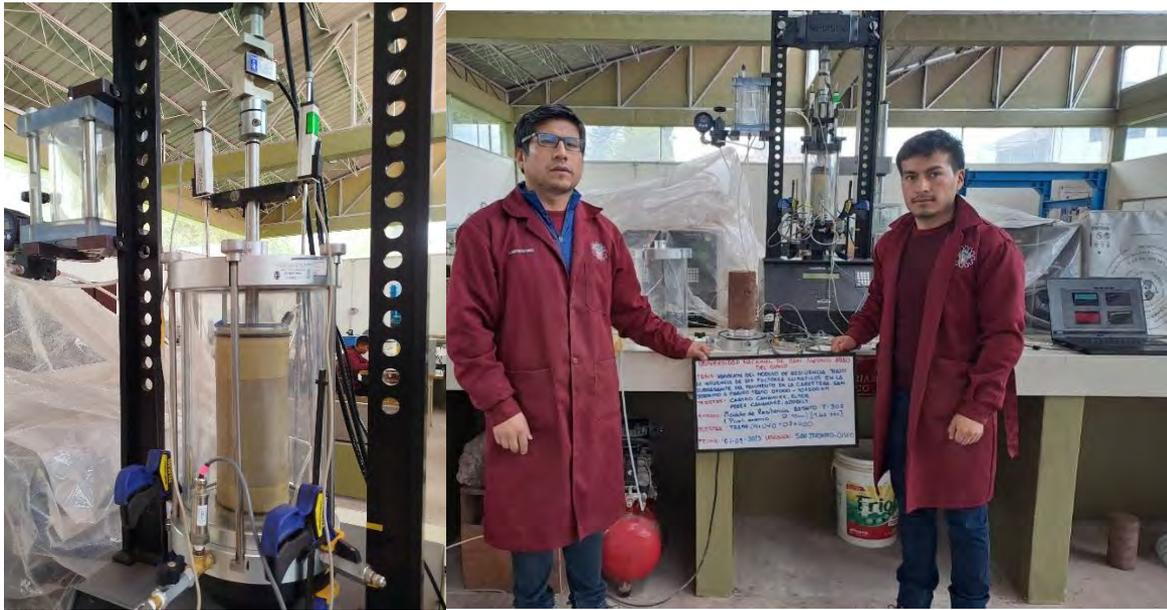
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Se desliza el aparato de montaje hasta su posición debajo del dispositivo de carga axial. El posicionamiento de la cámara es extremadamente crítico, ya que permite eliminar cualquier posible fuerza lateral sobre el vástago del pistón. A continuación, se acopla el dispositivo de carga al vástago del pistón de la cámara triaxial.

Para realizar la prueba del módulo de resiliencia, se deben seguir los siguientes pasos en una muestra de subrasante ya instalada en la cámara triaxial y ubicada bajo el marco de carga.

Se abren todas las válvulas de drenaje que conducen a la muestra, permitiendo que esta quede a presión atmosférica. Este procedimiento simula condiciones de drenaje. La simulación de condiciones sin drenaje requeriría la saturación de las muestras, procedimiento que no se contempla en este método. Si aún no está conectada, se conecta la línea de suministro de presión de aire a la cámara triaxial y se aplica a la muestra de prueba la presión de confinamiento de pre acondicionamiento especificada, equivalente a 41,4 kPa. Durante cada secuencia de carga, se mantiene un esfuerzo de contacto correspondiente al $10 \% \pm 0,7$ kPa de la tensión axial máxima aplicada.

Figura 58 Montaje finalizado de la muestra



Nota. Montaje de especímenes en cámara triaxial de 100 mm de diámetro para el subtramo 2 correspondiente a las progresivas Km 04+000 - Km 07+500

Figura 59 Inicialización de Ensayo Modulo Resiliente



Nota. Inicio de ensayo de Modulo de Resiliencia y obtención de datos para especímenes de 100 mm para la progresiva Km 04+000 - Km 07+500

Figura 60 Especímenes post ensayo



Nota. Se muestra los especímenes ensayados de 70 mm y 100 mm con diferentes contenidos de humedad.

4.12.2 Variación del contenido de humedad de los especímenes

Las muestras compactadas al 95% de su densidad seca máxima fueron sometidas a dos procesos una de disminución del contenido de humedad y una de incremento del contenido de humedad.

Secado de especímenes

Se empleó la metodología descrita en la Publicación Técnica No. 355 del Instituto Mexicano del Transporte (2012) para el secado de los especímenes. Este procedimiento establece que, con el fin de simular el secado que podría experimentar el material en condiciones de campo, algunas muestras se dejaron expuestas al aire durante un tiempo determinado, permitiendo así la reducción controlada de su contenido de humedad, hasta llegar al punto deseado. El control de los datos se efectuó en función de la variación del contenido de humedad, considerando que se dispone tanto del valor inicial de humedad como del peso de los especímenes.

Incremento de humedad en los especímenes

Para el incremento de humedad existen métodos, entre ellos uno de los más conocidos es el incremento por tensión capilar, en este caso se optó por el uso del equipo “Flowtrac II” el cual nos permite saturar las muestras.

Figura 61 Inyección de agua con el equipo Flowtrac II

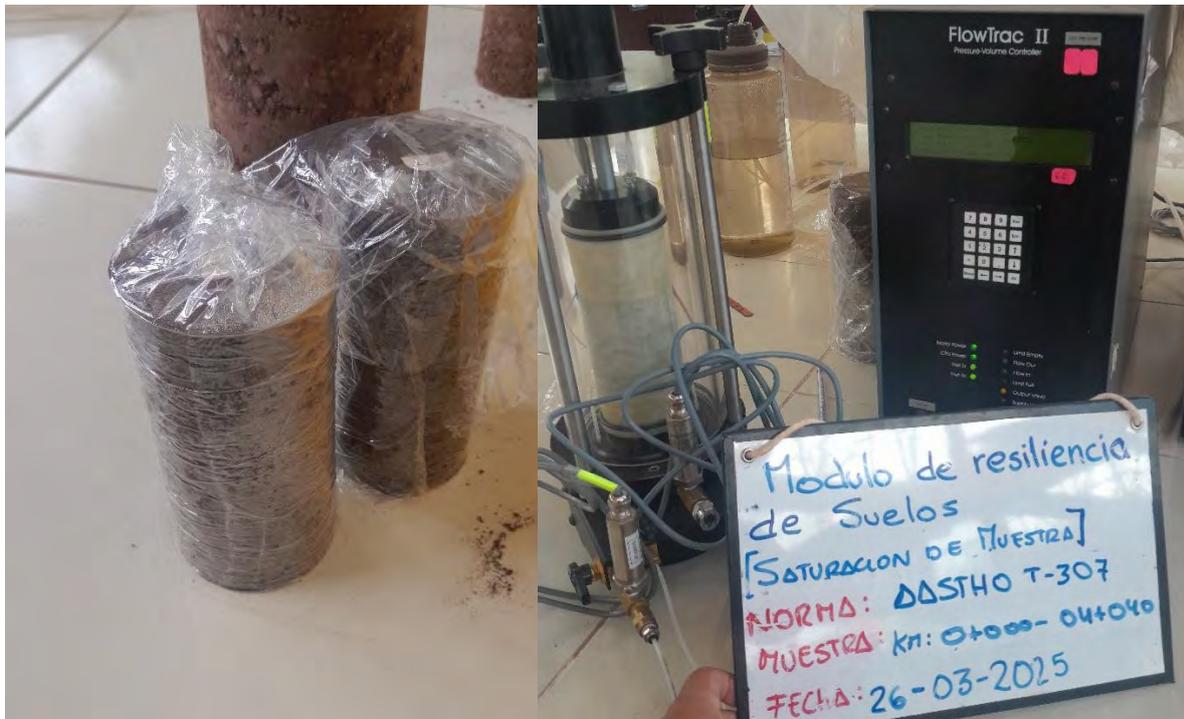


Nota. En la imagen se presenta el equipo *FlowTrac II* utilizado para los ensayos de laboratorio. Fuente: «Resilient Modulus Test System», s. f.

El sistema FlowTrac II es un equipo inteligente que, mediante una bomba de flujo con motor de micro pasos, regula con alta precisión la presión y el volumen en una celda de prueba. Utiliza un pistón hidráulico controlado por una CPU que procesa las lecturas de un transductor de presión para ajustar el flujo mediante válvulas solenoides, permitiendo operaciones de llenado, drenaje y control direccional. Es capaz de mantener presiones con una precisión de ± 0.35 kPa y medir cambios de volumen de hasta 0.001 cc.

En nuestras muestras, una vez registrado el volumen de agua desaireada ingresado al espécimen (en cc), se aplica una presión de confinamiento y de poros constante, con el fin de permitir su consolidación. Posteriormente, la muestra se pesa para determinar el incremento en su contenido de humedad. El control experimental se realiza considerando la variación del contenido de humedad respecto al valor inicial y al peso de los especímenes.

Figura 62 Muestras post compactadas para su posterior proceso de saturación



Nota. Muestras de diámetro 70 mm para ensayo de Modulo Resiliente del subtramo 1, para llegar a su saturación, se procedió a utilizar el equipo FlowTrac II, el cual nos permite incrementar el contenido de agua de las muestras. Fuente: Elaboración propia

Figura 63 Muestras de diámetro de 10 cm en el proceso de saturación



Nota. Muestras de diámetro 100 mm para ensayo de Modulo Resiliente del subtramo 2, para llegar a su saturación, se procedió a utilizar el equipo FlowTrac II, el cual nos permite incrementar el contenido de agua de las muestras. Fuente: Elaboración propia

Figura 64 Muestras con distintos del contenido de humedad



Nota: Para el ensayo de módulo resiliente correspondiente al subtramo 1, se utilizaron especímenes cilíndricos de 70 mm de diámetro, en la figura se muestra tres condiciones de humedad distintas: una muestra con humedad reducida al 2.8 %, otra compactada al contenido óptimo, y una tercera completamente saturada. Fuente: Elaboración propia.

4.12.3 Relaciones constitutivas

Los ensayos de medición de módulo de resiliencia son realizados en base a cargas cíclicas repetidas dentro de un rango de tensiones verticales y presión de confinamiento, de esta manera se calcular el comportamiento elástico no lineal de los suelos; en otras palabras, los ensayos de módulo de resiliencia no dan un valor puntual, sino que se aprecia el comportamiento en un rango de estados de tensión.

Existen distintas maneras relacionantes de representar los resultados, La guía de diseño AASHTO (1993) sugiere cuatro ecuaciones vistas en el marco legal. Para este estudio nos apoyaremos en la siguiente ecuación:

$$M_R = K_1 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{K_2} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{K_3} \quad (22)$$

Donde:

- M_R : Módulo resiliente
- K_1, K_2, K_3 : Constantes elásticas no lineales
- Pa : Presión atmosférica
- θ : Suma de esfuerzos principales
- σ_d : Esfuerzo desviador

Los valores de esfuerzo desviador (σ_d), así como presión de confinamiento (σ_{conf}) son conocidos por medio del ensayo, sin embargo, aún se necesitan calcular los siguientes valores:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_{conf} + \sigma_d \quad (23)$$

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{3} = \frac{\sigma_d \sqrt{2}}{3} \quad (24)$$

Donde:

- τ_{oct} : Esfuerzo de corte octaédrico
- σ_1, σ_2 y σ_3 : Esfuerzo principales
- σ_{conf} : Presión de confinamiento

Una vez realizado este proceso, se lleva a cabo un conjunto de iteraciones para calcular un valor particular del módulo de resiliencia, correspondiente a una carga definida. Este procedimiento se basa en el modelo de multicapa elástico, con el fin de determinar los esfuerzos en la parte superior de la subrasante.

4.12.4 Teoría multicapa elástica

La teoría multicapa elástica es un modelo matemático que se utiliza para analizar el comportamiento estructural de los pavimentos, especialmente los pavimentos flexibles compuestos por varias capas con diferentes propiedades mecánicas.

Presión aplicada en la superficie del pavimento

En la teoría elástica multicapa aplicada al diseño de pavimentos flexibles, la carga utilizada en el cálculo debe representar el esfuerzo inducido por la rueda de un vehículo,

generalmente correspondiente a un eje simple o doble, según el tipo y volumen de tránsito proyectado. De acuerdo con estudios del Instituto Mexicano del Transporte y análisis realizados en Costa Rica, se emplea como referencia una carga estándar de 80 kN (8,2 toneladas) por eje simple con doble llanta, valor que coincide con la carga legal máxima permitida en numerosos países.

En las investigaciones de Meza (2020) y Loría Salazar et al. (2017), se considera para el análisis la mitad de la carga de un eje simple con doble llanta, con el fin de representar la carga transmitida por cada rueda.

Tal como se mencionó en el marco teórico, la presión de contacto se asume equivalente a la presión de inflado del neumático. Según el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), esta presión varía entre 80 psi y 120 psi (550 kPa a 883 kPa). Considerando un valor intermedio dentro de este rango y siguiendo el criterio adoptado por Meza (2020), se selecciona una presión de contacto de 750 kPa para el presente análisis.

Características de las capas del pavimento flexible

Para el análisis del del pavimento la estructura utilizada, se dimensiona en base a los valores típicos de módulo de elasticidad de cada material.

Tabla 5 *Módulos elásticos (E) y relación de poisson (ν) típicos en materiales para pavimentación*

Parámetro	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de poisson (ν)
Concreto Asfáltico	1,500 - 4,500	0.15 - 0.30
Concreto Hidráulico	20,000 - 55,000	0.15 - 0.20
Base granular	100 - 350	0.30 - 0.40
Subbase granular	80 - 200	0.30 - 0.40
Suelo granular	50 - 150	0.30 - 0.50
Suelo fino	20 - 50	0.30 - 0.50

Nota. Fuente: Chávez, Echevarría e Iriondo (2018)

Para esta investigación se tomara los valores utilizados de módulo de elasticidad por Meza (2020) , así como los valores de relación de poisson por Loría Salazar et al. (2017) las cuales se encuentran dentro de los rangos de valores típicos de los materiales.

De acuerdo con el Manual de Carreteras del MTC Perú, para un pavimento flexible sobre una subrasante con un CBR comprendido entre 10 % y 20 %, se recomienda una sección estructural compuesta por: carpeta asfáltica de 10 cm, base granular de 25 cm y subbase granular de 17 cm. Sin embargo, considerando la investigación realizada por Meza, en la que se propone el uso de espesores múltiplos de 5 cm por su mayor practicidad constructiva, se ha ajustado el espesor de la subbase a 20 cm.

En la tabla siguiente se presentan las propiedades y espesores de cada capa del pavimento flexible, datos que servirán para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante.

Tabla 6 *Propiedades de las capas del pavimento*

Parámetro	Espesor (cm)	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de poisson (ν)
Carpeta asfáltica	10	2482	0.35
Base granular	25	207	0.40
Subbase granular	20	125	0.40
subrasante	Semi-infinita	MR	0.45

Nota. La tabla es el resumen de los valores tomados en base a las investigaciones de Meza (2020), Loría Salazar et al. (2017) y el MTC. Fuente: elaboración propia

4.13 Cálculo del Módulo por influencia climática

4.13.1 Cálculo del Índice de Thornthwaite

A finales de la década de los 40, Thornthwaite propuso un método para la clasificación climática, cuyo enfoque era el uso de evapotranspiración potencial junto con el balance hídrico, la precipitación, exceso y déficit de agua anual. El índice de Thornthwaite (TMI) valora cuan árido o húmedo es el sistema suelo-clima (Zapata et al., 2009a). Se calcula combinando el índice de aridez (I_a), índice de humedad (I_h):

$$I_h = \left(\frac{EXC}{ETP} \right) \times 100 \quad (25)$$

$$I_a = \left(\frac{DEF}{ETP} \right) \times 100 \quad (26)$$

$$TMI = I_h - 0.6 \times I_a \quad (27)$$

Donde:

EXC: Exceso de agua anual o escorrentía, en mm.

DEF: Déficit de agua anual, en mm
 ETP: Evapotranspiración potencial anual, en mm.

4.13.2 Cálculo de la Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial está directamente relacionada con las horas de sol por día, así como la temperatura media, para ello se hace el cálculo de la siguiente manera:

Índice de calor mensual

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad (28)$$

Donde:

i: Índice de calor mensual
 t: Temperatura media mensual (en °C)

Índice de calor anual

$$I = \sum_1^{12} i \quad (29)$$

Donde:

I: Índice de calor anual

ETP mensual sin corregir

$$ETP_{sin\ corregir} = 16 \left(\frac{10t}{I}\right)^a \quad (30)$$

Donde:

$TP_{sin\ corregir}$: ETP mensual para meses de 30 días y 12 horas de sol (en mm/mes)

t: Temperatura media mensual (en °C)

$$a = (675 \times 10^{-9})I^3 - (771 \times 10^{-7})I^2 + (1792 \times 10^{-5})I + 0.49239 \quad (31)$$

ETP mensual corregido para el número de días del mes y el número de horas de sol

$$ETP = ETP_{sin\ corregir} \frac{N}{12} \frac{d}{30} \quad (32)$$

Donde:

N: Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud (en horas)

d: Número de días al mes

Cálculo del exceso y déficit de la humedad

Comprender la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo es esencial, definida como su capacidad de almacenamiento de agua (A). Ya que representa el volumen de agua que puede retener en su estructura por efecto de la infiltración. Este comportamiento responde a un balance hídrico específico: cuando las precipitaciones superan la demanda evaporativa del ambiente (evapotranspiración potencial), el exceso de agua se incorpora a las reservas del suelo. En cambio, cuando la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación, se genera una extracción progresiva de dicha reserva.

Cabe resaltar que esta capacidad no es ilimitada. Una vez que el suelo alcanza su punto de saturación o capacidad de campo, cualquier aporte adicional de agua no es retenido, generando pérdidas por escorrentía superficial. La estimación cuantitativa de esta reserva se obtiene mediante fórmulas específicas, que permiten modelar su comportamiento dinámico en función de las condiciones climáticas y del tipo de suelo.

La cuantificación de esta reserva se determina mediante la aplicación de las siguientes expresiones matemáticas:

$$\text{Si } 0 < A_{i-1} + (P_i - ETP_i) < A_{\max}$$

$$A_i = A_{i-1} + (P_i - ETP_i) \quad (33)$$

$$\text{Si } A_{i-1} + (P_i - ETP_i) \geq A_{\max}$$

$$A_i = A_{\max} \quad (34)$$

$$\text{Si } A_{i-1} + (P_i - ETP_i) \leq 0$$

$$A_i = 0 \quad (35)$$

Donde:

i: Mes para el cual se está efectuando el cálculo

A_i : Almacenamiento o reserva del mes (en mm)

A_{i-1} : Almacenamiento o reserva del mes anterior (en mm)

P_i : Precipitación del mes (en mm/mes)

ETP_i : Evapotranspiración potencial mensual del mes, (en mm/mes)

A_{\max} : Reserva máxima del suelo (100 mm)

Con la información mencionada anteriormente se calcula el EXC_i (Exceso) y DEF_i (Déficit) en mm, de la siguiente forma:

Si $A_{i-1} + (P_i - ETP_i) > A_{max}$

$$EXC_i = A_{i-1} + (P_i - ETP_i) - A_{max} \quad (36)$$

De no cumplirse esta condición, se establece que $EXC_i = 0$

Si $A_{i-1} + (P_i - ETP_i) \leq 0$

$$DEF_i = A_{i-1} + P_i - ETP_i \quad (37)$$

De no cumplirse esta condición, se establece que $DEF_i = 0$

4.13.3 Cálculo de succión del suelo

Witczak et al. (2007) plantearon un modelo indirecto para calcular la succión matricial (h) que correlaciona el suelo subrasante y el índice de Thornthwaite (TMI), la ecuación es la siguiente:

$$h = \alpha \left[e^{\left[\frac{\beta}{TMI + \gamma} \right]} + \delta \right] \quad (38)$$

Donde:

h: Succión matricial (kPa)

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: Constante de regresión en función del P200 y wPI

TMI: Índice de Thornthwaite

Las variables del modelo dependen de las características de P200 y wPI

$$wPI = \frac{P200}{100} IP \quad (39)$$

Donde:

wPI: Índice de plasticidad ponderado

P200: Porcentaje del material que pasa la malla #200 (%)

IP: Índice de plasticidad

Los valores a usar para las constantes de regresión, se presentan los valores que se recomiendan utilizar en la siguiente tabla:

Tabla 7 Constantes de regresión de TMI-P200/wPI para subrasantes

P200 o wPI	α	β	γ	δ
P200 = 10	0.300	419.07	133.45	15.00
P200 = 50	0.300	521.50	137.30	16.00

wPI = 0.5 ó menos	0.300	521.50	137.30	16.00
wPI = 5	0.300	663.50	142.50	17.50
wPI = 10	0.300	801.00	147.60	25.00
wPI = 20	0.300	975.00	152.50	32.00
wPI = 50	0.300	1171.20	157.50	27.80

Nota. Fuente: Zapata et al. (2007)

4.13.4 Cálculo de la saturación

Para calcular el grado de saturación, se hace use de parámetros que correlacionan las características del suelo, las cuales pueden ser tomadas directamente o por medio de correlaciones (para la investigación se hace uso de mediciones directas).

$$\theta_{opt} = \frac{\omega_{opt} \times \rho_{d max}}{\rho_w} \quad (40)$$

$$S_{opt} = \frac{\theta_{opt}}{1 - \frac{\rho_{d max}}{\rho_w \times G_s}} \quad (41)$$

$$\theta_{sat} = \frac{\theta_{opt}}{S_{opt}} \quad (42)$$

Donde:

θ_{opt} : Contenido de humedad optimo volumétrico

ω_{opt} : Densidad del agua (1000 kg /m3).

$\rho_{d max}$: Contenido de humedad optimo

ρ_w : Peso unitario seco máximo (en kg/m3)

S_{opt} : Saturación optima

G_s : Gravedad específica

θ_{sat} : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas

Con el cálculo de la succión matricial y los parámetros del material compactado, se puede realizar una regresión no lineal de la curva característica de suelo SWCC haciendo uso de las ecuaciones propuestas por Fredlund y Xing en 1994.

Las ecuaciones correlacionan el contenido volumétrico del agua, para calcular el grado de saturación de la subrasante para cada mes:

$$\theta_w = C(h) \times \left[\frac{\theta_{sat}}{\left[\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}} \right] \quad (43)$$

Donde:

θ_w : Contenido de humedad volumétrico (%)

$C(h)$: Función de corrección

h : Succión matricial (kPa)

θ_{sat} : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas

h_r : Modelos paramétricos de SWCC, correspondiente a la succión por contenido de agua residual (kPa).

a_f : Parámetro de ajuste por entrada de aire en el suelo (kPa).

b_f : Parámetro de ajuste de SWCC.

c_f : Parámetro de ajuste por contenido de agua residual.

Según Fredlund y Xing (1994) la función de corrección $C(h)$, ajusta la curva para que la curva pase por una succión de 10^6 kPa cuando el contenido de agua es cero, lo cual es un comportamiento típico en todos los suelos.

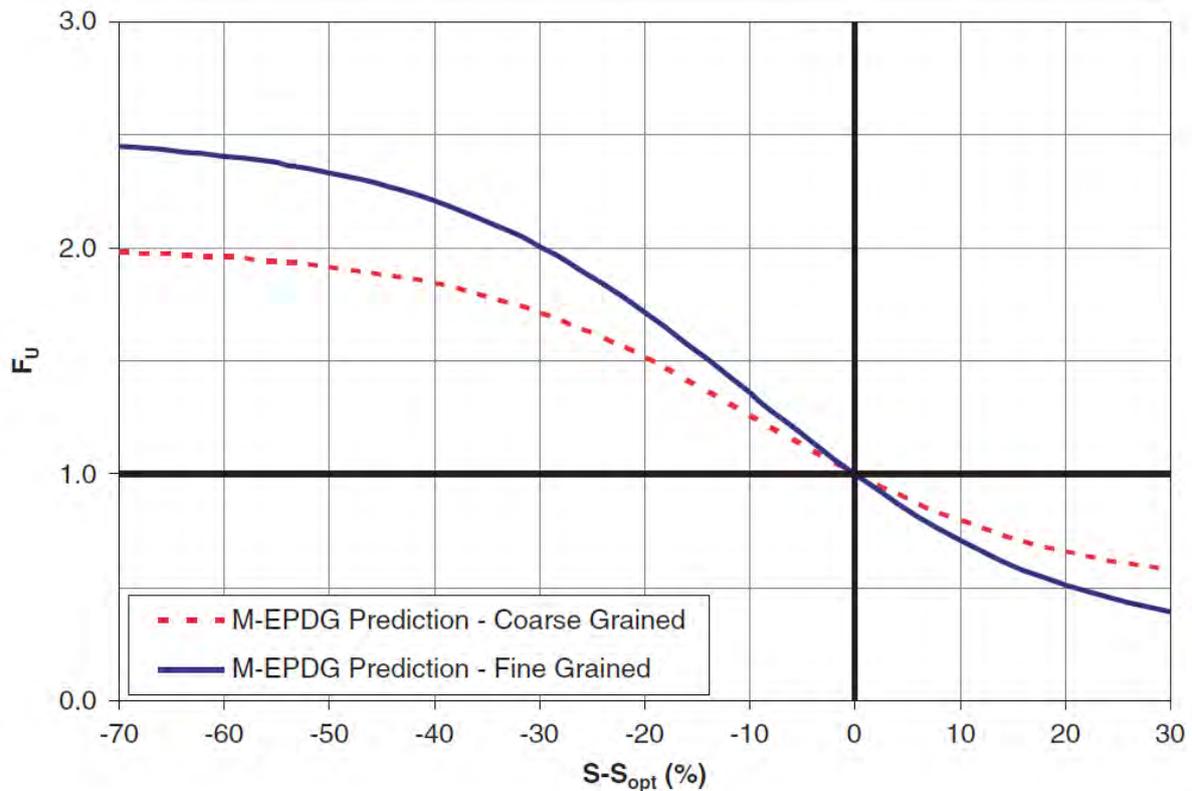
$$C(h) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \quad (44)$$

El cálculo del grado de saturación para cada mes se da a partir:

$$S = \frac{\theta_w}{\theta_{sat}} \quad (45)$$

4.13.5 Relación entre las mediciones directas y la estimación de los módulos resilientes

Figura 65 Modelo MEPDG actual para predicción de FU



Nota. El gráfico muestra como varía el factor ambiental respecto al grado de saturación del suelo. Fuente: Cary & Zapata (2010)

La Guía de Diseño de Pavimentos Mecánico-Empírico (MEPDG) incorpora los efectos del contenido de humedad en la subrasante a lo largo de la vida útil del pavimento mediante el uso del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM), el cual opera bajo un enfoque unidimensional. Este modelo permite reflejar directamente las variaciones de humedad en la estimación del módulo de resiliencia, a través de un factor ambiental (F_{env}) aplicable a materiales no congelados y no ligados. El modelo matemático correspondiente, utilizado para calcular el valor del factor FU dentro del EICM, fue desarrollado por Witczak et al. en la Universidad Estatal de Arizona.

$$F_{env} = \frac{M_r}{M_{r,opt}} = 10^{a + \frac{b-a}{1 + e^{\beta + K_s(S - S_{opt})}}} \quad (46)$$

Donde:

M_r : módulo resiliente en las condiciones deseadas, en kPa

$M_{r,opt}$: módulo resiliente con la humedad y densidad óptimas en laboratorio, en kPa

S : Grado de saturación a evaluar

S_{opt} : Grado de saturación con la humedad y densidad óptimas de laboratorio

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

a, b y k_s : Parámetros de regresión

Dado que no se dispone de datos provenientes de ensayos realizados en Colombia, se adoptan los valores reportados en la investigación desarrollada por Zapata (2012), los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8 *Valores de los parámetros para el modelo de ajuste del Módulo Resiliente por clima*

Parámetro	Materiales granulares finos	Materiales granulares gruesos
a	-0,3123	-0,5934
b	0,3	0,4
k_s	6,8157	6,1324

Nota. Fuente: Zapata (2012)

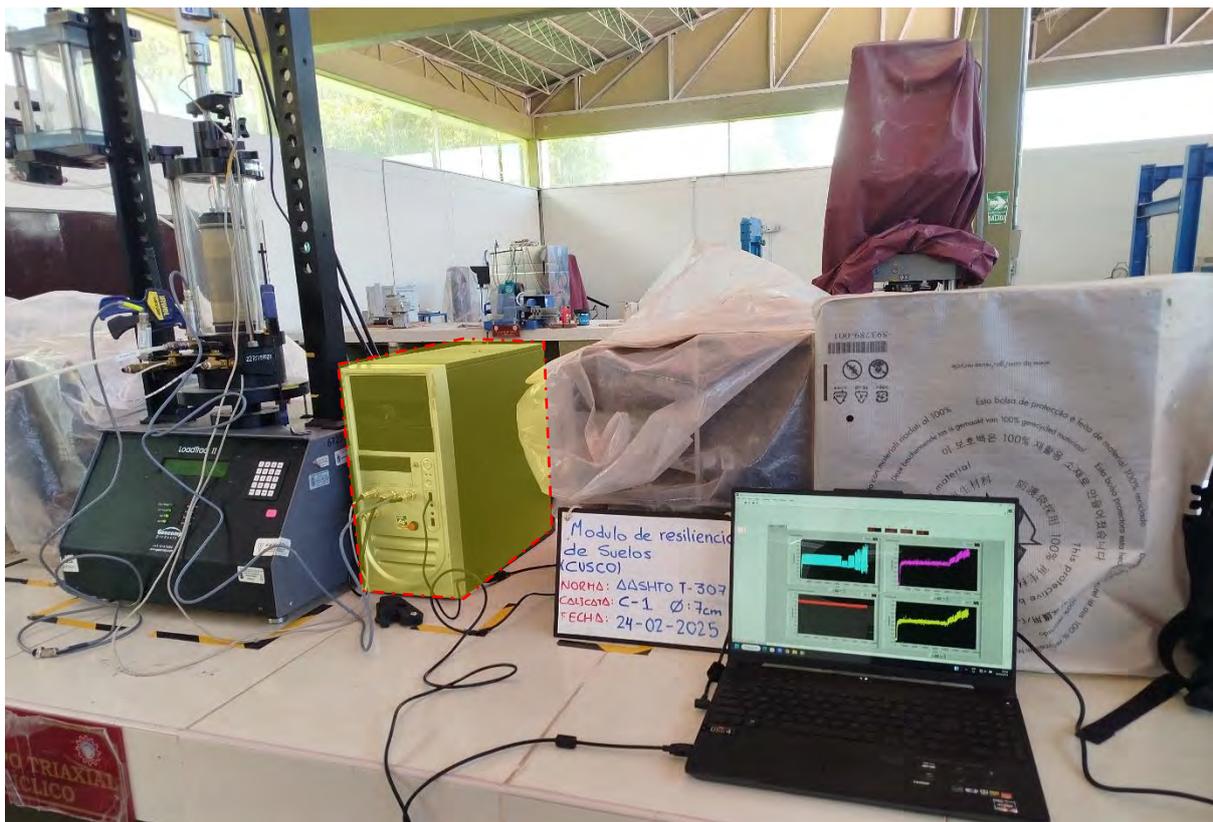
CAPITULO 5 : EQUIPO DE MEDICION DIRECTA MR

5.1 Descripción

Para llevar a cabo el ensayo del módulo de resiliencia, es indispensable disponer de un sistema triaxial que permita aplicar cargas de manera cíclica, además de contar con sensores precisos que registren las deformaciones generadas en el espécimen durante la prueba.

Con ese propósito, se implementó y configuró una unidad de control RM (receptor-emisor), que funciona como centro de procesamiento del sistema. Esta unidad es responsable de recibir las señales provenientes de los sensores de presión y deformación, y también de controlar el servomotor encargado de aplicar las cargas axiales al espécimen. La unidad RM emite las órdenes correspondientes al servomotor y recibe una retroalimentación constante, lo que permite asegurar la precisión del ensayo.

Figura 66 Equipo de medición directa del Módulo resiliente



Nota. En la imagen se muestra los componentes para realizar el ensayo de módulo de resiliencia. Fuente: Elaboración propia.

El control y monitoreo del proceso se efectúan mediante una computadora portátil, que opera con el ejecutable “**Main_Civil 19v**”, desarrollado en el entorno de programación del software LabVIEW. Este programa facilita la visualización en tiempo real de los parámetros

de carga y deformación, y permite almacenar automáticamente los datos obtenidos para su análisis posterior.

El ensayo fue realizado conforme a los lineamientos de la norma AASHTO T 307-99, la cual establece la aplicación de 16 secuencias de carga sobre el espécimen. Cada una de estas secuencias se lleva a cabo mediante una función de carga tipo Haversine, con una duración de 0.1 segundos para la carga y 0.9 segundos para el periodo de descanso. Toda la información registrada se archiva digitalmente para su posterior procesamiento, siguiendo los criterios técnicos definidos en dicha normativa.

5.2 Componentes del Hardware

5.2.1 Servomotor (LEMA)

Un servomotor es un actuador electromecánico de alta precisión que convierte señales eléctricas en movimiento mecánico controlado, permitiendo ejercer fuerzas o desplazamientos exactos. En los ensayos de módulo de resiliencia, el servomotor se emplea para aplicar cargas axiales repetitivas o dinámicas sobre las muestras de suelo de manera controlada, simulando las condiciones de carga cíclica que experimenta la subrasante en un pavimento durante el paso de vehículos. Su principal ventaja es la capacidad de mantener un control constante de la magnitud, frecuencia y forma de onda de la carga, garantizando la repetibilidad y confiabilidad de los resultados.

Figura 67 Servomotor (LEMA)



Nota. Fuente: Elaboración propia

5.2.2 *Celda triaxial*

Una celda triaxial es un dispositivo de laboratorio utilizado en geotecnia para ensayar muestras de suelo bajo condiciones controladas de presión y carga axial, simulando el estado de esfuerzos al que está sometido el suelo en el campo. En el caso del ensayo de módulo de resiliencia, la celda triaxial permite aplicar presión de confinamiento lateral mediante un fluido (generalmente agua o aire) y cargas axiales repetidas sobre el espécimen de suelo, replicando las condiciones que experimenta una subrasante bajo tránsito vehicular. Esta celda está diseñada para mantener la muestra encapsulada y saturada, y está equipada con sensores de presión y deformación que permiten registrar los cambios en el comportamiento mecánico del suelo ante cargas dinámicas.

Figura 68 *Celda triaxial para muestras de diámetro de 10cm y 7 cm*



Nota. Fuente: Elaboración propia

5.2.3 *Unidad de control, emisor y receptor RM*

Para el desarrollo del gestor de procesamiento se implementó una serie de equipos electrónicos, los cuales permitieron el control y monitoreo del ensayo.

Figura 69 Desarrollo de la unidad de control



Nota. En la imagen se muestra cómo se implementó la parte electrónica, antes de ensamblarse en su unidad. Fuente: Elaboración propia

Figura 70 Unidad de control RM



Nota. En la imagen se muestra cómo se implementó la parte electrónica, antes de ensamblarse en su unidad. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describirá los componentes del hardware de la unidad de control RM:

Acondicionadores de señales

Son dispositivos electrónicos utilizados para adaptar, filtrar y proteger señales eléctricas provenientes de sensores e instrumentos industriales. Su función principal es garantizar que estas señales sean compatibles y seguras para los sistemas de adquisición de datos o controladores lógicos programables (PLC). Entre sus funciones destacan la conversión de señales analógicas, la eliminación de interferencias eléctricas, la amplificación de señales

débiles y la aislación eléctrica entre dispositivos. En ensayos de módulo de resiliencia, estos acondicionadores permiten obtener mediciones estables y precisas desde sensores como LVDTs, celdas de carga y los sensores de presión.

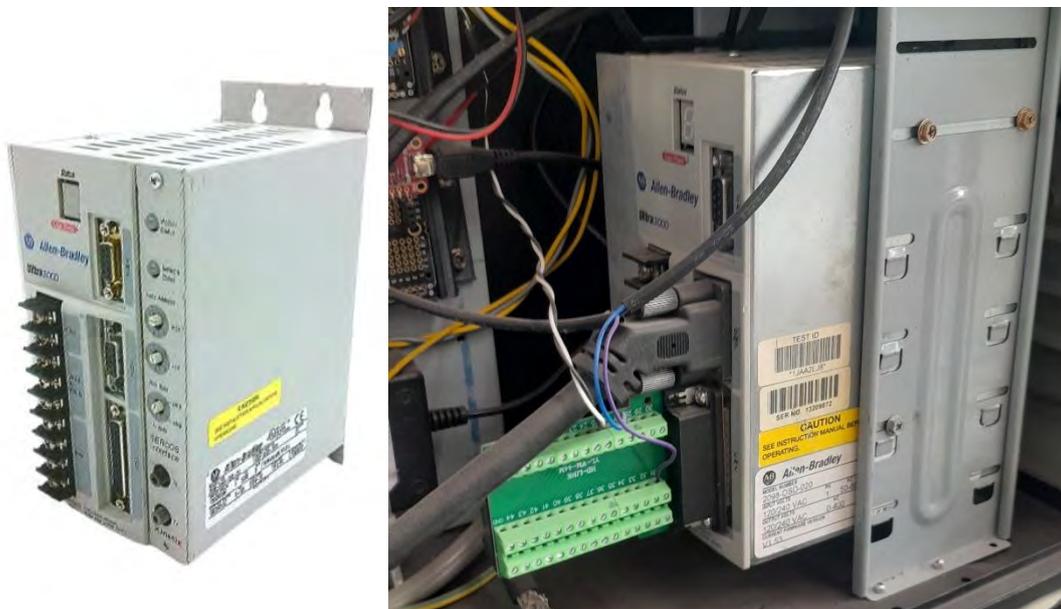
Figura 71 Acondicionadores de señales



Nota. Fuente: Elaboración propia

Driver del actuador cíclico

Figura 72 Servo drive Allen Bradley 2098-DSD-020



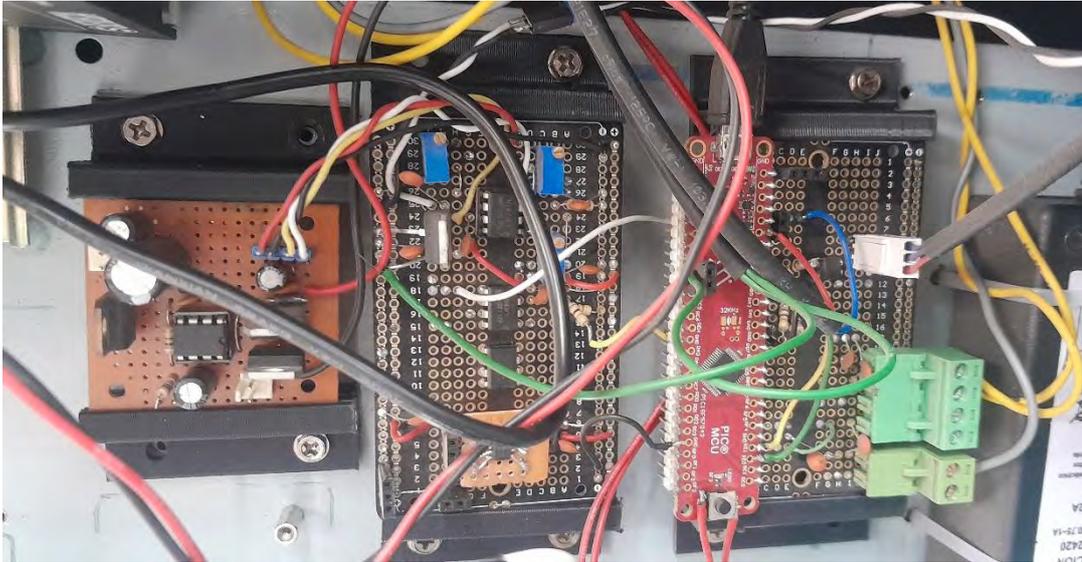
Nota. Fuente: Elaboración propia

El 2098-DSD-020 es un servo drive digital de la serie A 9101-1767 de Allen-Bradley, diseñado para controlar con alta precisión el movimiento de servomotores en aplicaciones industriales y de laboratorio. Su función principal es regular la posición, velocidad y torque del motor mediante señales de control digitales, lo que lo hace ideal para ensayos dinámicos como

la determinación del módulo de resiliencia en suelos. Este equipo permite aplicar cargas axiales cíclicas de manera precisa y controlada, garantizando la repetibilidad y confiabilidad de los resultados.

Tarjeta de control

Figura 73 Tarjeta de Control



Nota. Fuente: Elaboración propia

La tarjeta de control es un componente electrónico que coordina el funcionamiento de los sensores, actuadores y sistema de adquisición durante el ensayo de módulo de resiliencia. Permite aplicar cargas cíclicas precisas y registrar las respuestas del suelo en tiempo real, garantizando la confiabilidad del ensayo y el cumplimiento del procedimiento AASHTO T 307.

5.2.4 LVDTs

Los transductores de desplazamiento lineal variable son sensores de alta precisión que miden las deformaciones axiales del espécimen durante cada ciclo de carga. Permiten calcular la deformación recuperable necesaria para estimar el módulo de resiliencia.

Figura 74 Transformador diferencial de variación lineal



Nota. Fuente: Elaboración propia

5.2.5 Transductor de presión

Un transductor de presión es un sensor diseñado para transformar una magnitud física de presión ejercida por un fluido (líquido o gas) en una señal eléctrica proporcional, la cual puede ser interpretada por sistemas de adquisición de datos o controladores automatizados. En ensayos geotécnicos, como el triaxial de carga repetida, estos dispositivos permiten monitorear y mantener constante la presión de confinamiento aplicada a la muestra de suelo dentro de la celda triaxial, garantizando condiciones de ensayo precisas y reproducibles. Su uso es indispensable para registrar en tiempo real las condiciones de presión requeridas en el cálculo del módulo de resiliencia, particularmente en estudios de pavimentos con diseño mecanicista-empírico.

Figura 75 Transductores de presión Honeywell



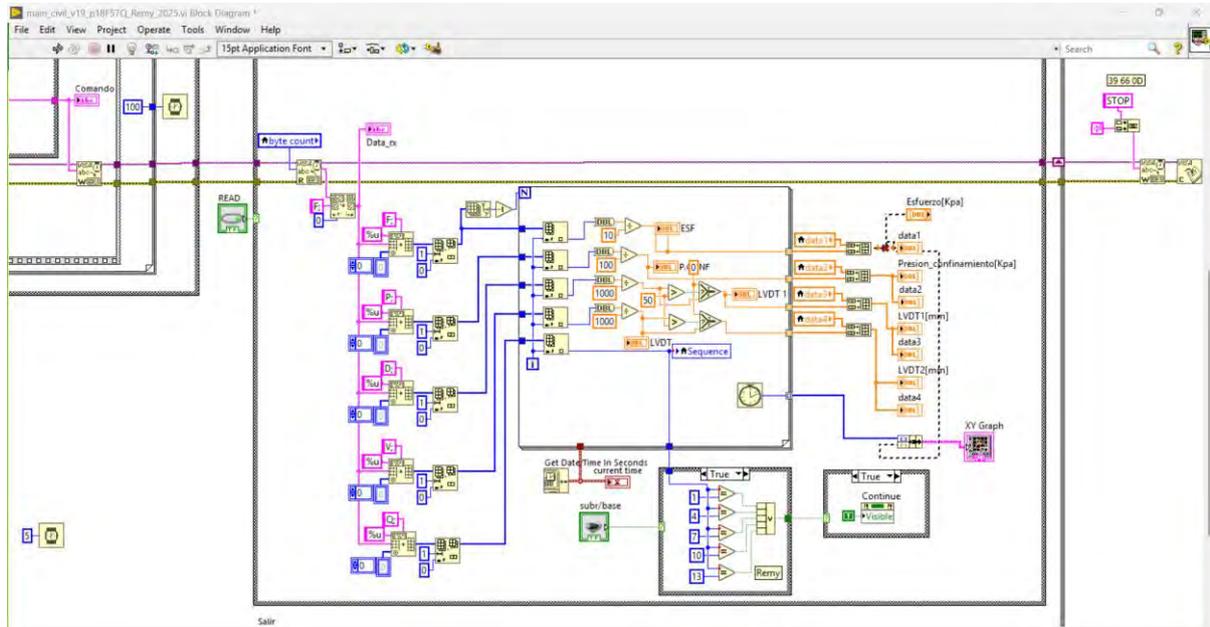
Nota. Fuente: Elaboración propia

5.3 Descripción del software

Para el desarrollo del ejecutable que controle la unidad de control RM, se hizo la implementación en el entorno de programación grafica *LabVIEW* (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).

Desarrollado por *National Instruments*, diseñado para controlar equipos, adquirir datos, procesarlos y presentarlos en tiempo real. En lugar de escribir código tradicional, el usuario crea "diagramas de bloques" usando íconos conectados por cables, lo que facilita la visualización del flujo de datos y la lógica del programa (Stamm, 2021).

Figura 76 Diagrama de programación del ejecutable "Main_Civil 19v"



Nota. Fuente: Elaboración propia

5.3.1 Main_Civil 19v

El ejecutable desarrollado en el entorno gráfico del software LabVIEW constituye la interfaz principal para el control y monitoreo del sistema automatizado de ensayo triaxial. Esta herramienta integra el manejo del actuador electromecánico (servomotor LEMA) y la visualización en tiempo real de las señales provenientes de los sensores de presión, fuerza (celda de carga) y desplazamiento (LVDTs).

En la primera pestaña del ejecutable, el usuario tiene la posibilidad de seleccionar el tipo de ensayo a realizar, ya sea para subrasante o para base/subbase, siguiendo los rangos de carga establecidos en la norma AASHTO T 307-99. En esta misma sección, se configuran parámetros clave como:

- La posición inicial del actuador.
- El diámetro de la muestra.
- El número de ciclos de acondicionamiento.
- Y finalmente, se habilita la ejecución del ensayo mediante la opción RUN.

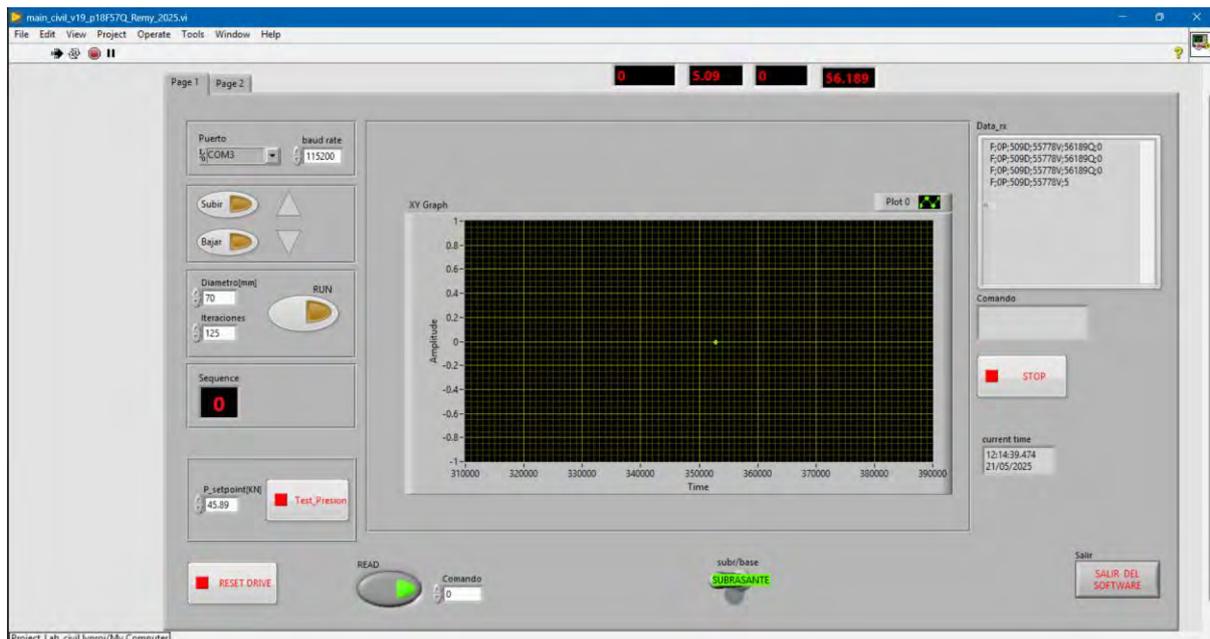
Durante el proceso, se puede monitorear el desarrollo del ensayo en tiempo real a través del panel Data_rx, que presenta los valores medidos y las opciones para la pausa o finalización del ciclo de prueba.

En la segunda pestaña, el ejecutable despliega de manera gráfica la información registrada por los distintos sensores del sistema, incluyendo:

- Presión de confinamiento.
- Carga axial.
- Deformaciones axiales.

Estas gráficas son exportables en formato digital, como también en formato de texto lo que permite su posterior procesamiento y análisis para la obtención del módulo de resiliencia y otras propiedades mecánicas relevantes del suelo ensayado. Este procesamiento se realizó con el apoyo de un lenguaje de programación como es el caso de Python en donde se procesa la información.

Figura 77 Pagina 1 del ejecutable Main Civil_v19



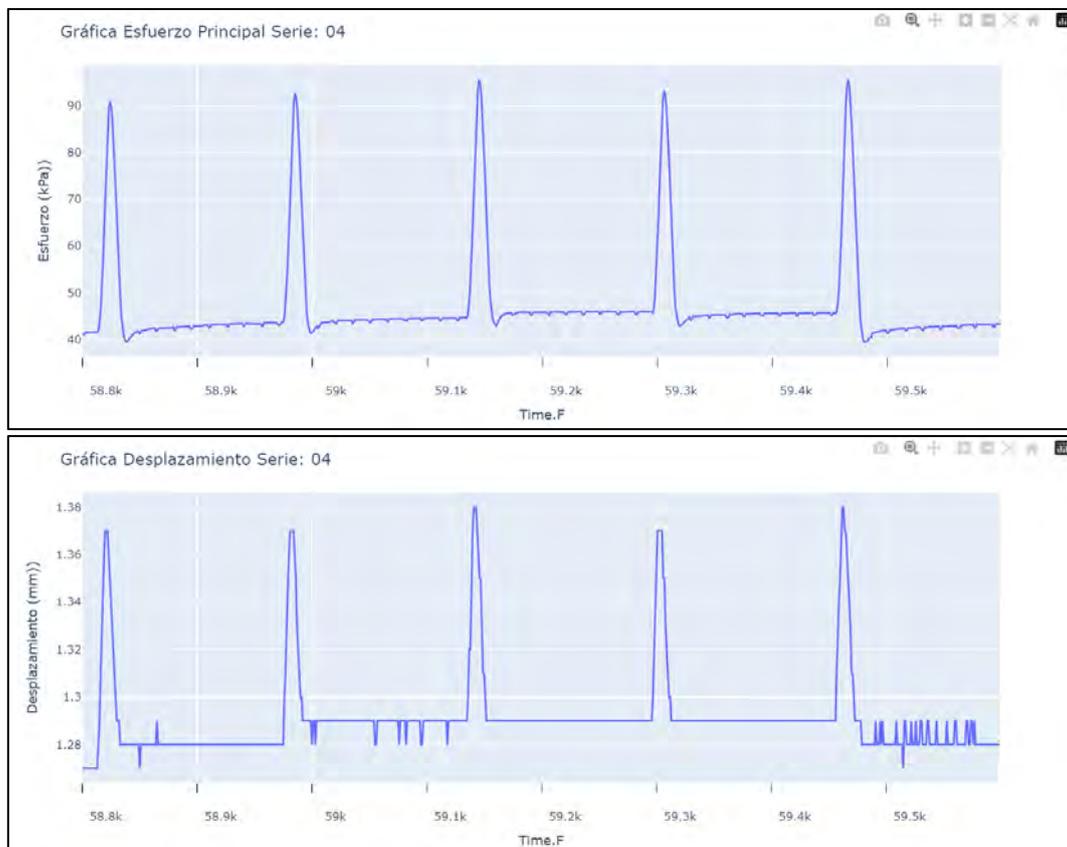
Nota. En la imagen se muestra la página 1 donde podemos introducir los datos necesarios para iniciar el ensayo, así como finalizarlo. Fuente: Elaboración propia

Figura 78 Pagina 2 del ejecutable Main Civil_v19



Nota. En la imagen se muestra la página 2 del ejecutable, donde se visualizan en tiempo real los datos adquiridos por los sensores. Esta interfaz permite al usuario monitorear continuamente, así como exportar los valores registrados. Fuente: Elaboración propia

Figura 79 Análisis de los resultados exportados en Python



Nota. Para el procesamiento de la información se puede hacer el uso de la biblioteca plotly del lenguaje de programación python. Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 6 : RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

6.1 Análisis granulométrico

6.1.1 Subtramo: km 0+000 – 04+000

En las exploraciones, en el primer subtramo presenta las siguientes cantidades de material usas para el ensayo:

Tabla 9 Lavado de material para la granulometría

Calicata	Peso antes del lavado (gr)	Peso después del lavado (gr)	Pérdida de material (gr)
km 01+500	2117.89	569.50	1548.39
km 02+200	1827.62	663.06	1164.56
km 03+060	2025.06	501.00	1524.06

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 10 Granulometría de la calicata del kilómetro 01+500

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	9.525	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
#4	4.760	11.49	0.54%	0.54%	99.46%
#10	2.000	4.56	0.22%	0.76%	99.24%
#20	0.840	6.49	0.31%	1.06%	98.94%
#40	0.420	21.80	1.03%	2.09%	97.91%
#60	0.250	155.99	7.37%	9.46%	90.54%
#100	0.149	86.54	4.09%	13.55%	86.45%
#200	0.074	266.14	12.57%	26.11%	73.89%
Base		16.49	0.78%	26.89%	73.11%
Total		569.50	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Granulometría de la calicata del kilómetro 02+200

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	9.525	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
#4	4.760	43.27	2.37%	2.37%	97.63%
#10	2.000	39.26	2.15%	4.52%	95.48%
#20	0.840	32.88	1.80%	6.31%	93.69%
#40	0.420	37.19	2.03%	8.35%	91.65%
#60	0.250	121.74	6.66%	15.01%	84.99%
#100	0.149	267.40	14.63%	29.64%	70.36%
#200	0.074	115.48	6.32%	35.96%	64.04%
Base		5.84	0.32%	36.28%	63.72%
Total		663.06	100.00%		

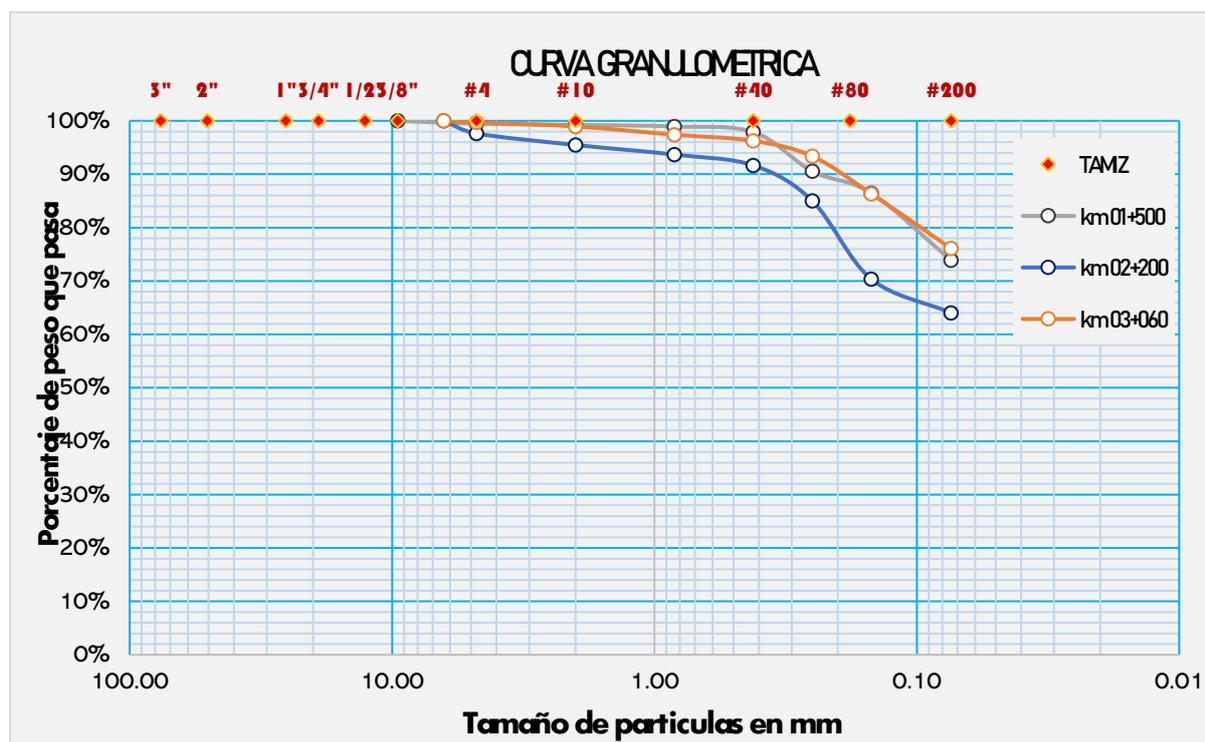
Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 Granulometría de la calicata del kilómetro 03+060

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	9.525	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
#4	4.760	5.79	0.29%	0.29%	99.71%
#10	2.000	15.34	0.76%	1.04%	98.96%
#20	0.840	31.45	1.55%	2.60%	97.40%
#40	0.420	23.18	1.14%	3.74%	96.26%
#60	0.250	58.78	2.90%	6.64%	93.36%
#100	0.149	141.97	7.01%	13.65%	86.35%
#200	0.074	207.69	10.26%	23.91%	76.09%
Base		16.79	0.83%	24.74%	75.26%
Total		501.00	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

Grafica 1 Curva Granulométrica del primer subtramo



Nota. Se utilizó la serie de tamices indicados en la norma y según las tablas. Fuente: Elaboración propia

De las tablas anteriores y sus curvas granulométricas halladas para la clasificación del suelo, se verifica que el porcentaje que pasa la malla #200 > 50% por lo que no se calcula el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de correlación (Cc)

6.1.2 Subtramo: km 04+000 – 07+500

En las exploraciones, en el segundo subtramo presenta las siguientes cantidades de material usadas para el ensayo:

Tabla 13 Lavado de material para la granulometría

Calicata	Peso antes del lavado (gr)	Peso después del lavado (gr)	Perdida de material (gr)
km 04+040	3953.93	2894.28	1059.65
km 05+360	3931.78	3086.45	845.33
km 06+550	4285.25	3106.38	1178.87
km 07+400	4043.50	2928.71	1114.79

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14 Granulometría de la calicata de kilómetro 04+040

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.400	160.13	4.05%	4.05%	95.95%
3/4"	19.050	357.32	9.04%	13.09%	86.91%
1/2"	12.700	268.79	6.80%	19.88%	80.12%
3/8"	9.525	177.94	4.50%	24.39%	75.61%
#4	4.760	384.30	9.72%	34.10%	65.90%
#10	2.000	311.01	7.87%	41.97%	58.03%
#20	0.840	193.06	4.88%	46.85%	53.15%
#40	0.420	170.31	4.31%	51.16%	48.84%
#60	0.250	250.76	6.34%	57.50%	42.50%
#100	0.149	246.77	6.24%	63.74%	36.26%
#200	0.074	353.80	8.95%	72.69%	27.31%
BASE		20.10	0.51%	73.20%	26.80%
TOTAL		2894.28	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior y la curva granulométrica hallada para la clasificación del suelo, se verifica que el porcentaje que pasa la malla #200 < 50%, malla #4 < 50% y malla #200 > 12% por lo que no se calcula el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de correlación (Cc)

Tabla 15 Granulometría de la calicata de kilómetro 05+360

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.400	237.68	6.04%	6.04%	93.96%
3/4"	19.050	157.46	4.00%	10.05%	89.95%
3/8"	9.525	530.14	13.48%	23.53%	76.47%
#4	4.760	492.54	12.53%	36.06%	63.94%
#10	2.000	439.39	11.18%	47.24%	52.76%
#20	0.840	236.35	6.01%	53.25%	46.75%

#40	0.420	163.10	4.15%	57.40%	42.60%
#60	0.250	214.51	5.46%	62.85%	37.15%
#100	0.149	345.16	8.78%	71.63%	28.37%
#200	0.074	232.04	5.90%	77.53%	22.47%
Base		38.08	0.97%	78.50%	21.50%
Total		3086.45	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior y la curva granulométrica hallada para la clasificación del suelo, se verifica que el porcentaje que pasa la malla #200 < 50%, malla #4 > 50% y malla #200 > 12% por lo que no se calcula el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de correlación (Cc)

Tabla 16 *Granulometría de la calicata de kilómetro 06+550*

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.400	119.73	2.79%	2.79%	97.21%
3/4"	19.050	249.82	5.83%	8.62%	91.38%
1/2"	12.700	293.72	6.85%	15.48%	84.52%
3/8"	9.525	192.09	4.48%	19.96%	80.04%
#4	4.760	377.01	8.80%	28.76%	71.24%
#10	2.000	363.86	8.49%	37.25%	62.75%
#20	0.840	218.15	5.09%	42.34%	57.66%
#40	0.420	289.55	6.76%	49.10%	50.90%
#60	0.250	476.16	11.11%	60.21%	39.79%
#100	0.149	231.12	5.39%	65.60%	34.40%
#200	0.074	266.79	6.23%	71.83%	28.17%
BASE		28.38	0.66%	72.49%	27.51%
TOTAL		3106.38	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior y la curva granulométrica hallada para la clasificación del suelo, se verifica que el porcentaje que pasa la malla #200 < 50%, malla #4 > 50% y malla #200 > 12% por lo que no se calcula el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de correlación (Cc)

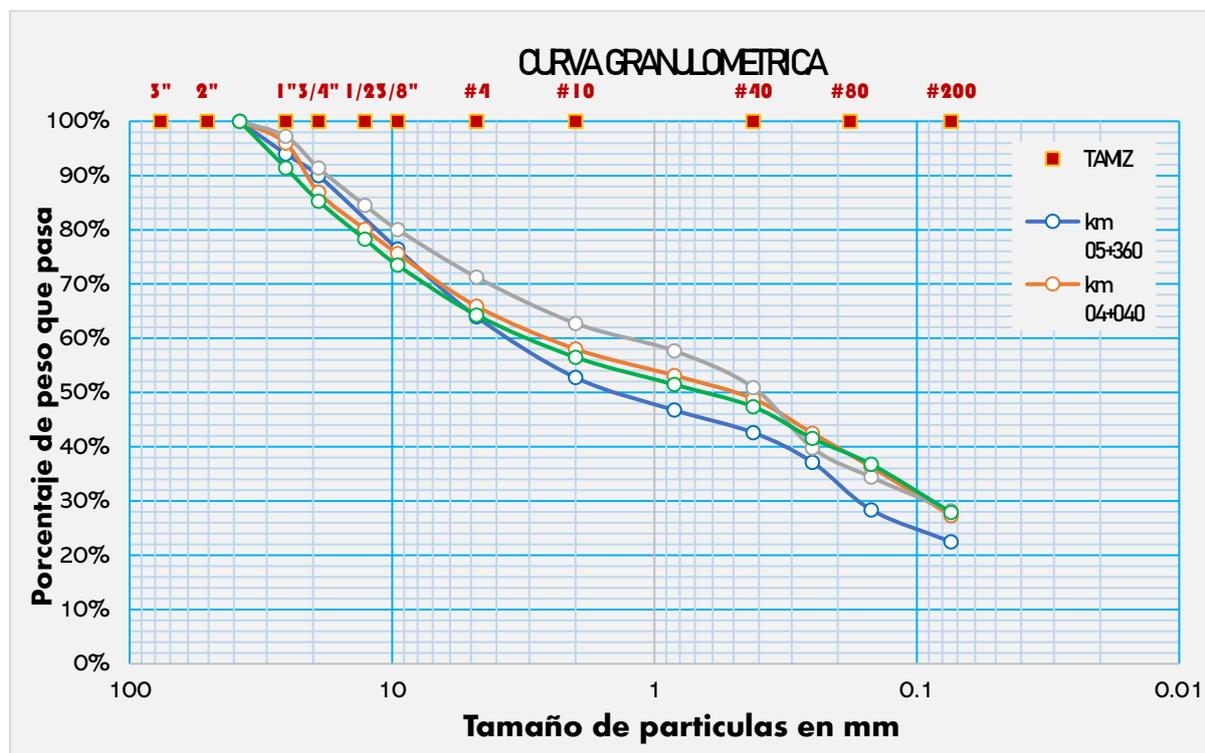
Tabla 17 Granulometría de la calicata de kilómetro 07+400

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.400	347.24	8.59%	8.59%	91.41%
3/4"	19.050	248.12	6.14%	14.72%	85.28%
1/2"	12.700	283.65	7.01%	21.74%	78.26%
3/8"	9.525	193.46	4.78%	26.52%	73.48%
#4	4.760	371.89	9.20%	35.72%	64.28%
#10	2.000	314.45	7.78%	43.50%	56.50%
#20	0.840	203.47	5.03%	48.53%	51.47%
#40	0.420	165.93	4.10%	52.63%	47.37%
#60	0.250	235.99	5.84%	58.47%	41.53%
#100	0.149	193.11	4.78%	63.24%	36.76%
#200	0.074	357.90	8.85%	72.10%	27.90%
BASE		13.51	0.33%	72.43%	27.57%
TOTAL		2928.71	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior y la curva granulométrica hallada para la clasificación del suelo, se verifica que el porcentaje que pasa la malla #200 < 50%, malla #4 > 50% y malla #200 > 12% por lo que no se calcula el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de correlación (Cc)

Grafica 2 Curva granulométrica del segundo subtramo



Nota. Se utilizó la serie de tamices indicados en la norma y según las tablas. Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Subtramo: km 07+500 – 10+500

En las exploraciones, en el tercer subtramo presenta las siguientes cantidades de material usas para el ensayo:

Tabla 18 Lavado de material para la granulometría

Calicata	Peso antes del lavado (gr)	Peso después del lavado (gr)	Perdida de material (gr)
km 08+300	2991.66	2602.74	388.92
km 09+630	4148.21	3373.74	774.47
km 10+500	3492.43	3000.00	492.43

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19 Granulometría de la calicata del kilómetro 08+300

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.400	376.07	12.57%	12.57%	87.43%
3/4"	19.050	346.06	11.57%	24.14%	75.86%
1/2"	12.700	395.76	13.23%	37.37%	62.63%
3/8"	9.525	408.98	13.67%	51.04%	48.96%
#4	4.760	507.60	16.97%	68.00%	32.00%
#10	2.000	79.69	2.66%	70.67%	29.33%
#20	0.840	69.08	2.31%	72.98%	27.02%
#40	0.420	86.80	2.90%	75.88%	24.12%
#60	0.250	96.55	3.23%	79.11%	20.89%
#100	0.149	104.49	3.49%	82.60%	17.40%
#200	0.074	112.70	3.77%	86.37%	13.63%
BASE		18.96	0.63%	87.00%	13.00%
TOTAL		2602.74	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior y la curva granulométrica hallada para la clasificación del suelo, se verifica que el porcentaje que pasa la malla #200 < 50%, malla #4 < 50% y malla #200 > 12% por lo que no se calcula el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de correlación (C_c)

Tabla 20 Granulometría de la calicata del kilómetro 09+630

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	100.00%	100.00%
1"	25.400	248.50	5.99%	94.01%	94.01%
3/4"	19.050	321.64	7.75%	86.26%	86.26%
3/8"	9.525	797.27	19.22%	67.04%	67.04%
#4	4.760	793.65	19.13%	47.90%	47.90%
#10	2.000	389.83	9.40%	38.51%	38.51%
#20	0.840	217.64	5.25%	33.26%	33.26%

#40	0.420	172.82	4.17%	29.09%	29.09%
#60	0.250	104.84	2.53%	26.57%	26.57%
#100	0.149	146.71	3.54%	23.03%	23.03%
#200	0.074	156.08	3.76%	19.27%	19.27%
BASE		24.76	0.60%	81.33%	18.67%
TOTAL		3373.74	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior y la curva granulométrica hallada para la clasificación del suelo, se verifica que el porcentaje que pasa la malla #200 < 50%, malla #4 < 50% y malla #200 > 12% por lo que no se calcula el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de correlación (C_c)

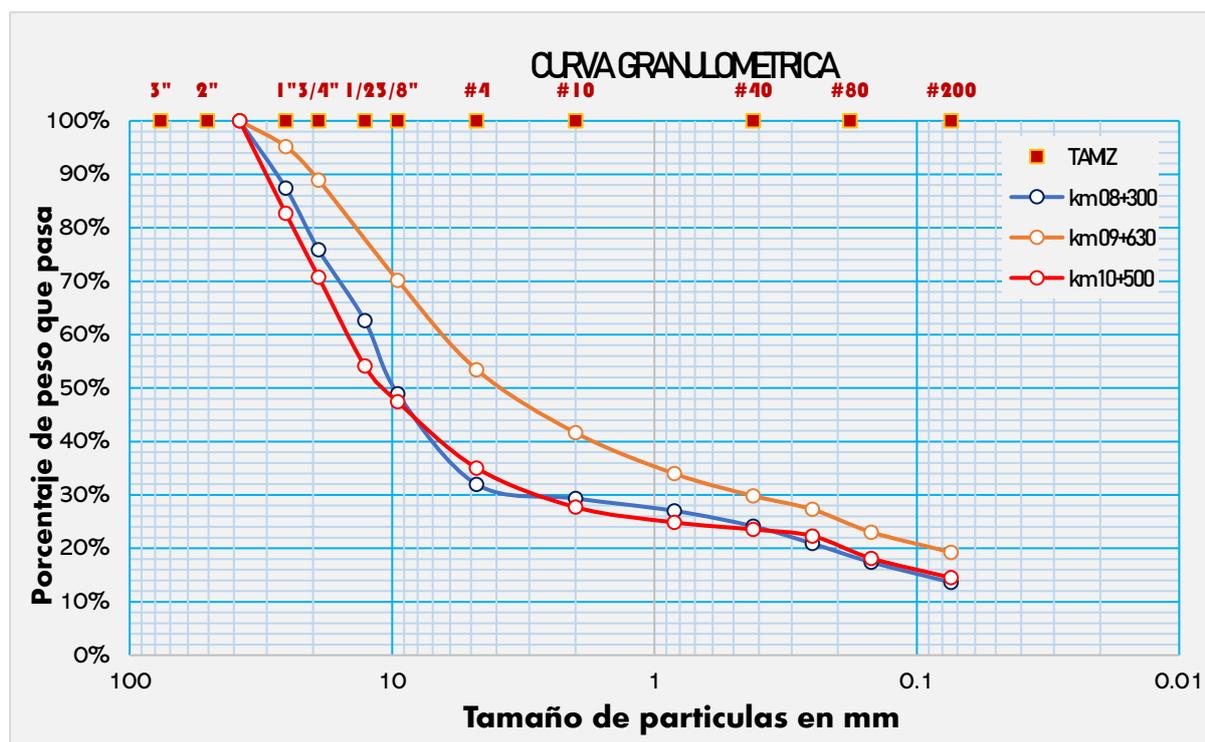
Tabla 21 *Granulometría de la calicata del kilómetro 10+500*

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.400	604.82	17.32%	17.32%	82.68%
3/4"	19.050	415.78	11.91%	29.22%	70.78%
1/2"	12.700	581.72	16.66%	45.88%	54.12%
3/8"	9.525	233.23	6.68%	52.56%	47.44%
#4	4.760	433.67	12.42%	64.98%	35.02%
#10	2.000	255.50	7.32%	72.29%	27.71%
#20	0.840	99.61	2.85%	75.14%	24.86%
#40	0.420	46.37	1.33%	76.47%	23.53%
#60	0.250	42.48	1.22%	77.69%	22.31%
#100	0.149	145.93	4.18%	81.87%	18.13%
#200	0.074	126.73	3.63%	85.49%	14.51%
Base		14.17	0.41%	85.90%	14.10%
Total		3000.00	100.00%		

Nota. Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la calicata. Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior y la curva granulométrica hallada para la clasificación del suelo, se verifica que el porcentaje que pasa la malla #200 < 50%, malla #4 < 50% y malla #200 > 12% por lo que no se calcula el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de correlación (C_c)

Grafica 3 Curva granulométrica del tercer subtramo



6.1.4 Resultados consolidados

Tabla 22 Lavado de material para la granulometría

Calicata	Peso antes del lavado (gr)	Peso después del lavado (gr)	Perdida de material (gr)
km 01+500	2117.89	569.50	1548.39
km 02+200	1827.62	663.06	1164.56
km 03+060	2025.06	501.00	1524.06
km 04+040	3953.93	2894.28	1059.65
km 05+360	3931.78	3086.45	845.33
km 06+550	4285.25	3106.38	1178.87
km 07+400	4043.50	2928.71	1114.79
km 08+300	2991.66	2602.74	388.92
km 09+630	4148.21	3373.74	774.47
km 10+500	3492.43	3000.00	492.43

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23 Análisis granulométrico por tamizado de todas las calicatas

CALICATA	PORCENTAJE (%) QUE PASA EL TAMIZ N° 4	PORCENTAJE (%) QUE PASA EL TAMIZ N° 200	CLASIFICACION POR METODO SUCS
km 01+500	99.46%	73.89%	CL
km 02+200	97.63%	64.04%	CL
km 03+060	99.71%	76.09%	CL
km 04+040	65.90%	27.31%	SC-SM
km 05+360	63.94%	22.47%	SC-SM
km 06+550	71.24%	28.17%	SC-SM
km 07+400	64.28%	27.90%	SC-SM
km 08+300	32.00%	13.63%	GM
km 09+630	47.90%	19.27%	GM
km 10+500	35.02%	14.51%	GM

Nota. Fuente: Elaboración propia

6.2 Límites de consistencia

6.2.1 Limite liquido

El ensayo de Limite liquido se realizó según normativa, tomando muestras y analizando el contenido de humedad de cada una, después se realiza una recta de regresión logarítmica, se detalla en las siguientes tablas.

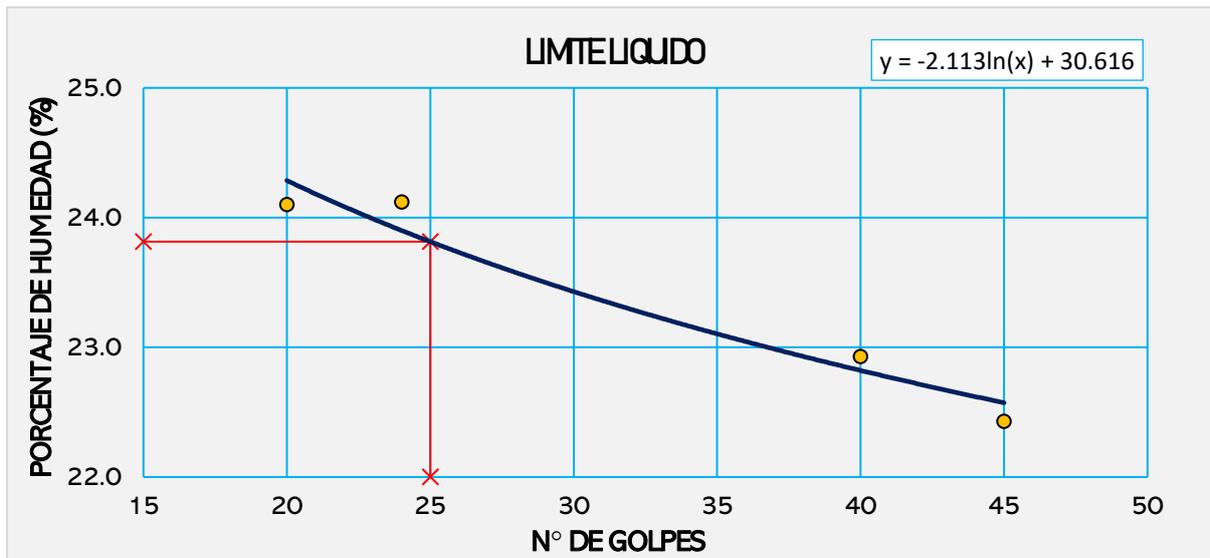
Km 01+500

Tabla 24 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 01+500 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03	M - 04
1. N° de Tara					
2. N° de Golpes	gr	20	45	24	40
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	75.06	76.35	70.15	71.64
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	71.91	73.45	67.54	69.17
5. Peso de Agua	gr	3.15	2.9	2.61	2.47
6. Peso de Tara	gr	58.84	60.52	56.72	58.40
7. Peso de Muestra Seca	gr	13.07	12.93	10.82	10.77
8. Contenido de Humedad	%	24.1	22.43	24.12	22.93

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 4 Limite Liquido Calicata – 01+500 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, se hace el cálculo del porcentaje de humedad con la cual se logra 25 golpes.

$$LL = -2.113 \ln(x) + 30.616, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 23.81\%$$

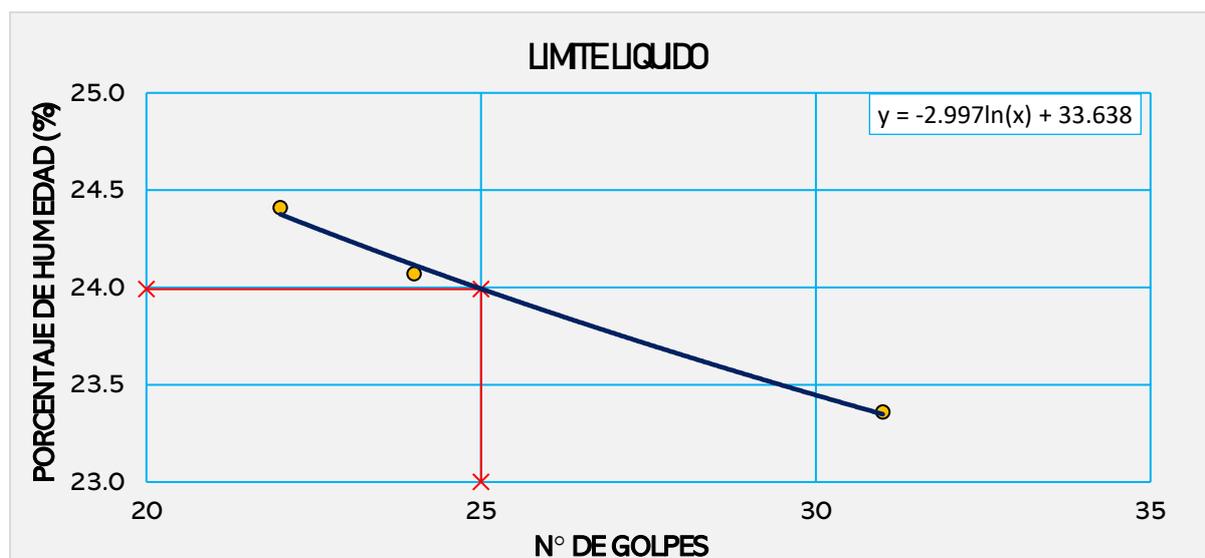
Km 02+200

Tabla 25 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 02+200 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03
1. N° de Tara				
2. N° de Golpes	gr	31	22	24
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	78.78	75.81	37.66
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	75.03	72.58	34.55
5. Peso de Agua	gr	3.75	3.23	3.11
6. Peso de Tara	gr	58.98	59.35	21.63
7. Peso de Muestra Seca	gr	16.05	13.23	12.92
8. Contenido de Humedad	%	23.36	24.41	24.07

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 5 Limite Liquido Calicata – 02+200 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, el porcentaje de humedad se determina considerando el contenido con el que el suelo alcanza 25 golpes en el ensayo, valor que indica la consistencia del material en el punto de transición entre los estados plástico y líquido.

$$LL = -2.997 \ln(x) + 33.638, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 23.99\%$$

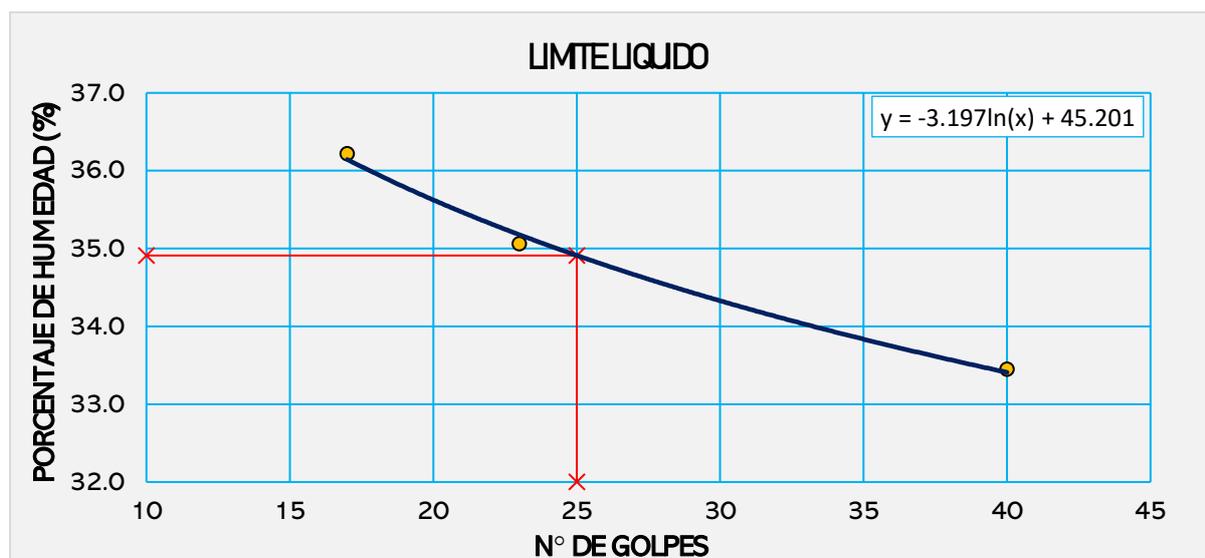
Km 03+060

Tabla 26 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 03+060 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03
1. N° de Tara				
2. N° de Golpes	gr	23	17	40
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	67.13	74.67	32.83
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	63.33	70.28	30.01
5. Peso de Agua	gr	3.8	4.39	2.82
6. Peso de Tara	gr	52.49	58.16	21.58
7. Peso de Muestra Seca	gr	10.84	12.12	8.43
8. Contenido de Humedad	%	35.06	36.22	33.45

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 6 Limite Liquido Calicata – 03+060 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, el porcentaje de humedad se determina considerando el contenido con el que el suelo alcanza 25 golpes en el ensayo, valor que indica la consistencia del material en el punto de transición entre los estados plástico y líquido.

$$LL = -3.197 \ln(x) + 45.201, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 34.91\%$$

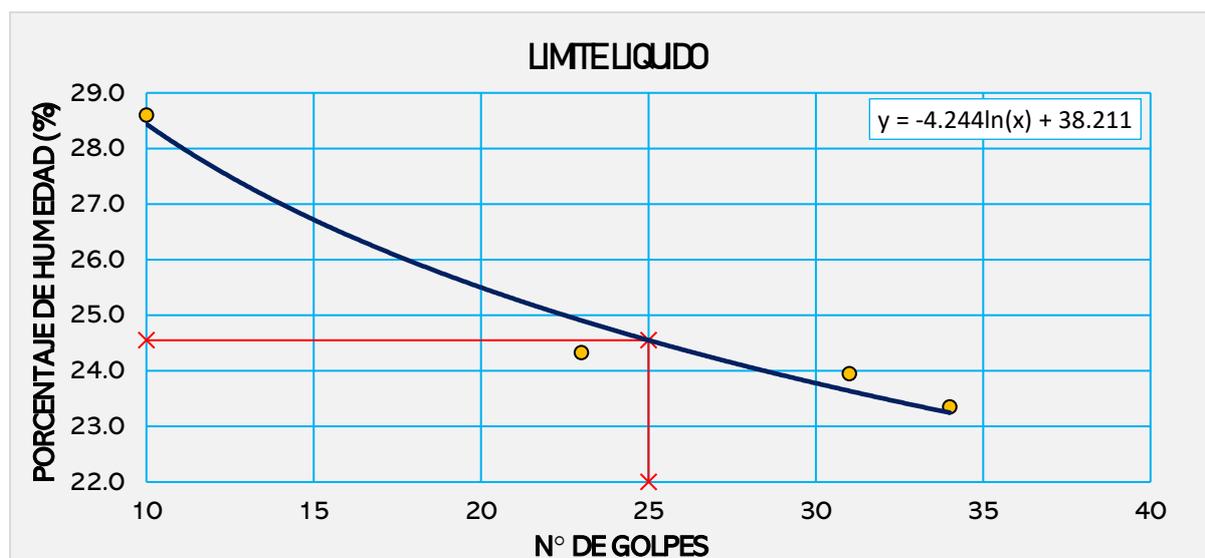
Km 04+040

Tabla 27 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 04+040 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03	M - 04
1. N° de Tara					
2. N° de Golpes	gr	34	23	31	10
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	67.61	72.39	70.18	79.54
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	65.49	69.68	67.68	76.32
5. Peso de Agua	gr	2.12	2.71	2.5	3.22
6. Peso de Tara	gr	56.41	58.54	57.24	65.06
7. Peso de Muestra Seca	gr	9.08	11.14	10.44	11.26
8. Contenido de Humedad	%	23.35	24.33	23.95	28.6

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 7 Limite Liquido Calicata – 04+040 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, el porcentaje de humedad se determina considerando el contenido con el que el suelo alcanza 25 golpes en el ensayo, valor que indica la consistencia del material en el punto de transición entre los estados plástico y líquido.

$$LL = -4.244 \ln(x) + 38.211, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 24.55\%$$

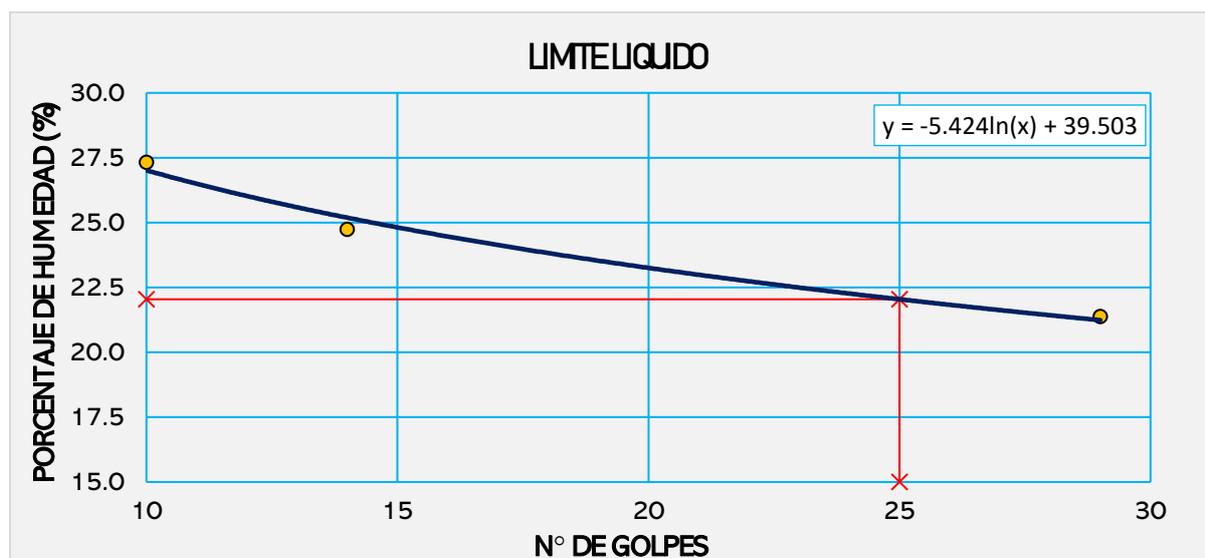
Km 05+360

Tabla 28 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 05+360 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03
1. N° de Tara				
2. N° de Golpes	gr	10	14	29
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	75.86	74.27	79.54
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	71.86	71.12	75.85
5. Peso de Agua	gr	4	3.15	3.69
6. Peso de Tara	gr	57.22	58.39	58.59
7. Peso de Muestra Seca	gr	14.64	12.73	17.26
8. Contenido de Humedad	%	27.32	24.74	21.38

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 8 Limite Liquido Calicata – 05+360 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, el porcentaje de humedad se determina considerando el contenido con el que el suelo alcanza 25 golpes en el ensayo, valor que indica la consistencia del material en el punto de transición entre los estados plástico y líquido.

$$LL = -5.424 \ln(x) + 39.503, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 22.04\%$$

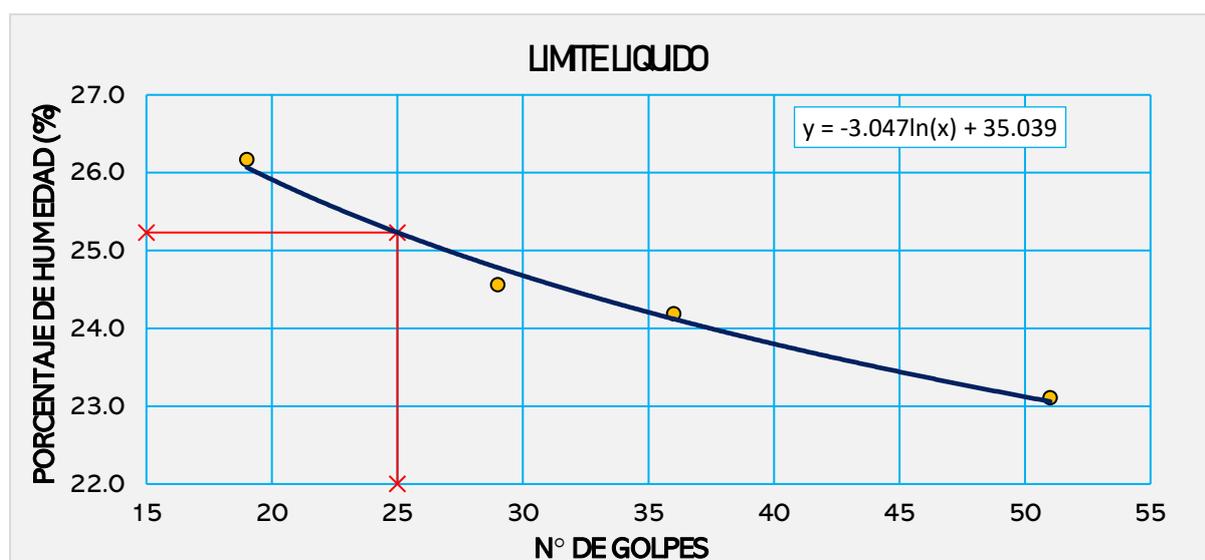
Km 06+550

Tabla 29 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 06+550 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03	M - 04
1. N° de Tara					
2. N° de Golpes	gr	29	51	36	19
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	66.71	75.49	75.84	77.05
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	64.48	73.01	73.09	73.74
5. Peso de Agua	gr	2.23	2.48	2.75	3.31
6. Peso de Tara	gr	55.40	62.28	61.72	61.09
7. Peso de Muestra Seca	gr	9.08	10.73	11.37	12.65
8. Contenido de Humedad	%	24.56	23.11	24.19	26.17

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 9 Limite Liquido Calicata – 06+550 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, el porcentaje de humedad se determina considerando el contenido con el que el suelo alcanza 25 golpes en el ensayo, valor que indica la consistencia del material en el punto de transición entre los estados plástico y líquido.

$$LL = -3.047 \ln(x) + 35.039, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 25.23\%$$

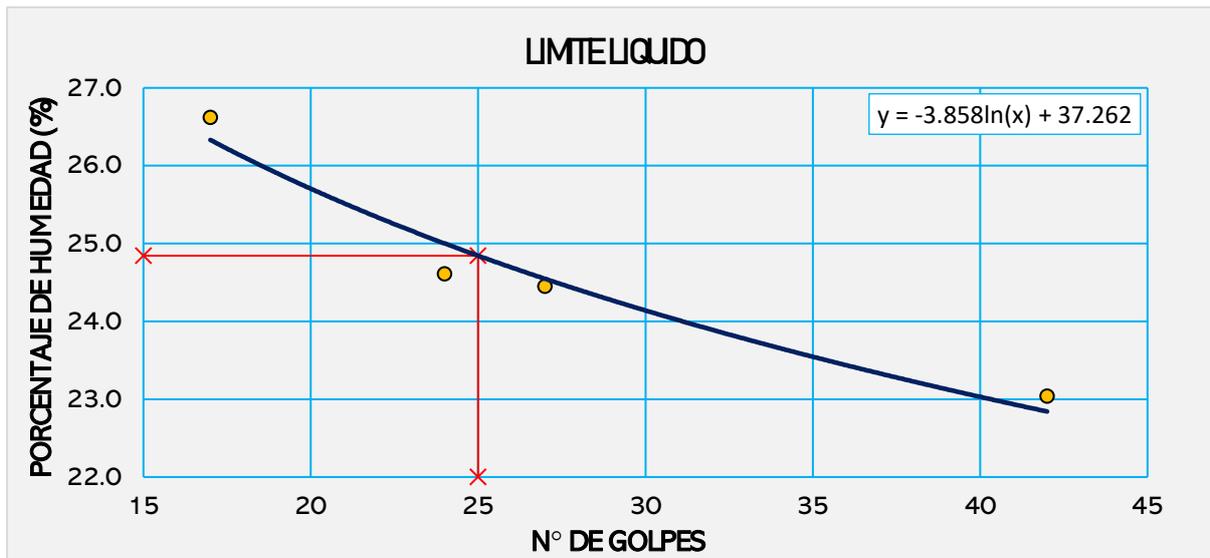
Km 07+400

Tabla 30 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 07+400 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03	M - 04
1. N° de Tara					
2. N° de Golpes	gr	42	27	24	17
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	74.12	72.45	73.03	33.84
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	71.27	69.68	70.35	31.17
5. Peso de Agua	gr	2.85	2.77	2.68	2.67
6. Peso de Tara	gr	58.90	58.35	59.46	21.14
7. Peso de Muestra Seca	gr	12.37	11.33	10.89	10.03
8. Contenido de Humedad	%	23.04	24.45	24.61	26.62

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 10 Limite Liquido Calicata – 07+400 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, el porcentaje de humedad se determina considerando el contenido con el que el suelo alcanza 25 golpes en el ensayo, valor que indica la consistencia del material en el punto de transición entre los estados plástico y líquido.

$$LL = -3.858 \ln(x) + 37.262, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 24.84\%$$

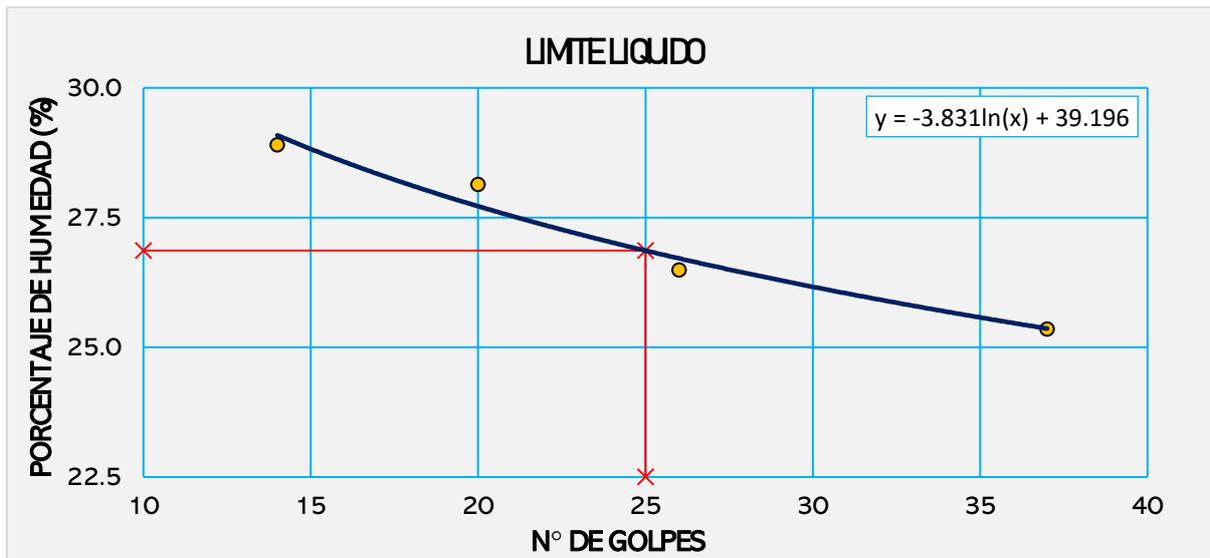
Km 08+300

Tabla 31 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 08+300 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03	M - 04
1. N° de Tara					
2. N° de Golpes	gr	26	37	20	14
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	68.62	69.96	73.13	72.84
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	65.51	67.40	69.72	70.23
5. Peso de Agua	gr	3.11	2.56	3.41	2.61
6. Peso de Tara	gr	53.77	57.30	57.60	61.20
7. Peso de Muestra Seca	gr	11.74	10.1	12.12	9.03
8. Contenido de Humedad	%	26.49	25.35	28.14	28.9

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 11 Limite Liquido Calicata – 08+300 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, el porcentaje de humedad se determina considerando el contenido con el que el suelo alcanza 25 golpes en el ensayo, valor que indica la consistencia del material en el punto de transición entre los estados plástico y líquido.

$$LL = -3.831 \ln(x) + 39.196, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 26.86\%$$

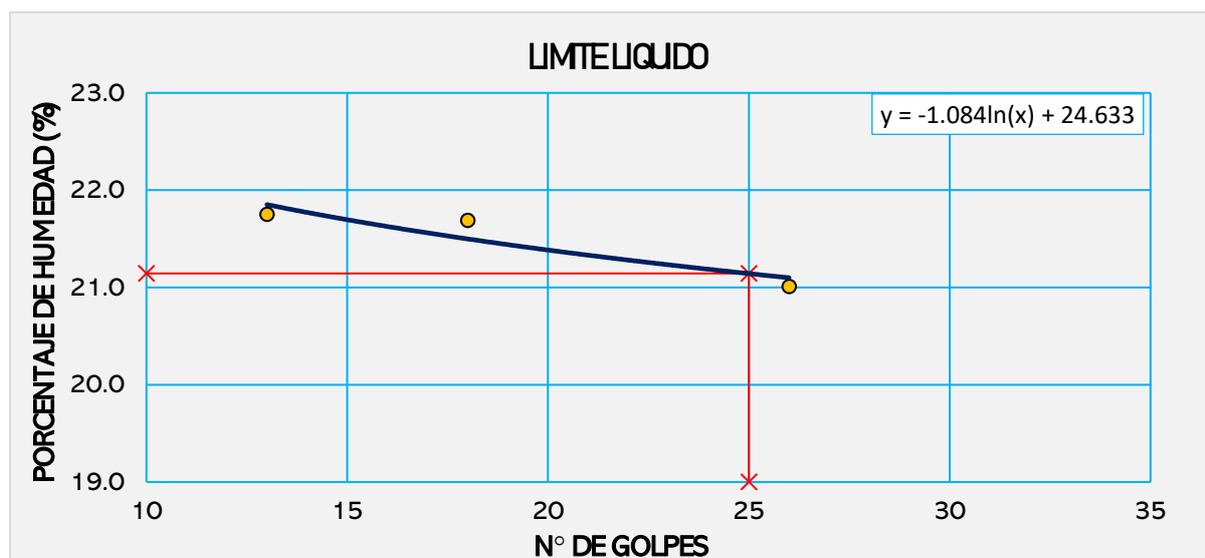
Km 09+630

Tabla 32 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 09+630 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03
1. N° de Tara				
2. N° de Golpes	gr	13	26	18
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	70.57	67.60	61.91
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	68.48	65.89	60.91
5. Peso de Agua	gr	2.09	1.71	1
6. Peso de Tara	gr	58.87	57.75	56.30
7. Peso de Muestra Seca	gr	9.61	8.14	4.61
8. Contenido de Humedad	%	21.75	21.01	21.69

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 12 Limite Liquido Calicata – 09+630 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, el porcentaje de humedad se determina considerando el contenido con el que el suelo alcanza 25 golpes en el ensayo, valor que indica la consistencia del material en el punto de transición entre los estados plástico y líquido.

$$LL = -1.084 \ln(x) + 24633, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 21.14\%$$

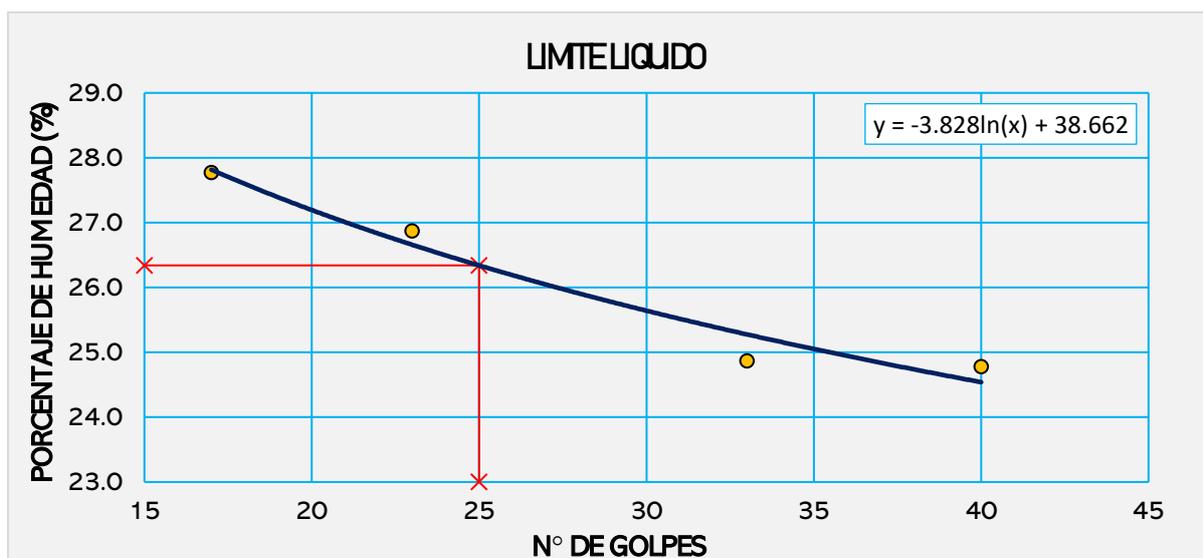
Km 10+500

Tabla 33 Contenido de Humedad para Limite Liquido Calicata – 10+500 km

DESCRIPCION	UND	M-01	M - 02	M - 03	M - 04
1. N° de Tara					
2. N° de Golpes	gr	40	17	23	33
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	71.21	76.77	70.02	70.50
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	68.66	72.98	67.65	68.19
5. Peso de Agua	gr	2.55	3.79	2.37	2.31
6. Peso de Tara	gr	58.37	59.33	58.83	58.90
7. Peso de Muestra Seca	gr	10.29	13.65	8.82	9.29
8. Contenido de Humedad	%	24.78	27.77	26.87	24.87

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 13 Limite Liquido Calicata – 10+500 km



Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtenida la recta de regresión logarítmica, se hace el cálculo del porcentaje de humedad con la cual se logra 25 golpes.

$$LL = -3.828 \ln(x) + 38.662, \quad x = 25 \text{ golpes}$$

$$Ll = 26.34\%$$

Resultados consolidados del Limite Liquido

Tabla 34 Contenido de Humedad para Limite Liquido de las Calicata

CALICATA	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	LIMITE LIQUIDO LL (%)
km 01+500	23.39	23.95
km 02+200	23.95	23.99
km 03+060	34.91	34.89
km 04+040	25.06	24.63
km 05+360	24.48	23.09
km 06+550	24.51	25.20
km 07+400	24.68	24.78
km 08+300	27.22	26.88
km 09+630	21.48	20.68
km 10+500	26.07	26.26

Nota. Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Limite Plástico e índice de plasticidad

El ensayo de Limite plástico se realizó según indica la normativa, tomando 2 muestras y analizando las humedades de cada una de estas, se detalla en las siguientes tablas.

Km 01+500

Tabla 35 Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 01+500

DESCRIPCION	UND	MUESTRA	MUESTRA
		01	02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	62.48	64.30
Peso de Muestra seca + Tara	gr	61.94	63.62
Peso de Agua	gr	0.54	0.68
Peso de Tara	gr	57.60	58.27
Peso de Muestra Seca	gr	4.34	5.35
Contenido de Humedad	%	12.44	12.71
LIMITE PLASTICO	%	12.58	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 11.38 \%$$

Km 02+200

Tabla 36 Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 02+200

DESCRIPCION	UND	MUESTRA	MUESTRA
		01	02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	59.52	60.34
Peso de Muestra seca + Tara	gr	58.86	59.66
Peso de Agua	gr	0.66	0.68
Peso de Tara	gr	53.80	54.50
Peso de Muestra Seca	gr	5.06	5.16
Contenido de Humedad	%	13.04	13.18
LIMITE PLASTICO	%	13.11	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 10.88 \%$$

Km 03+060

Tabla 37 Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 03+060

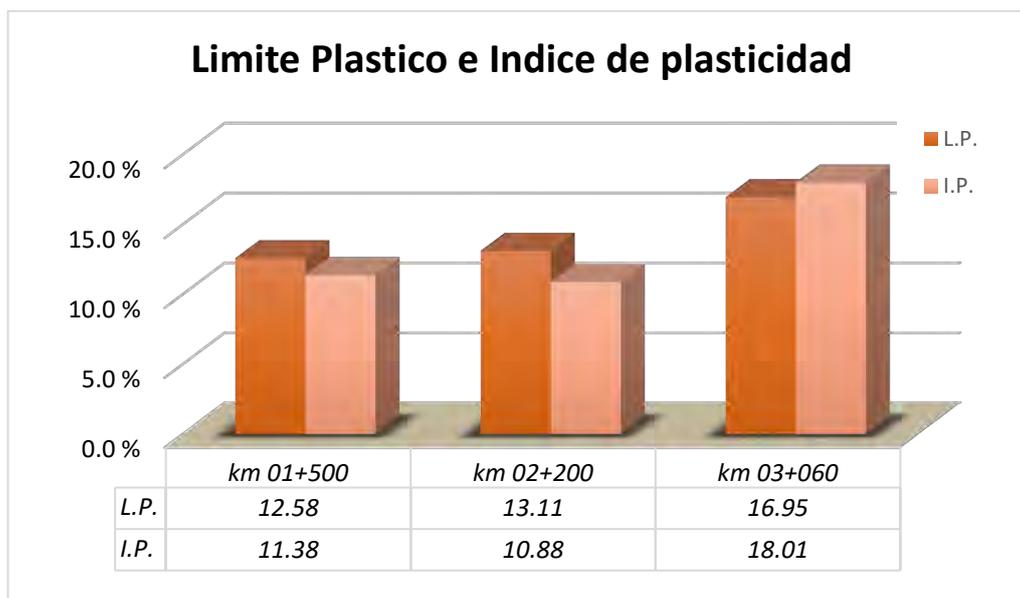
DESCRIPCION	UND	MUESTRA	
		01	02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	67.59	66.40
Peso de Muestra seca + Tara	gr	66.69	65.45
Peso de Agua	gr	0.90	0.95
Peso de Tara	gr	61.38	59.80
Peso de Muestra Seca	gr	5.31	5.65
Contenido de Humedad	%	16.95	16.81
LIMITE PLASTICO	%	16.88	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 18.01 \%$$

Grafica 14 Limite Plástico e Índice de Plasticidad del primer subtramo



Nota. Fuente: Elaboración propia

Km 04+040

Tabla 38 Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 04+040

DESCRIPCION	UND	MUESTRA	
		01	02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	63.22	61.94
Peso de Muestra seca + Tara	gr	62.47	61.18
Peso de Agua	gr	0.75	0.76

Peso de Tara	gr	58.39	57.00
Peso de Muestra Seca	gr	4.08	4.18
Contenido de Humedad	%	18.38	18.18
LIMITE PLASTICO	%	18.28	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 6.35 \%$$

Km 05+360

Tabla 39 Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 05+360

DESCRIPCION	UND	MUESTRA	
		01	02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	64.25	64.30
Peso de Muestra seca + Tara	gr	63.42	63.42
Peso de Agua	gr	0.83	0.88
Peso de Tara	gr	58.81	58.87
Peso de Muestra Seca	gr	4.61	4.55
Contenido de Humedad	%	18.00	19.34
LIMITE PLASTICO	%	18.67	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 4.42 \%$$

Km 06+550

Tabla 40 Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 06+550

DESCRIPCION	UND	MUESTRA	
		01	02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	27.98	34.30
Peso de Muestra seca + Tara	gr	26.70	33.22
Peso de Agua	gr	1.28	1.08
Peso de Tara	gr	20.56	27.87
Peso de Muestra Seca	gr	6.14	5.35
Contenido de Humedad	%	20.85	20.19
LIMITE PLASTICO	%	20.52	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 4.68 \%$$

Km 07+400

Tabla 41 Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 07+400

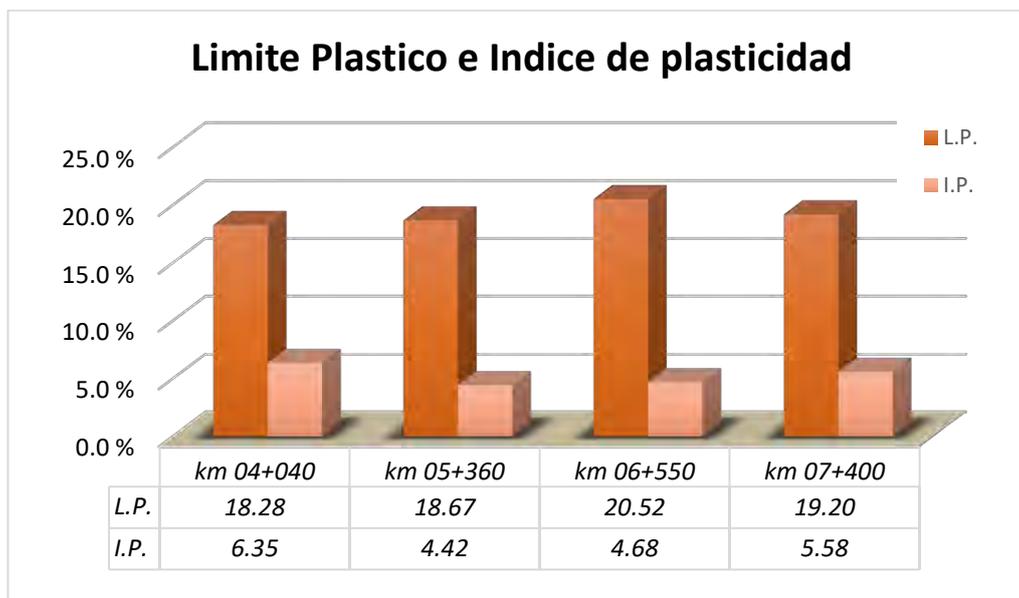
DESCRIPCION	UND	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	27.00	34.30
Peso de Muestra seca + Tara	gr	26.15	33.42
Peso de Agua	gr	0.85	0.88
Peso de Tara	gr	21.69	28.87
Peso de Muestra Seca	gr	4.46	4.55
Contenido de Humedad	%	19.06	19.34
LIMITE PLASTICO	%	19.20	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 5.58 \%$$

Grafica 15 Limite Plástico e Índice de Plasticidad del segundo subtramo



Nota. Fuente: Elaboración propia

Km 08+300**Tabla 42** *Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 08+300*

DESCRIPCION	UND	MUESTRA	MUESTRA
		01	02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	25.96	31.94
Peso de Muestra seca + Tara	gr	25.15	31.18
Peso de Agua	gr	0.81	0.76
Peso de Tara	gr	21.79	28.00
Peso de Muestra Seca	gr	3.36	3.18
Contenido de Humedad	%	24.11	23.90
LIMITE PLASTICO	%	24.01	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 2.88 \%$$

Km 09+630**Tabla 43** *Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 09+630*

DESCRIPCION	UND	MUESTRA	MUESTRA
		01	02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	61.94	62.43
Peso de Muestra seca + Tara	gr	61.18	61.63
Peso de Agua	gr	0.76	0.80
Peso de Tara	gr	57.00	57.30
Peso de Muestra Seca	gr	4.18	4.33
Contenido de Humedad	%	18.18	18.48
LIMITE PLASTICO	%	18.33	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 2.35 \%$$

Km 10+500

Tabla 44 Contenido de Humedad para Limite Plástico Calicata – Km 10+500

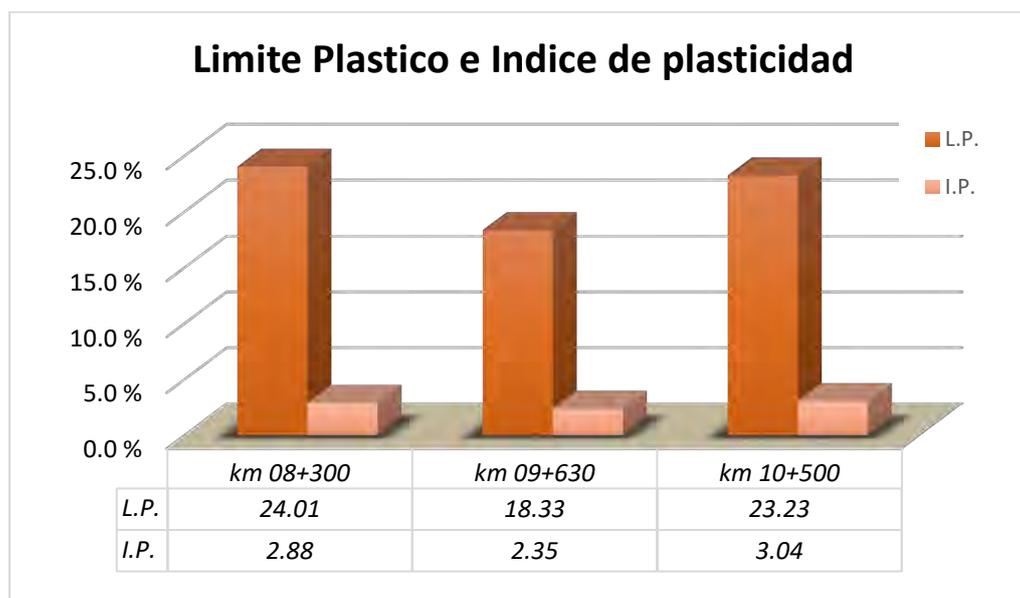
DESCRIPCION	UND	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	28.27	31.94
Peso de Muestra seca + Tara	gr	27.03	30.18
Peso de Agua	gr	1.24	1.76
Peso de Tara	gr	21.76	22.50
Peso de Muestra Seca	gr	5.27	7.68
Contenido de Humedad	%	23.53	22.92
LIMITE PLASTICO	%	23.23	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los límites líquido y plástico, se calcula el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos valores.

$$IP = 3.04 \%$$

Grafica 16 Limite Plástico e Índice de Plasticidad del tercer subtramo



Nota. Fuente: Elaboración propia

Resultados consolidados del límite plástico e Índice de plasticidad

Tabla 45 Limite Plástico e Índice de Plasticidad para las calicatas

CALICATA	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE DE PLASTICIDAD (%)
km 01+500	12.58	11.38
km 02+200	13.11	10.88

km 03+060	16.88	18.01
km 04+040	18.28	6.35
km 05+360	18.67	4.42
km 06+550	20.52	4.68
km 07+400	19.20	5.58
km 08+300	24.01	2.88
km 09+630	18.33	2.35
km 10+500	23.23	3.04

Nota. Fuente: Elaboración propia

6.3 Gravedad específica de sólidos mediante picnómetro de agua

El ensayo de gravedad específica permite determinar la relación entre el peso de los sólidos del suelo y el del agua destilada, siendo fundamental para calcular las relaciones de fase del suelo.

Tabla 46 Gravedad Específica

Datos de Ensayo	und	km	km	km	km	km
		01+500	02+200	03+060	04+040	05+360
Masa de los sólidos secados al horno	gr	250.00	200.36	120.03	260.00	150.19
Masa del picnómetro con agua	gr	659.46	676.36	676.56	659.46	676.36
Masa del picnómetro con agua y sólidos	gr	817.74	803.08	752.21	822.33	769.87
Volumen desplazado	cc	91.72	73.64	44.38	97.13	56.68
Gravedad específica	gr/cc	2.73	2.72	2.70	2.68	2.65

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 47 Gravedad Específica

Datos de Ensayo	und	km	km	km	km	km
		06+550	07+400	08+300	09+630	10+500
Masa de los sólidos secados al horno	gr	91.88	144.66	145.66	100.10	96.44
Masa del picnómetro con agua	gr	652.16	659.79	659.79	676.36	652.16
Masa del picnómetro con agua y sólidos	gr	710.06	750.48	750.92	738.81	712.56
Volumen desplazado	cc	33.98	53.97	54.53	37.65	36.04
Gravedad específica	gr/cc	2.70	2.68	2.67	2.66	2.68

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 48 Resumen consolidado de los resultados de Gravedad Especifica

CALICATA	GRAVEDAD ESPECIFICA (gr/cc)
km 01+500	2.73
km 02+200	2.72
km 03+060	2.70
km 04+040	2.68
km 05+360	2.65
km 06+550	2.70
km 07+400	2.68
km 08+300	2.67
km 09+630	2.66
km 10+500	2.68

Nota. Fuente: Elaboración propia

6.4 Ensayo de Compactación Proctor modificado

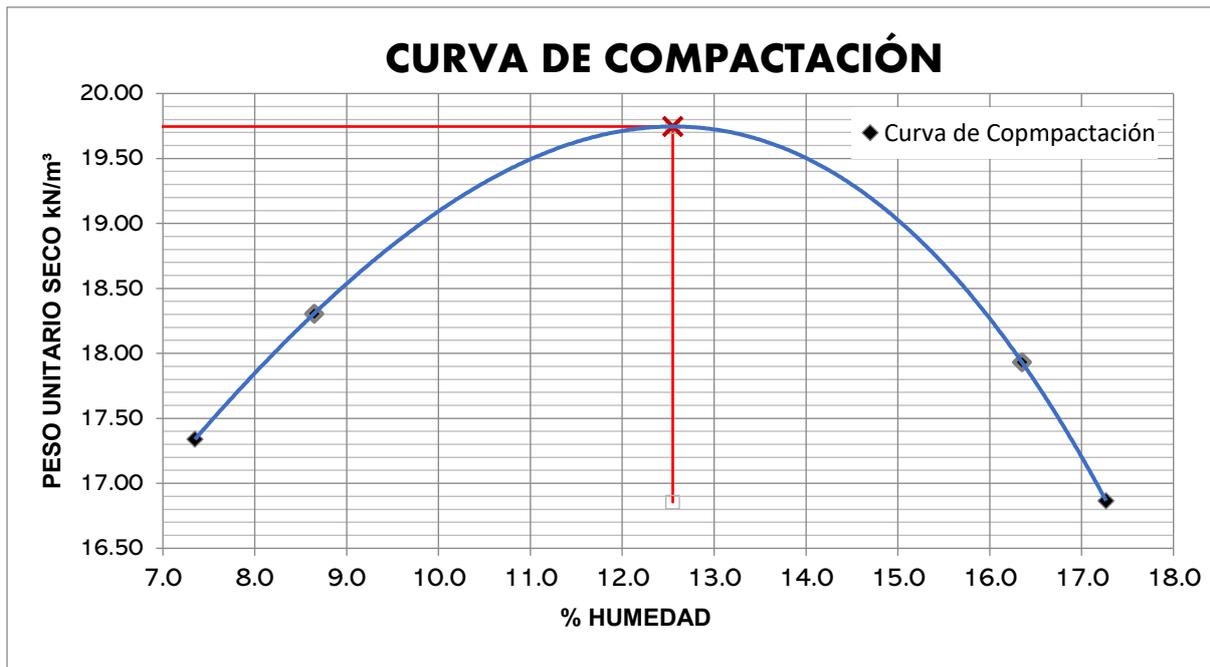
Se tienen los resultados para cada una de las calicatas estudiadas, halladas en función de la densidad seca máxima y el contenido de humedad

Tabla 49 Datos del ensayo Proctor modificado primer subtramo

Datos de Ensayo	Und	km 01+500	km 02+200	km 03+060
Contenido de Humedad	%	12.55	11.75	13.08
Densidad seca	gr/cm ³	2.01	1.98	2.07

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 17 Contenido de Humedad vs Peso unitario seco



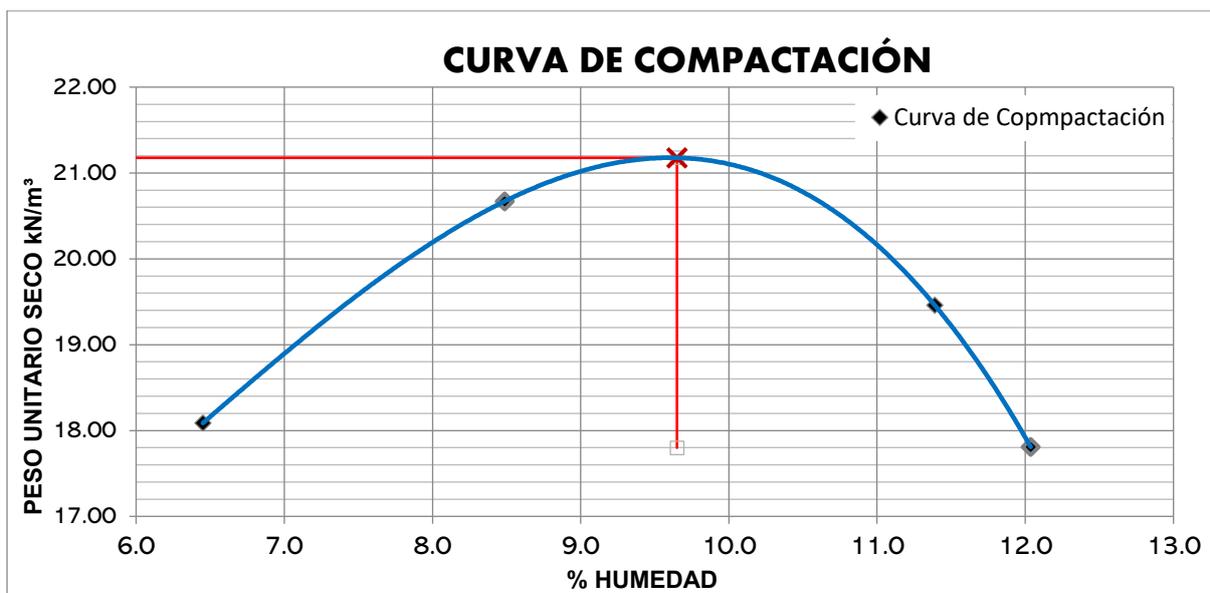
Nota. Se muestra la curva típica del primer subtramo. Fuente: Elaboración propia

Tabla 50 Datos del ensayo Proctor modificado segundo subtramo

Datos de Ensayo	Und	km 04+040	km 05+360	km 06+550	km 07+400
Contenido de Humedad	%	9.46	9.65	9.71	8.53
Densidad seca	gr/cm ³	2.18	2.16	2.1	2.18

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 18 Contenido de Humedad vs Peso unitario seco



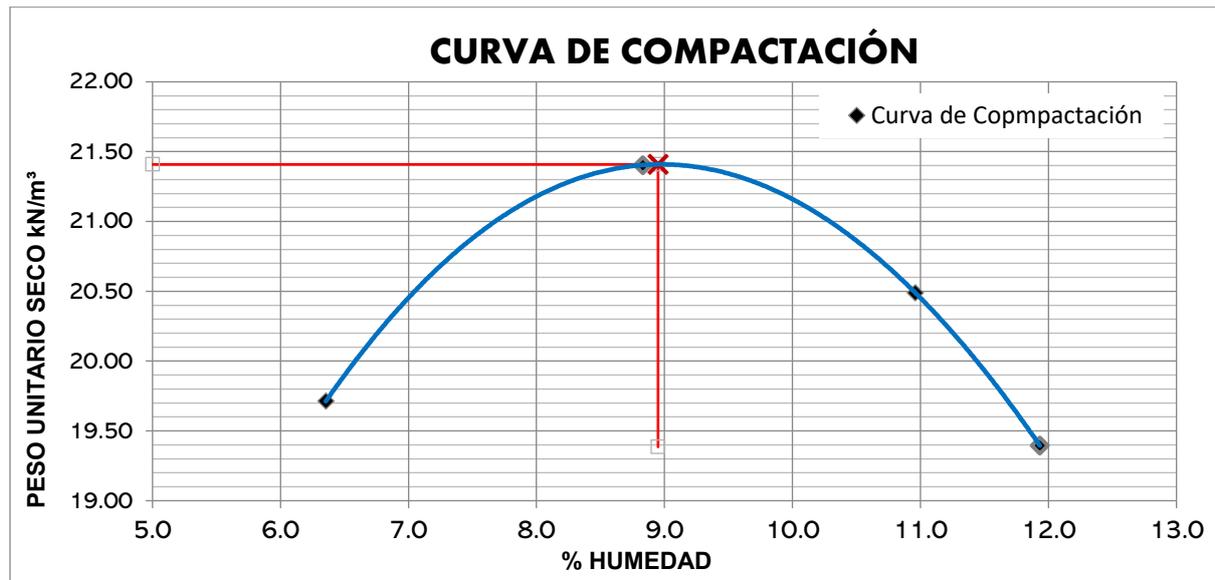
Nota. Se muestra la curva típica del segundo subtramo. Fuente: Elaboración propia

Tabla 51 Datos del ensayo Proctor modificado tercer subtramo

Datos de Ensayo	Und	km 08+300	km 09+630	km 10+500
Contenido de Humedad	%	9.22	8.95	9.06
Densidad seca	gr/cm ³	2.29	2.18	2.21

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 19 Contenido de Humedad vs Peso unitario seco



Nota. Se muestra la curva típica del tercer subtramo. Fuente: Elaboración propia

Tabla 52 Datos consolidados del ensayo Proctor modificado todas las calicatas

CALICATA	Contenido óptimo de humedad (%)	Densidad seca (gr/cm ³)
km 01+500	12.55	2.01
km 02+200	11.75	1.98
km 03+060	13.08	2.07
km 04+040	9.46	2.18
km 05+360	9.65	2.16
km 06+550	9.71	2.10
km 07+400	8.53	2.18
km 08+300	9.22	2.29
km 09+630	8.95	2.18
km 10+500	9.06	2.21

Nota. Fuente: Elaboración propia

6.5 Ensayo CBR de suelos

Se tienen los siguientes resultados

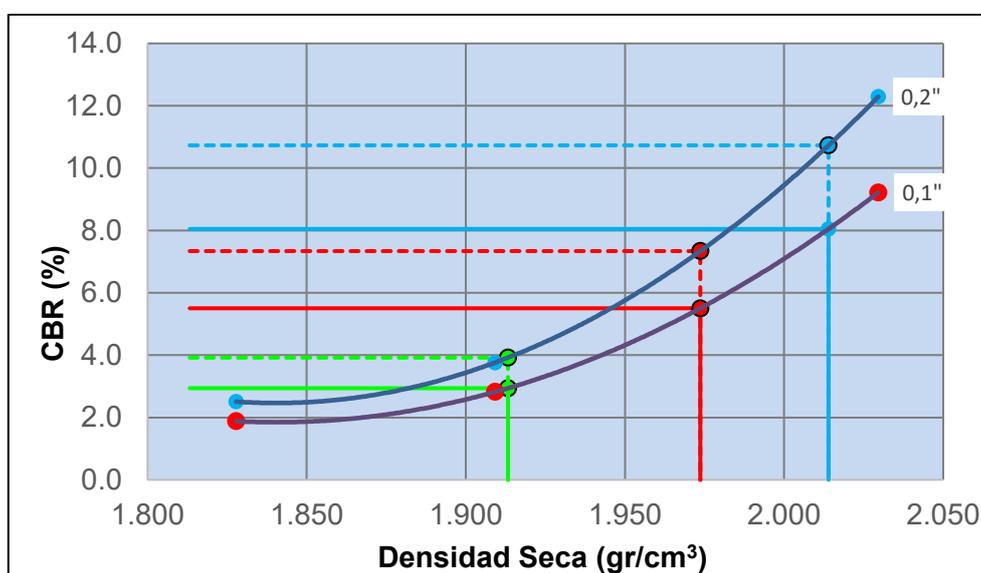
Km 01+500

Tabla 53 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 01+500

Penetración in	Carga estándar kg/cm ²	Molde 3 55 golpes		Molde 2 26 golpes		Molde 1 12 golpes	
		psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	92.2	9.2	28.2	2.8	18.8	1.9
0.2	105.46	184.3	12.3	56.4	3.8	37.6	2.5
Promedio			10.75		3.3		2.2

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 20 Curva CBR del km 01+500



Nota. Fuente: Elaboración propia

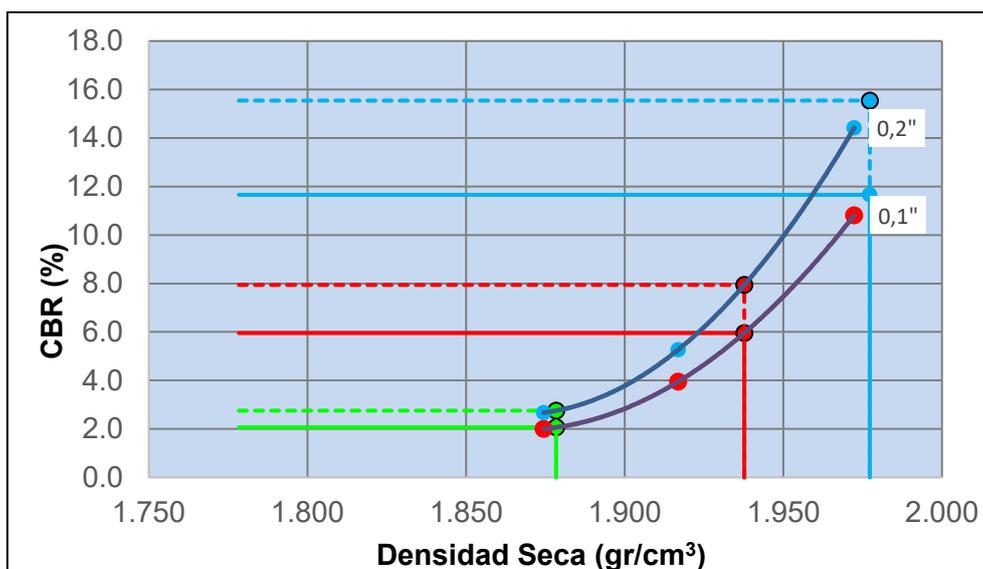
Km 02+200

Tabla 54 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 02+200

Penetración in	Carga estándar kg/cm ²	Molde 3 55 golpes		Molde 2 26 golpes		Molde 1 12 golpes	
		psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	108.2	10.8	39.5	3.9	20.1	1.9
0.2	105.46	216.3	14.4	79.0	5.3	40.1	2.5
Promedio			12.6		4.6		2.35

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 21 Curva CBR del km 02+200



Nota. Fuente: Elaboración propia

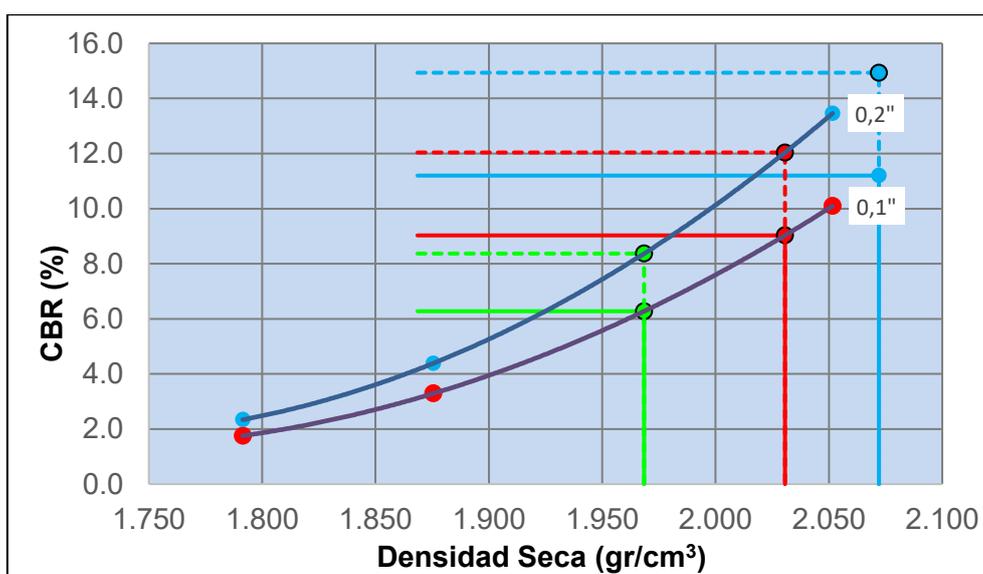
Km 03+060

Tabla 55 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 03+060

Penetración	Carga estándar	Molde 3		Molde 2		Molde 1	
		55 golpes		26 golpes		12 golpes	
in	kg/cm2	psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	100.9	10.1	32.9	3.3	17.6	1.8
0.2	105.46	201.9	13.5	65.8	4.4	35.1	2.3
Promedio			11.8		3.85		2.05

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 22 Curva CBR del km 03+060



Nota. Fuente: Elaboración propia

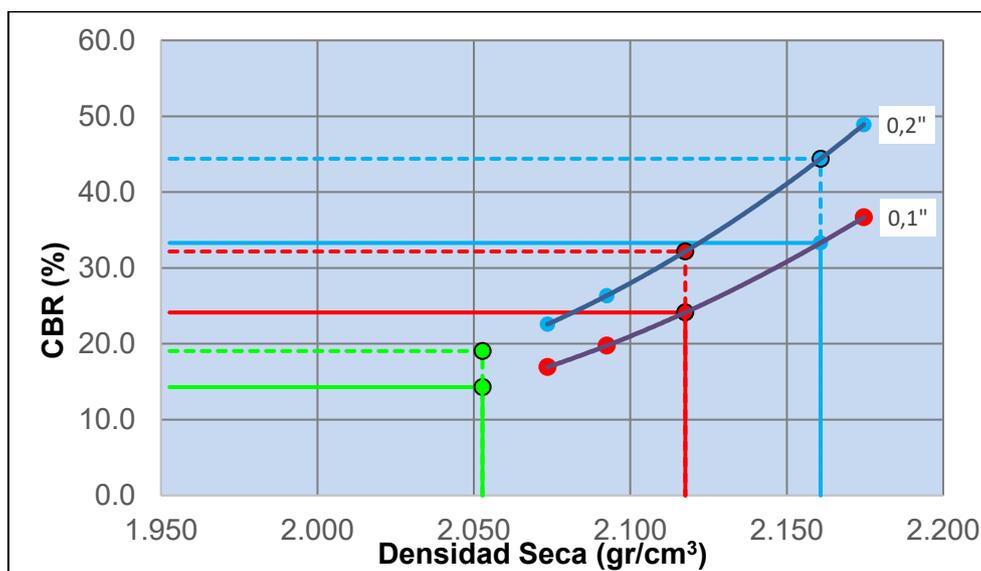
Km 04+040

Tabla 56 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 04+040

Penetración	Carga estándar	Molde 3		Molde 2		Molde 1	
		55 golpes		26 golpes		12 golpes	
in	kg/cm2	psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	366.8	36.7	197.5	19.7	169.3	16.9
0.2	105.46	733.5	48.9	395.0	26.3	338.6	22.6
Promedio			42.8			23.0	19.75

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 23 Curva CBR del km 04+040



Nota. Fuente: Elaboración propia

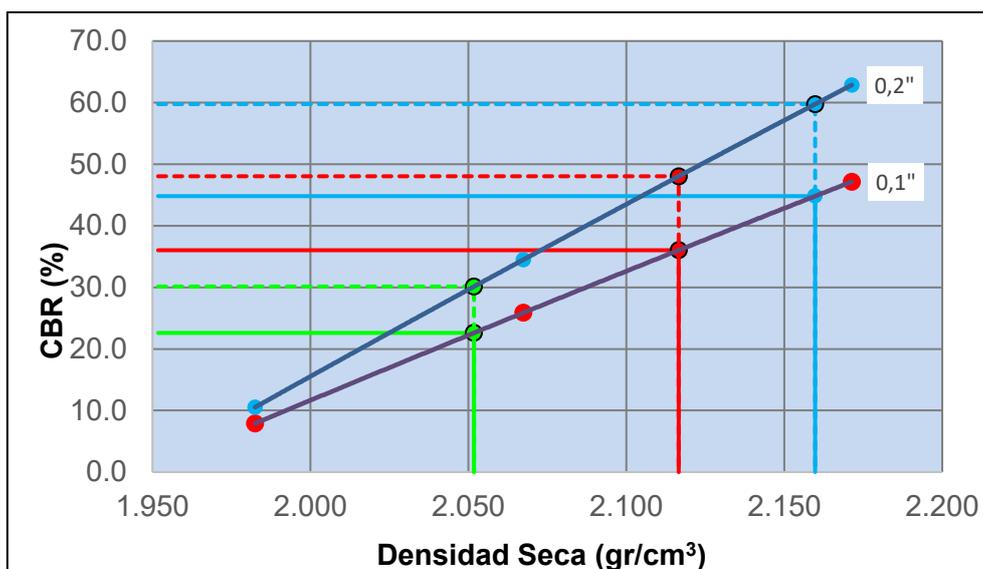
Km 05+360

Tabla 57 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 05+360

Penetración	Carga estándar	Molde 3		Molde 2		Molde 1	
		55 golpes		26 golpes		12 golpes	
in	kg/cm2	psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	471.5	47.1	258.6	25.9	79.0	7.9
0.2	105.46	943.0	62.9	517.2	34.5	158.0	10.5
Promedio			55.0			30.2	9.2

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 24 Curva CBR del km 05+360



Nota. Fuente: Elaboración propia

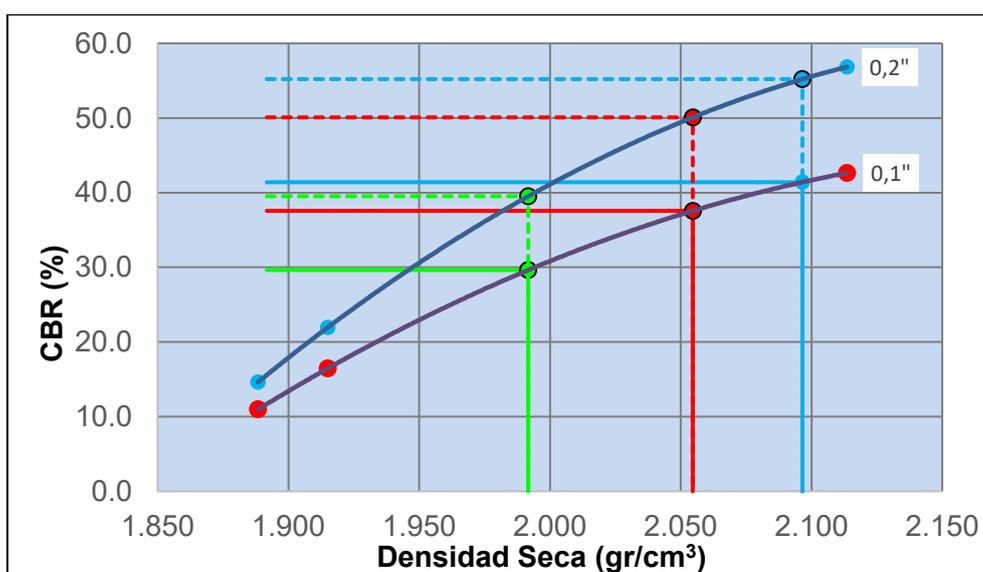
Km 06+550

Tabla 58 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 06+550

Penetración	Carga estándar	Molde 3		Molde 2		Molde 1	
		55 golpes		26 golpes		12 golpes	
in	kg/cm2	psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	426.3	42.6	164.6	16.5	109.7	11.0
0.2	105.46	852.7	56.8	329.2	21.9	219.4	14.6
Promedio			49.7		19.2		12.8

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 25 Curva CBR del km 06+550



Nota. Fuente: Elaboración propia

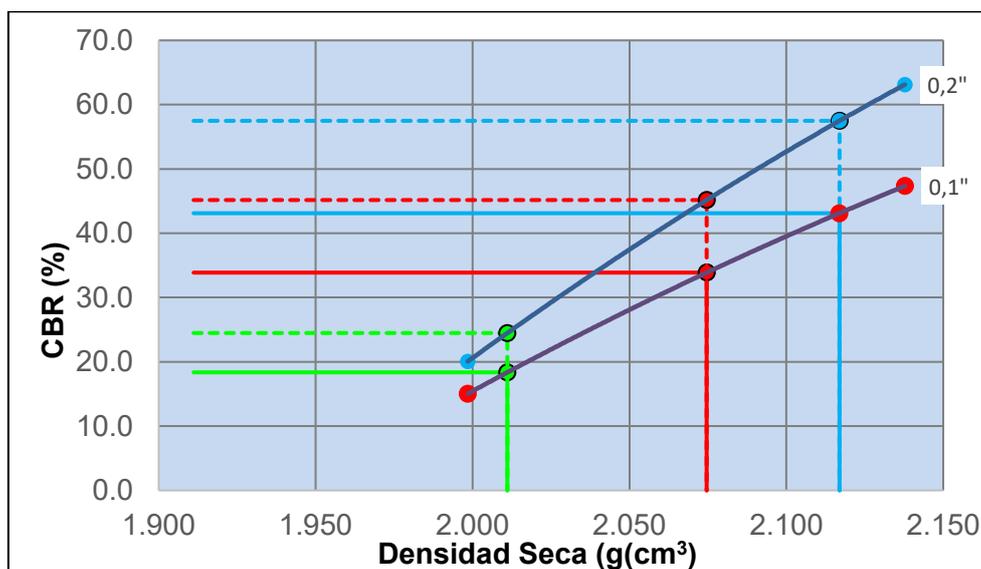
Km 07+400

Tabla 59 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 07+400

Penetración	Carga estándar	Molde 3		Molde 2		Molde 1	
		55 golpes		26 golpes		12 golpes	
in	kg/cm2	psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	473.4	47.3	431.0	43.1	150.5	15.0
0.2	105.46	946.7	63.1	862.1	57.5	300.9	20.1
Promedio			55.2		50.3		17.6

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 26 Curva CBR del km 07+400



Nota. Fuente: Elaboración propia

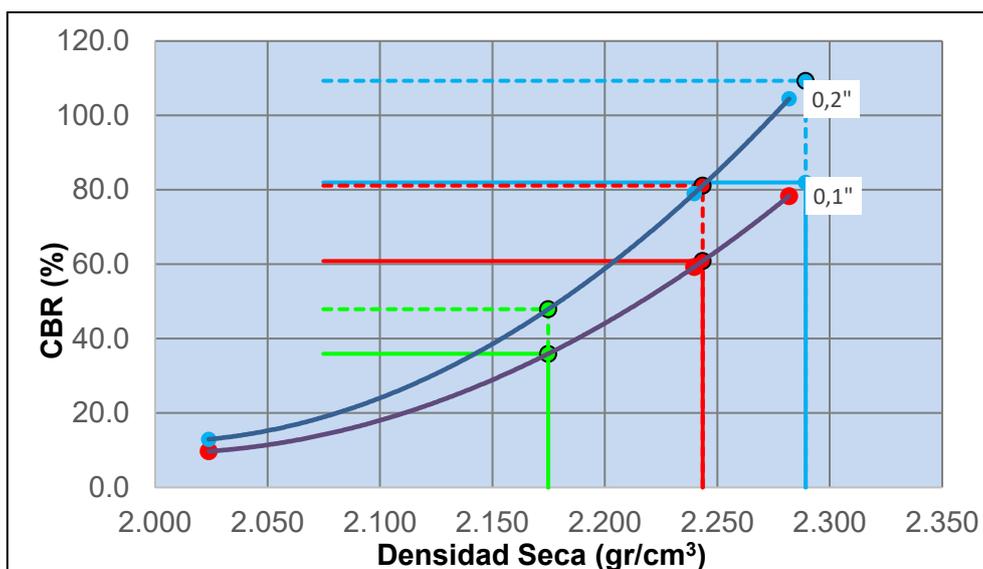
Km 08+300

Tabla 60 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 08+300

Penetración	Carga estándar	Molde 3		Molde 2		Molde 1	
		55 golpes		26 golpes		12 golpes	
in	kg/cm2	psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	783.4	78.3	592.5	59.2	97.2	9.7
0.2	105.46	1566.8	104.5	1185.0	79.0	194.4	13.0
Promedio			91.4		69.1		11.4

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 27 Curva CBR del km 08+300



Nota. Fuente: Elaboración propia

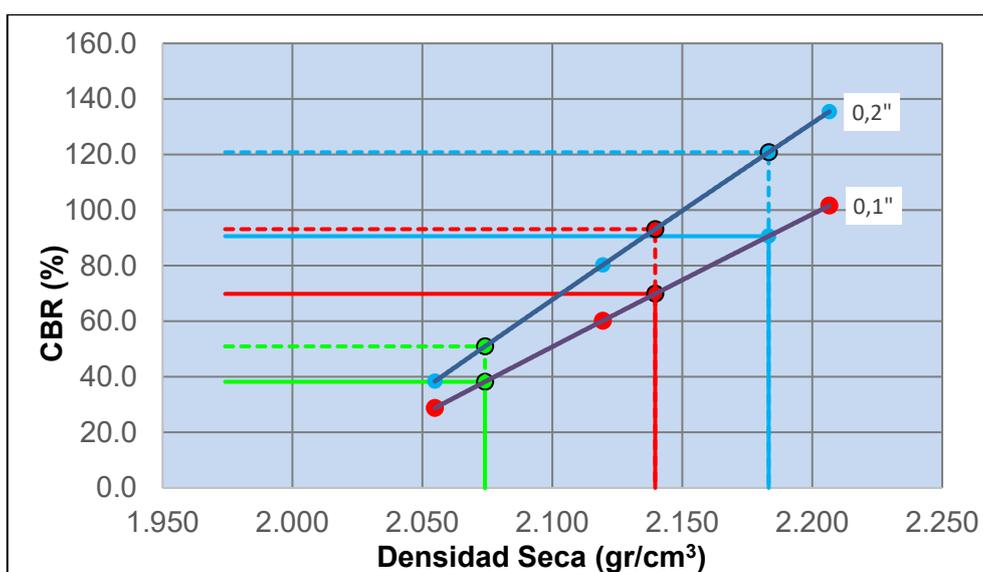
Km 09+630

Tabla 61 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 09+630

Penetración in	Carga estándar kg/cm ²	Molde 3 55 golpes		Molde 2 26 golpes		Molde 1 12 golpes	
		psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	1015.7	101.6	601.9	60.2	287.8	28.8
0.2	105.46	2031.4	135.4	1203.8	80.3	575.6	38.4
Promedio			118.5	70.25			33.6

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 28 Curva CBR del km 09+630



Nota. Fuente: Elaboración propia

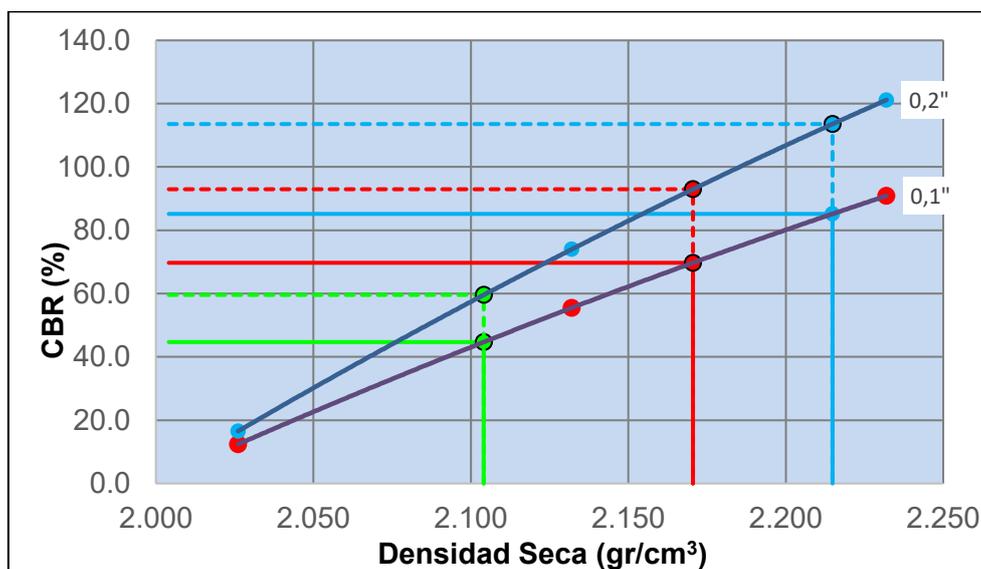
Km 10+500

Tabla 62 Resultados del ensayo CBR de la calicata del km 10+500

Penetración	Carga estándar	Molde 3		Molde 2		Molde 1	
		55 golpes		26 golpes		12 golpes	
in	kg/cm ²	psi	%	psi	%	psi	%
0.1	70.31	908.8	90.9	554.9	55.5	121.4	12.4
0.2	105.46	1817.6	121.2	1109.7	74.0	248.3	16.6
Promedio			106.05	64.75		14.5	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Grafica 29 Curva CBR del km 10+500



Nota. Fuente: Elaboración propia

6.1 Datos meteorológicos

En San Jerónimo, los veranos son breves, agradables y con cielos mayormente nublados, mientras que los inviernos son cortos, fríos y con cielos parcialmente nublados. El clima se mantiene seco a lo largo de todo el año. Durante el transcurso anual, las temperaturas suelen oscilar entre los 5°C y los 20°C, raramente descendiendo por debajo de los 3°C o superando los 22°C.

Para la estimación del Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI, por sus siglas en inglés), se utilizó la información proporcionada por la estación meteorológica de Granja Kayra. Esta estación suministró datos climatológicos esenciales, tales como precipitaciones mensuales, temperaturas máximas y mínimas, así como el promedio mensual de horas de insolación. Con base en estos parámetros, se efectuó el análisis correspondiente para el cálculo mensual del TMI durante el año 2024.

Tabla 63 Variables climáticas promedio Estación Kayra

Mes	Precip. mm	Temp. media °C	Temp. min °C	Temp. max °C	Humedad relativa %	Horas de luz solar hrs
Enero	72.10	15.50	22.86	8.13	75.94	12.67
Febrero	83.60	13.89	20.16	7.62	78.99	12.54
Marzo	128.60	14.62	21.73	7.51	77.72	12.17
Abril	55.20	12.83	22.36	3.30	75.71	11.79
Mayo	14.80	13.53	23.73	3.33	73.22	11.51
Junio	0.10	10.88	21.90	-0.15	68.94	11.36
Julio	0.50	11.22	22.96	-0.53	65.25	11.45
Agosto	0.80	12.58	23.12	2.05	63.69	11.71
Setiembre	24.40	12.96	22.75	3.18	63.6	12.10
Octubre	26.60	13.99	23.21	4.78	60.93	12.43
Noviembre	131.60	14.40	21.29	7.50	69.84	12.76
Diciembre	109.20	14.05	21.53	6.56	70.61	12.91

Nota. Fuente: Adaptado de la estación metrológica Kayra

Tabla 64 Cálculo del índice de Thornthwaite

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
tmensual	15.50	13.89	14.62	12.83	13.53	10.88	11.22	12.58	12.96	13.99	14.40	14.05
Ind. de calor mensual (i)	5.54	4.70	5.08	4.17	4.51	3.24	3.40	4.04	4.23	4.75	4.96	4.78
ETP Sin corregir	66.16	57.17	61.21	51.45	55.22	41.29	43.01	50.13	52.14	57.74	59.97	58.03
N° de Horas de Luz	12.67	12.54	12.17	11.79	11.51	11.36	11.45	11.71	12.10	12.43	12.76	12.91
N° de días mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
ETP (mm/mes)	72.18	55.77	64.15	50.55	54.73	39.09	42.39	50.54	52.57	61.83	63.76	64.53
Precipitación mensual (Pi)	72.10	83.60	128.60	55.20	14.80	0.10	0.50	0.80	24.40	26.60	131.60	109.20
Pi (mm/mes) - ETPi (mm/mes)	-0.08	27.83	64.45	4.65	-39.93	-38.99	-41.89	-49.74	-28.17	-35.23	67.84	44.67
Ai: Reserva del mes	73.35	100.00	100.00	100.00	60.07	21.08	0.00	0.00	0.00	0.00	67.84	100.00
Déficit	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-20.81	-49.74	-28.17	-35.23	0.00	0.00
Excedente	0.00	1.19	64.45	4.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.51
Ind. De humedad (Ih)	0.00	2.13	100.47	9.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.39
Ind. De Aridez (Ia)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	49.10	98.42	53.59	56.98	0.00	0.00
Ind. Thornthwaite	0.00	2.13	100.47	9.21	0.00	0.00	-29.46	-59.05	-32.15	-34.19	0.00	19.39

Nota. La tabla muestra el proceso del cálculo del índice de thornwaite mensual, para ello se hace el apoyo en la teoría del balance hidrico.
Fuente: Elaboración propia

6.2 Curva SWCC (Succión matricial)

La curva de succión matricial varía de acuerdo al tipo de suelo, para nuestro estudio podemos observar la presencia de tres subtramos. Para el cálculo de la curva característica de succión del suelo primeramente obtenemos todos los parámetros necesarios y su posterior obtención del grado de saturación correspondiente a su succión matricial propio de cada subtramo.

6.2.1 Constantes y parámetros para el cálculo del modelo de regresión SWCC

El análisis de los tres subtramos necesitamos hallar el índice de plasticidad ponderado la cual fue definida en la ecuación 32. El primer subtramo presenta un índice de plasticidad ponderado de 9.49, mientras que el segundo y tercer subtramo registran valores de 1.37 y 0.39, respectivamente. Estos valores sirven como base para la determinación de las constantes de regresión $TMI-P200/wPI$ requeridas en el modelado de la succión matricial, para ello uso los valores de la Tabla 7, los cuales salieron del estudio de Zapata et al. (2009).

Tabla 65 Constantes de regresión de $TMI-P200/wPI$ por subtramos

Tramo	P200	wPI	α	β	γ	δ
Subtramo: km 0+000 - 04+000	70.70%	9.49	0.300	801.00	147.60	25.00
Subtramo: km 04+000 - 07+500	26.00%	1.37	0.300	663.50	142.50	17.50
Subtramo: km 07+500 - 10+500	14.00%	0.39	0.300	521.50	137.30	16.00

Nota. Se muestra las constantes de regresión para el cálculo de la succión matricial. Fuente: Elaboración propia

A partir de los ensayos de Proctor modificado y ensayos de gravedad específica, se procede a calcular los parámetros de condición compactada para cada subtramo.

Tabla 66 Parámetros de condición compactada por subtramos

Tramo	Wopt	$\rho_{d,max}$	Gs	θ_{opt}	S opt	θ_{sat}
Subtramo: km 0+000 - 04+000	12.46%	2.020	2.720	0.252	0.978	0.257
Subtramo: km 04+000 - 07+500	9.34%	2.155	2.680	0.201	1.027	0.196

Subtramo: km 07+500 - 10+500	9.08%	2.227	2.650	0.202	1.265	0.160
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Nota. Se muestra las condiciones de compactación. Fuente: Elaboración propia

Tabla 67 *Parámetros de la curva SWCC por tramos*

Tramo	<i>af</i>	<i>bf</i>	<i>cf</i>	<i>hr</i>
Subtramo: km 0+000 - 04+000	0.809	1.180	0.65	313.10
Subtramo: km 04+000 - 07+500	4.404	1.939	0.83	100.00
Subtramo: km 07+500 - 10+500	1.280	1.043	0.73	100.00

Nota. Se muestra las constantes de regresión para el cálculo la curva SWCC Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Modelamiento de la curva SWCC

Con los parámetros de la curva SWCC vistos en la Tabla 67 podemos armar el comportamiento del grado de saturación del suelo correspondiente a su succión matricial haciendo uso de la ecuación 36 propuesta por Fredlung y Xing, esta curva es aplicable únicamente a suelos cuya condición es encontrarse en condiciones no saturadas.

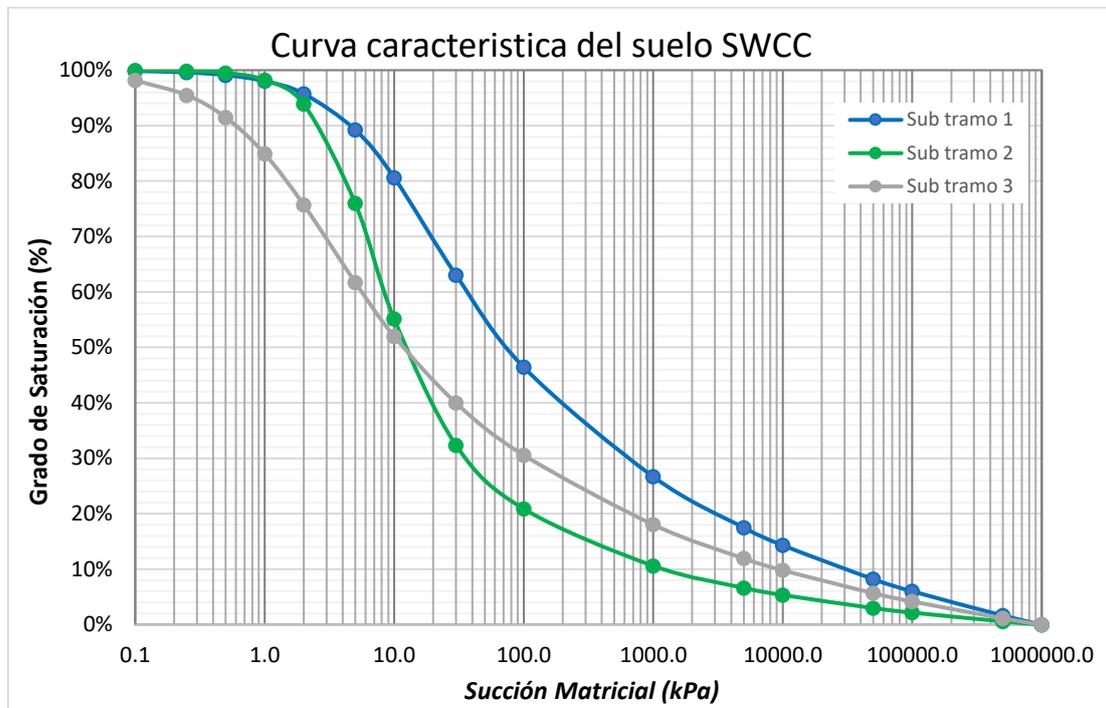
Tabla 68 *Grado de saturación correspondiente a su succión matricial*

h	Primer subtramo			Segundo subtramo			Tercer subtramo		
	C(h)	θ_w	S	C(h)	θ_w	S	C(h)	θ_w	S
0.10	1.00	0.257	99.86%	1.00	0.196	99.97%	1.00	0.157	98.17%
0.25	1.00	0.256	99.60%	1.00	0.196	99.86%	1.00	0.153	95.48%
0.50	1.00	0.255	99.11%	1.00	0.195	99.50%	1.00	0.146	91.47%
1.00	1.00	0.252	98.04%	1.00	0.192	98.23%	1.00	0.136	84.90%
2.00	1.00	0.246	95.76%	1.00	0.184	93.88%	1.00	0.121	75.71%
5.00	1.00	0.230	89.23%	0.99	0.149	75.98%	0.99	0.099	61.73%
10.00	1.00	0.207	80.62%	0.99	0.108	55.12%	0.99	0.083	52.00%
30.00	0.99	0.162	63.05%	0.97	0.063	32.36%	0.97	0.064	39.97%
100.00	0.97	0.119	46.43%	0.92	0.041	20.88%	0.92	0.049	30.57%
1000.00	0.82	0.069	26.67%	0.74	0.021	10.59%	0.74	0.029	18.03%
5000.00	0.65	0.045	17.49%	0.57	0.013	6.62%	0.57	0.019	11.94%
10000.00	0.57	0.037	14.30%	0.50	0.010	5.33%	0.50	0.016	9.80%
50000.00	0.37	0.021	8.19%	0.33	0.006	2.97%	0.33	0.009	5.66%
100000.00	0.29	0.015	6.00%	0.25	0.004	2.15%	0.25	0.007	4.16%
500000.00	0.09	0.004	1.63%	0.08	0.001	0.57%	0.08	0.002	1.14%
999999.00	0.00	0.000	0.00%	0.00	0.000	0.00%	0.00	0.000	0.00%

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura podemos apreciar como varia la curva en cada subtramo, los parámetros calculados anteriormente fueron obtenidos en base a los las constantes alcanzadas por Zapata et al. (2009) aplicadas en la ecuación propuesta por Freud y Xing (1994).

Figura 80 Curva SWCC por subtramos

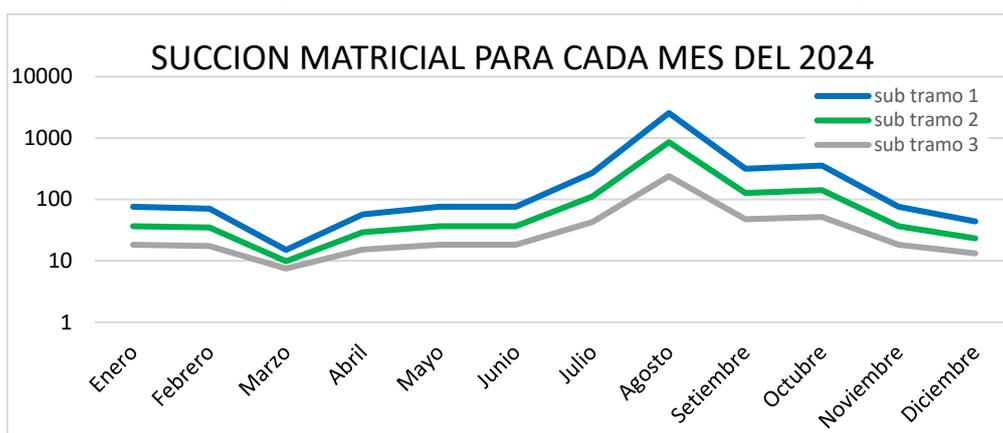


Nota. Fuente: Elaboración propia

Los valores propuestos por Zapata se emplean para estimar los factores ambientales mensuales, los cuales modifican el valor del módulo resiliente en función de las condiciones climáticas locales, específicamente la precipitación y la temperatura en la región de Cusco. Durante los meses con alta pluviosidad, se observa una disminución en el módulo resiliente, efecto que es cuantificado mediante dichos factores dentro del modelo.

En la siguiente figura se muestra la succión estimada para cada mes, estimada en función del TMI mensual (Tabla 64), para los datos obtenidos del año 2024.

Figura 81 *Succión matricial para cada mes bajo las constantes halladas por Zapata*



Nota. Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos a partir de los modelos se presentan en la siguiente tabla, donde se expone la succión matricial estimada en función del Índice de Humedad del Terreno (TMI). A partir de esta succión, y utilizando el modelo indirecto de Witczak et al. (2007) para el cálculo de la succión matricial (ecuación 31) y luego se halla la curva característica suelo-agua de Fredlund y Xing (ecuación 36), se procede a calcular el contenido volumétrico de agua y el grado de saturación mensual, en función de las propiedades del suelo analizado para cada subtramo.

Tabla 69 *Grado de saturación por tramos para el año 2024*

	Subtramo: km 0+000 – 04+000			Subtramo: km 04+000 – 07+500			Subtramo: km 07+500 – 10+500		
	h	θ_w	S (%)	h	θ_w	S (%)	h	θ_w	S (%)
Ene	75.73	0.128	49.77	36.82	0.058	29.75	18.19	0.072	44.94
Feb	70.66	0.130	50.64	34.73	0.060	30.46	17.43	0.073	45.40
Mar	15.08	0.191	74.27	9.85	0.109	55.54	7.49	0.089	55.87
Abr	57.11	0.138	53.46	29.05	0.064	32.81	15.34	0.075	46.81
May	75.73	0.128	49.77	36.82	0.058	29.75	18.19	0.072	44.94
Jun	75.73	0.128	49.77	36.82	0.058	29.75	18.19	0.072	44.94
Jul	271.55	0.094	36.50	111.48	0.040	20.16	42.59	0.059	36.92
Ag	2552.24	0.054	21.00	856.68	0.022	11.07	240.03	0.040	25.16
Set	316.79	0.091	35.19	127.84	0.038	19.32	47.57	0.058	36.02
Oct	357.74	0.088	34.19	142.49	0.037	18.68	51.96	0.056	35.32
Nov	75.73	0.128	49.77	36.82	0.058	29.75	18.19	0.072	44.94
Dic	43.84	0.147	57.22	23.33	0.071	36.14	13.17	0.078	48.59

Nota. Fuente: Elaboración propia

6.3 Ensayo de Modulo de Resiliencia

Para el cálculo del módulo de resiliencia se realizó pruebas de laboratorio, bajo la normativa AASHTO T 307-99 (2012), las muestras fueron remoldeadas con una MDS al 95% y con el contenido óptimo de humedad, a partir de este punto fueron sometidas a distintas variaciones de contenido de agua para ver su comportamiento en ellas, para disminuir el contenido de humedad las muestras fueron secadas al aire, mientras para incrementar el contenido de humedad se utilizó el equipo de *Flowtrac-II*, permitiéndonos saturar las muestras.

En el primer subtramo, las muestras fueron ensayadas con un rango de variación del contenido de humedad comprendido entre 2.8 % y 18.5 %. Para el segundo subtramo, dicho rango osciló entre 1.5 % y 14.05 %. En el caso del tercer subtramo, debido a la naturaleza gravosa del suelo y a la presencia de partículas de gran tamaño, no fue posible ejecutar el ensayo correspondiente.

6.3.1 Primer Subtramo

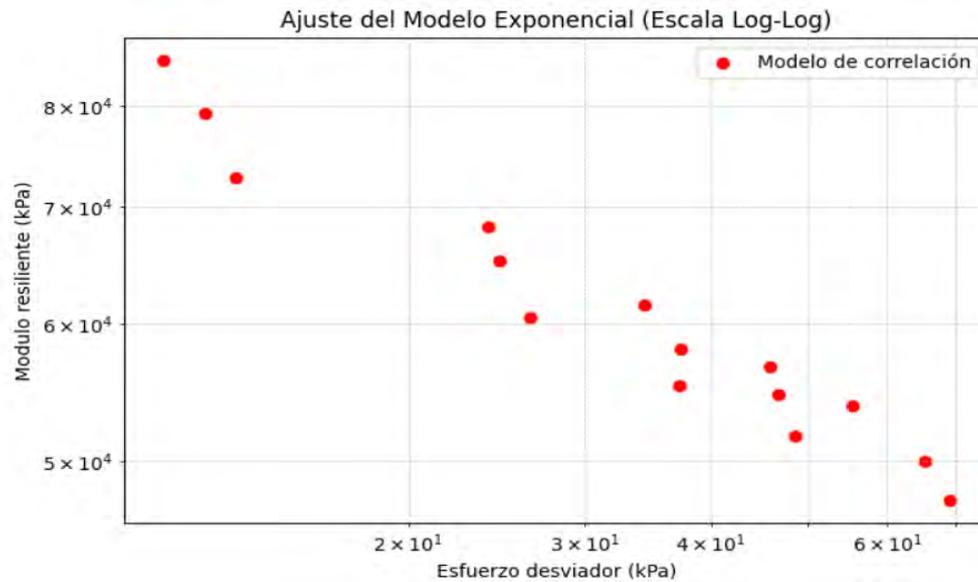
Contenido de humedad óptimo

Tabla 70 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: opt$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	11.4200	135.62	0.013	97449
2	41.40	27.60	24.0400	148.24	0.040	60427
3	41.40	41.40	34.3800	158.58	0.063	58137
4	41.40	55.20	45.8600	170.06	0.083	56611
5	41.40	68.90	55.3600	179.56	0.109	50981
6	27.60	13.80	12.5600	95.36	0.016	76452
7	27.60	27.60	24.6800	107.48	0.043	58576
8	27.60	41.40	37.3600	120.16	0.070	54171
9	27.60	55.20	46.7000	129.50	0.087	53855
10	27.60	68.90	65.2200	148.02	0.128	51201
11	13.80	13.80	13.4600	54.86	0.020	68918
12	13.80	27.60	26.4200	67.82	0.043	61009
13	13.80	41.40	37.2000	78.60	0.067	59419
14	13.80	55.20	48.6000	90.00	0.086	56472
15	13.80	68.90	69.1400	110.54	0.121	57074

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido óptimo de humedad. Fuente: Elaboración propia

Figura 82 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: opt$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador.
Fuente: Elaboración propia

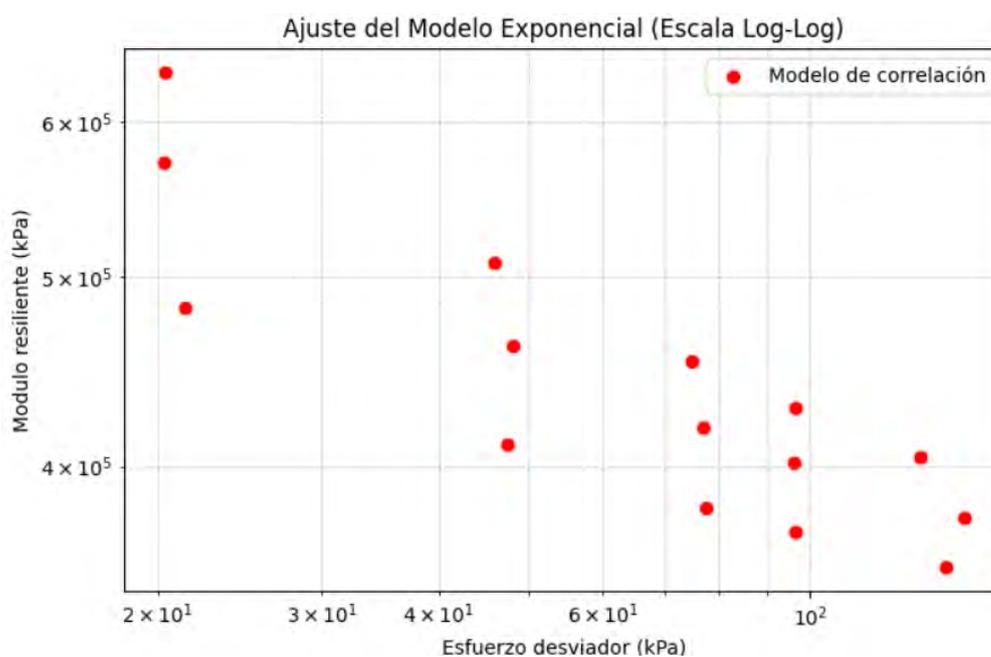
Contenido de humedad 2.80 %

Tabla 71 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 2.80$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	20.3600	144.56	0.004	570080
2	41.40	27.60	45.8600	170.06	0.011	496915
3	41.40	41.40	74.7000	198.90	0.018	428025
4	41.40	55.20	96.4200	220.62	0.025	387806
5	41.40	68.90	131.5292	255.73	0.031	428235
6	27.60	13.80	20.3200	103.12	0.003	711200
7	27.60	27.60	48.1200	130.92	0.011	449120
8	27.60	41.40	76.8200	159.62	0.018	463455
9	27.60	55.20	96.1800	178.98	0.024	407476
10	27.60	68.90	146.3400	229.14	0.037	399979
11	13.80	13.80	21.3800	62.78	0.005	427600
12	13.80	27.60	47.4600	88.86	0.013	408692
13	13.80	41.40	77.3600	118.76	0.024	328194
14	13.80	55.20	96.5400	137.94	0.025	391231
15	13.80	68.90	139.8800	181.28	0.039	360847

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 2.80%. Fuente: Elaboración propia

Figura 83 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 2.80$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador.

Fuente: Elaboración propia

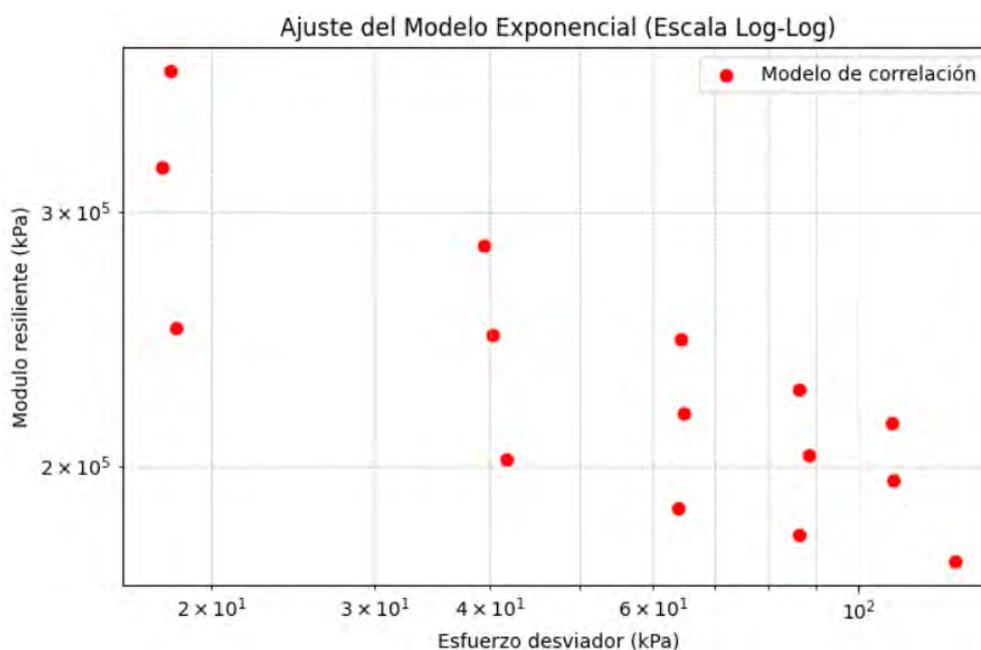
Contenido de humedad 4.47%

Tabla 72 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 4.47$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	18.0800	142.28	0.006	412449
2	41.40	27.60	39.3600	163.56	0.015	285300
3	41.40	41.40	64.2400	188.44	0.027	236674
4	41.40	55.20	86.3800	210.58	0.040	218297
5	41.40	68.90	108.5800	232.78	0.054	200016
6	27.60	13.80	17.7000	100.50	0.006	275333
7	27.60	27.60	40.2000	123.00	0.016	244696
8	27.60	41.40	64.7600	147.56	0.031	211158
9	27.60	55.20	88.4400	171.24	0.052	188341
10	27.60	68.90	109.2600	192.06	0.056	196161
11	13.80	13.80	18.3000	59.70	0.007	256200
12	13.80	27.60	41.7200	83.12	0.020	208600
13	13.80	41.40	63.8600	105.26	0.034	188541
14	13.80	55.20	86.2400	127.64	0.043	202952
15	13.80	68.90	127.1800	168.58	0.069	197312

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 4.47%. Fuente: Elaboración propia

Figura 84 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 4.47$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador.
Fuente: Elaboración propia

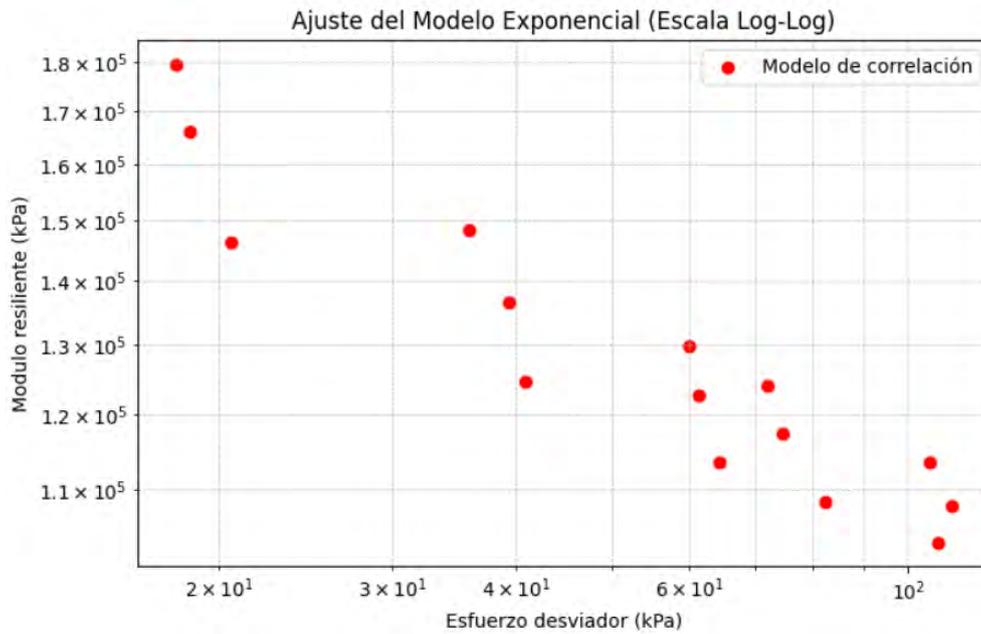
Contenido de humedad 8.63 %

Tabla 73 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 8.63$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	19.5600	143.76	0.008	266947
2	41.40	27.60	41.2400	165.44	0.025	171227
3	41.40	41.40	62.9800	187.18	0.042	151165
4	41.40	55.20	83.0200	207.22	0.058	144059
5	41.40	68.90	120.4000	244.60	0.090	134473
6	27.60	13.80	20.2800	103.08	0.010	211363
7	27.60	27.60	41.2800	124.08	0.027	159326
8	27.60	41.40	67.5800	150.38	0.055	124216
9	27.60	55.20	85.6800	168.48	0.062	139158
10	27.60	68.90	125.3200	208.12	0.085	147284
11	13.80	13.80	19.6000	61.00	0.013	156302
12	13.80	27.60	42.5200	83.92	0.033	131944
13	13.80	41.40	66.7200	108.12	0.046	148617
14	13.80	55.20	85.9600	127.36	0.060	144140
15	13.80	68.90	124.7200	166.12	0.083	149982

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 8.63%. Fuente: Elaboración propia

Figura 85 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 8.63$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador.
Fuente: Elaboración propia

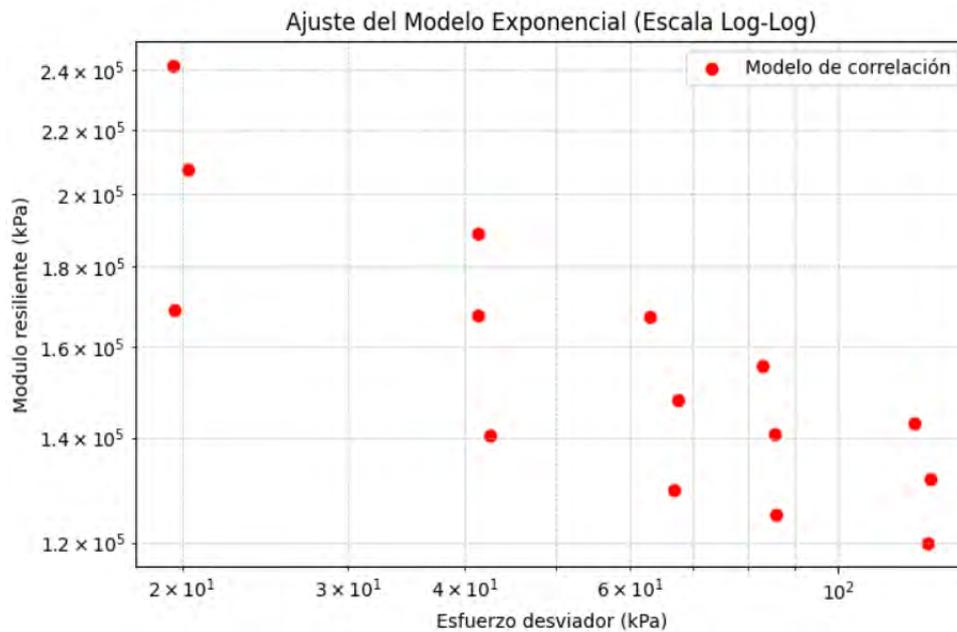
Contenido de humedad 9.38 %

Tabla 74 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 9.38$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	19.5600	143.76	0.008	266947
2	41.40	27.60	41.2400	165.44	0.025	171227
3	41.40	41.40	62.9800	187.18	0.042	151165
4	41.40	55.20	83.0200	207.22	0.058	144059
5	41.40	68.90	120.4000	244.60	0.090	134473
6	27.60	13.80	20.2800	103.08	0.010	211363
7	27.60	27.60	41.2800	124.08	0.027	159326
8	27.60	41.40	67.5800	150.38	0.055	124216
9	27.60	55.20	85.6800	168.48	0.062	139158
10	27.60	68.90	125.3200	208.12	0.085	147284
11	13.80	13.80	19.6000	61.00	0.013	156302
12	13.80	27.60	42.5200	83.92	0.033	131944
13	13.80	41.40	66.7200	108.12	0.046	148617
14	13.80	55.20	85.9600	127.36	0.060	144140
15	13.80	68.90	124.7200	166.12	0.083	149982

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 9.38%. Fuente: Elaboración propia

Figura 86 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 9.38$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador.
Fuente: Elaboración propia

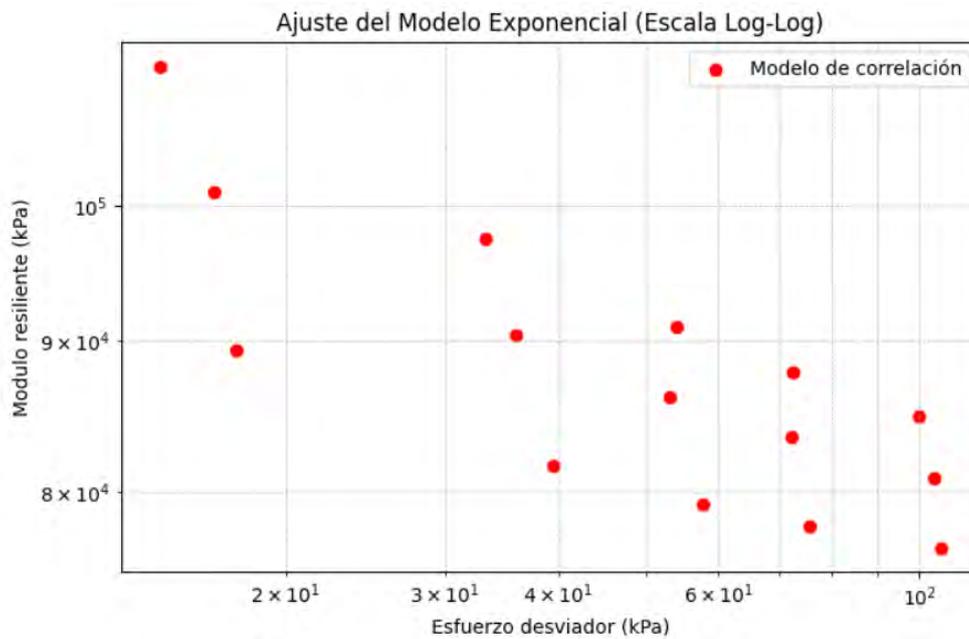
Contenido de humedad 11.27 %

Tabla 75 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 11.27$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	14.5600	138.76	0.010	145600
2	41.40	27.60	33.2200	157.42	0.041	80186
3	41.40	41.40	54.0200	178.22	0.077	70026
4	41.40	55.20	72.5200	196.72	0.109	66358
5	41.40	68.90	99.6800	223.88	0.101	98276
6	27.60	13.80	16.6600	99.46	0.022	79502
7	27.60	27.60	35.8600	118.66	0.038	95632
8	27.60	41.40	53.1000	135.90	0.079	67226
9	27.60	55.20	72.2000	155.00	0.082	87947
10	27.60	68.90	103.8600	186.66	0.110	94448
11	13.80	13.80	17.6600	59.06	0.018	98896
12	13.80	27.60	39.5000	80.90	0.059	66708
13	13.80	41.40	57.6400	99.04	0.074	78346
14	13.80	55.20	75.6800	117.08	0.077	98396
15	13.80	68.90	105.5400	146.94	0.114	92883

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 11.27%. Fuente: Elaboración propia

Figura 87 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 11.27$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador.
Fuente: Elaboración propia

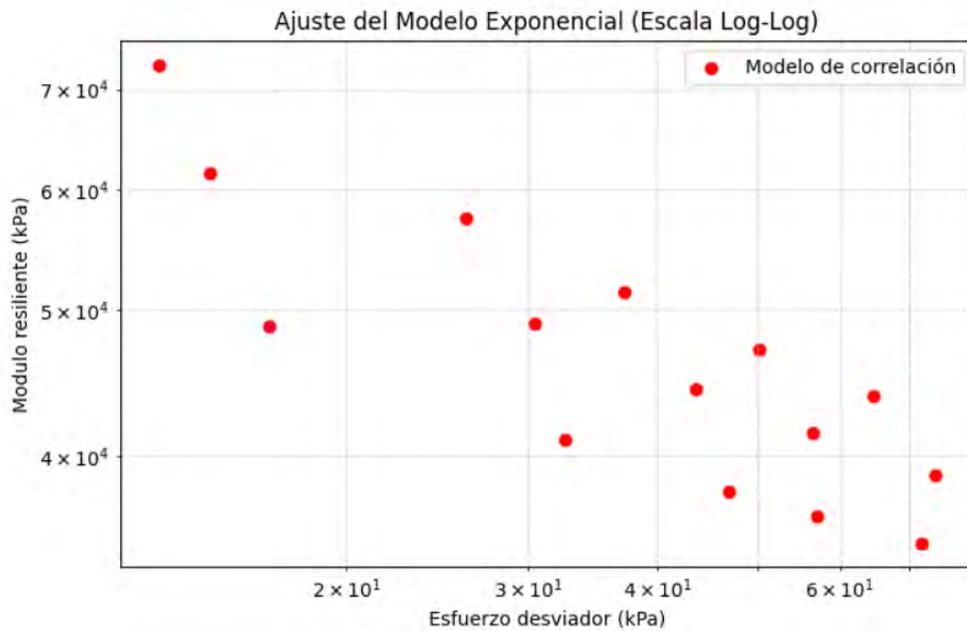
Contenido de humedad 14.50 %

Tabla 76 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 14.50$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	13.1800	137.38	0.018	73612
2	41.40	27.60	26.0600	150.26	0.046	58280
3	41.40	41.40	37.1000	161.30	0.083	44912
4	41.40	55.20	50.0800	174.28	0.094	53265
5	41.40	68.90	64.6200	188.82	0.180	36010
6	27.60	13.80	14.7400	97.54	0.025	60230
7	27.60	27.60	30.4600	113.26	0.058	52647
8	27.60	41.40	43.5200	126.32	0.090	48508
9	27.60	55.20	56.5200	139.32	0.122	46290
10	27.60	68.90	74.1800	156.98	0.196	38052
11	13.80	13.80	16.8200	58.22	0.036	46173
12	13.80	27.60	32.5200	73.92	0.081	40300
13	13.80	41.40	46.8400	88.24	0.113	41419
14	13.80	55.20	57.1000	98.50	0.169	33873
15	13.80	68.90	72.0200	113.42	0.217	33126

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 14.50%. Fuente: Elaboración propia

Figura 88 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 14.50$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador.
Fuente: Elaboración propia

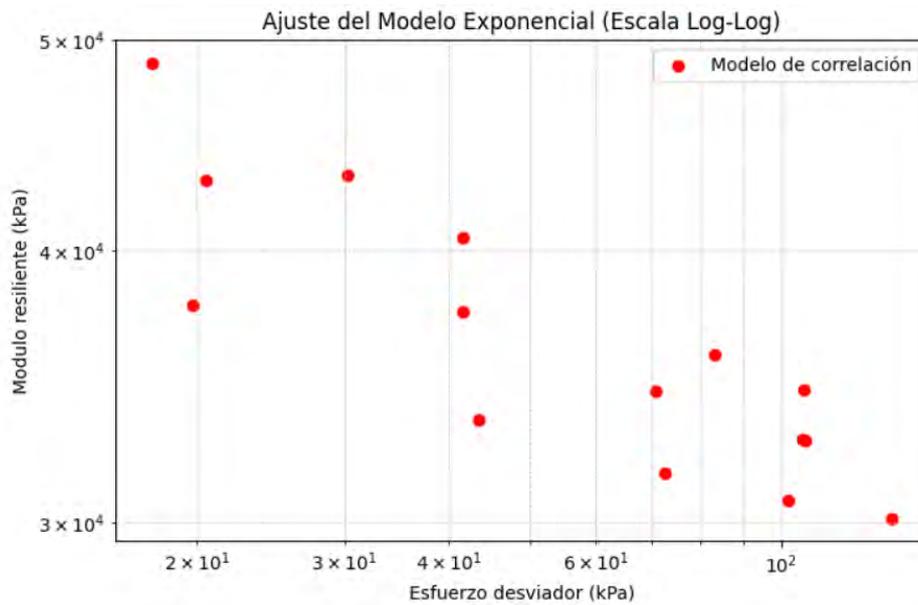
Contenido de humedad 18.50 %

Tabla 77 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 18.50$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	17.6800	141.88	0.038	47124
2	41.40	27.60	30.2200	154.42	0.068	44330
3	41.40	41.40	41.6600	165.86	0.103	40934
4	41.40	55.20	83.3400	207.54	0.236	35329
5	41.40	68.90	106.3800	230.58	0.331	32241
6	27.60	13.80	20.5000	103.30	0.047	43485
7	27.60	27.60	41.6400	124.44	0.104	40040
8	27.60	41.40	70.6600	153.46	0.190	37326
9	27.60	55.20	106.7800	189.58	0.295	36121
10	27.60	68.90	106.0200	188.82	0.337	31642
11	13.80	13.80	19.7400	61.14	0.054	36545
12	13.80	27.60	43.4200	84.82	0.127	34170
13	13.80	41.40	72.6000	114.00	0.257	28199
14	13.80	55.20	101.7200	143.12	0.304	33421
15	13.80	68.90	135.4400	176.84	0.511	26487

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 18.50%. Fuente: Elaboración propia

Figura 89 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 18.50$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador.
Fuente: Elaboración propia

Resumen Consolidado del módulo de resiliencia en el primer subtramo

Tabla 78 Ecuación constitutiva del primer subtramo respecto al contenido de humedad

$w\%$	Ecuación constitutiva
2.8	$M_R = 4884.53 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.312} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.338}$
4.47	$M_R = 2171.19 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.465} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.44}$
8.63	$M_R = 1493.87 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.199} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.314}$
9.38	$M_R = 1549.96 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.418} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.411}$
11.27	$M_R = 1034.08 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.215} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.196}$
12.5	$M_R = 658.41 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.116} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.311}$
14.5	$M_R = 436.62 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.355} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.389}$
18.5	$M_R = 409.18 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.269} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.266}$

Nota. Fuente: Elaboración propia

6.3.2 Segundo Subtramo

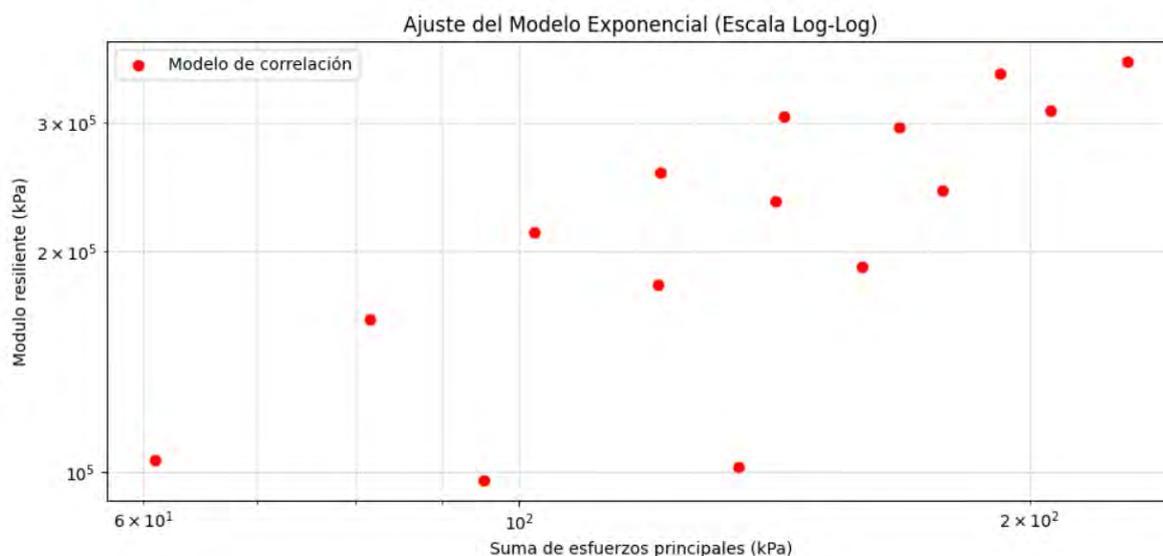
Contenido de humedad óptimo

Tabla 79 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: opt$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	10.5000	134.70	0.012	84000
2	41.40	27.60	35.0000	159.20	0.022	163354
3	41.40	41.40	53.3400	177.54	0.035	154393
4	41.40	55.20	81.3800	205.58	0.033	249328
5	41.40	68.90	103.9000	228.10	0.032	325809
6	27.60	13.80	12.4600	95.26	0.014	94206
7	27.60	27.60	37.9800	120.78	0.021	184891
8	27.60	41.40	58.7800	141.58	0.021	275630
9	27.60	55.20	84.7400	167.54	0.028	308766
10	27.60	68.90	109.2800	192.08	0.019	215382
11	13.80	13.80	19.6000	61.00	0.018	112480
12	13.80	27.60	40.1800	81.58	0.033	123543
13	13.80	41.40	60.6200	102.02	0.027	232092
14	13.80	55.20	79.6600	121.06	0.043	187136
15	13.80	68.90	101.9400	143.34	0.032	324029

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido óptimo de humedad. Fuente: Elaboración propia

Figura 90 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: opt$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia

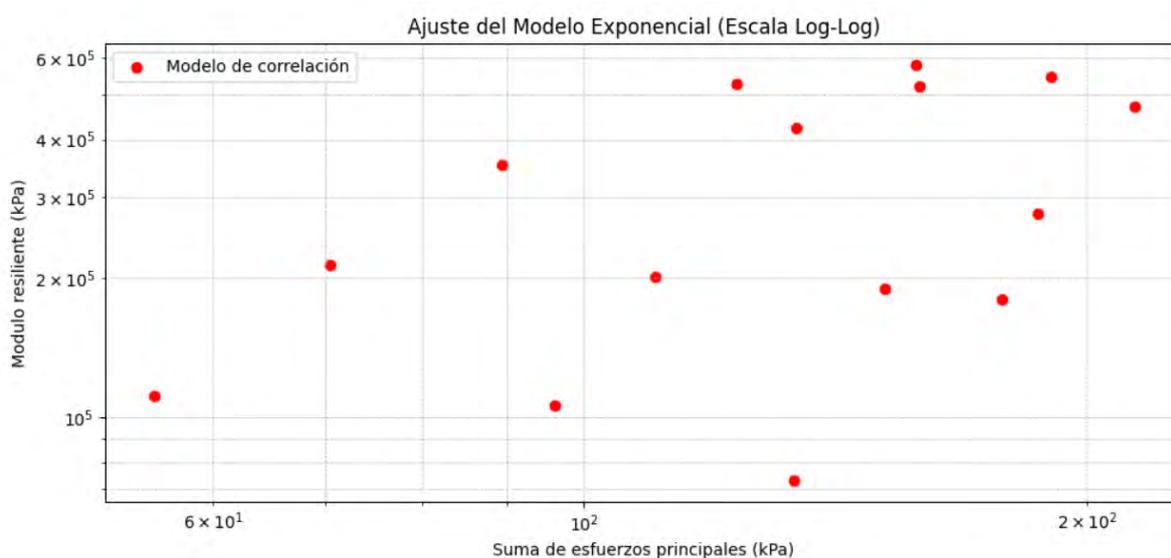
Contenido de humedad 1.50%

Tabla 80 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 1.50$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	9.4600	133.66	0.013	72769
2	41.40	27.60	27.1400	151.34	0.015	190025
3	41.40	41.40	53.5800	177.78	0.030	179869
4	41.40	55.20	62.7600	186.96	0.023	276062
5	41.40	68.90	89.2600	213.46	0.019	469789
6	27.60	13.80	13.3000	96.10	0.012	106400
7	27.60	27.60	27.5000	110.30	0.014	202046
8	27.60	41.40	51.1800	133.98	0.014	423973
9	27.60	55.20	75.9200	158.72	0.015	520766
10	27.60	68.90	107.6600	190.46	0.020	547079
11	13.80	13.80	13.8800	55.28	0.013	111040
12	13.80	27.60	29.1200	70.52	0.014	213638
13	13.80	41.40	48.0000	89.40	0.014	352691
14	13.80	55.20	81.9200	123.32	0.015	528516
15	13.80	68.90	116.5000	157.90	0.020	581496

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 1.50%. Fuente: Elaboración propia

Figura 91 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 1.50$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia

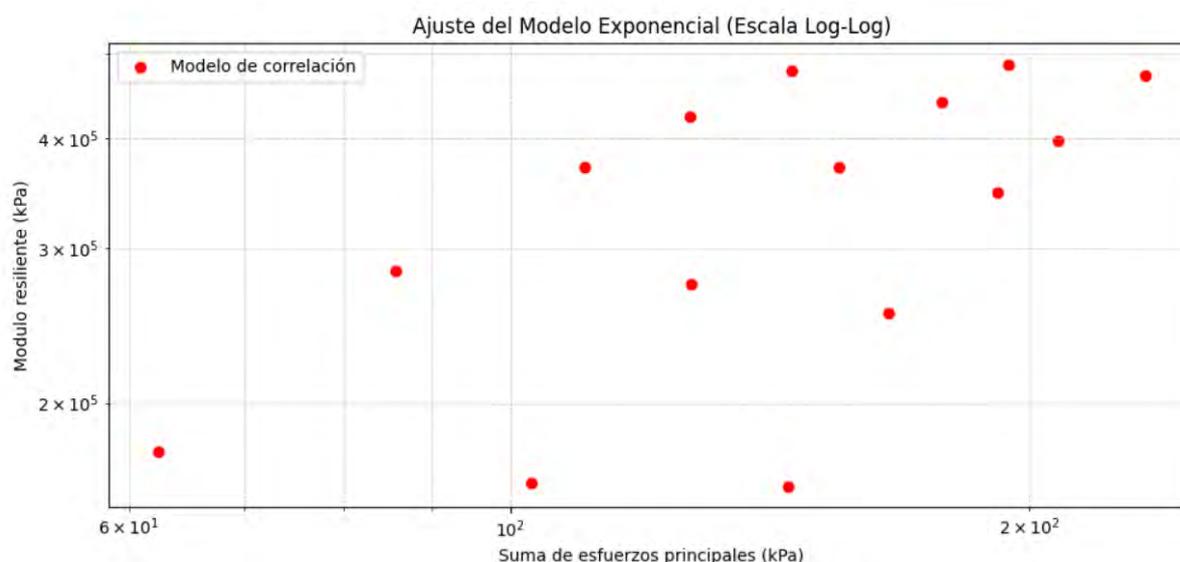
Contenido de humedad 2.41%

Tabla 81 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 2.41$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	20.8000	145.00	0.010	212000
2	41.40	27.60	41.5800	165.78	0.015	286771
3	41.40	41.40	67.6000	191.80	0.020	338000
4	41.40	55.20	83.6800	207.88	0.020	418875
5	41.40	68.90	109.5600	233.76	0.027	409972
6	27.60	13.80	19.9600	102.76	0.014	147747
7	27.60	27.60	44.5800	127.38	0.019	234632
8	27.60	41.40	72.2400	155.04	0.023	316308
9	27.60	55.20	95.0800	177.88	0.020	474153
10	27.60	68.90	111.6200	194.42	0.022	525626
11	13.80	13.80	20.9800	62.38	0.013	161385
12	13.80	27.60	44.2800	85.68	0.017	270923
13	13.80	41.40	68.9600	110.36	0.019	362947
14	13.80	55.20	85.6000	127.00	0.018	487935
15	13.80	68.90	104.2400	145.64	0.023	453217

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 2.41%. Fuente: Elaboración propia

Figura 92 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 2.41$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia

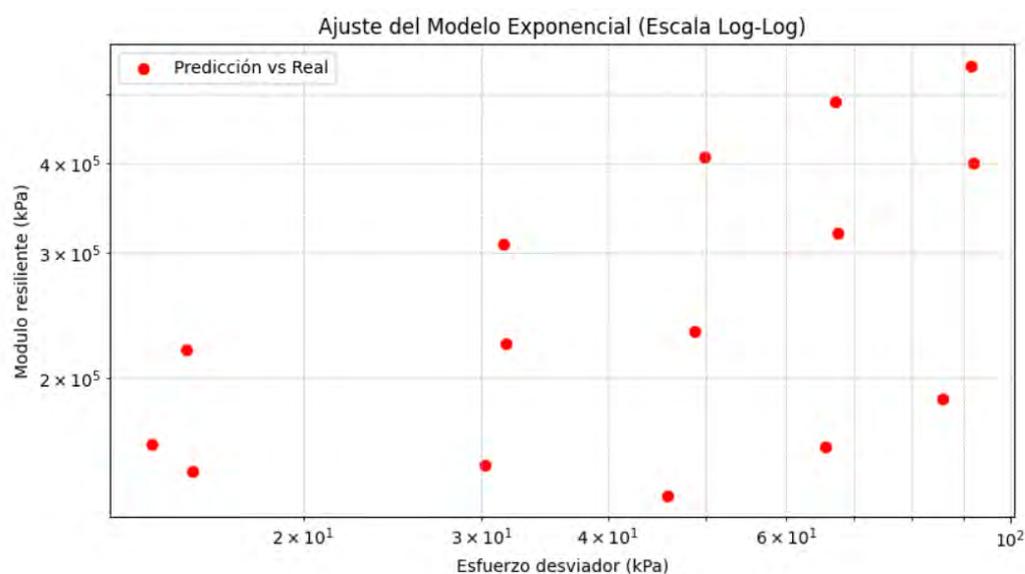
Contenido de humedad 4.04%

Tabla 82 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 4.04$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	15.3400	139.54	0.007	219148
2	41.40	27.60	31.5100	155.71	0.011	308594
3	41.40	41.40	49.9220	174.12	0.014	409051
4	41.40	55.20	67.0840	191.28	0.015	487380
5	41.40	68.90	91.5260	215.73	0.017	548643
6	27.60	13.80	15.5500	98.35	0.011	148095
7	27.60	27.60	31.6980	114.50	0.015	223654
8	27.60	41.40	48.8040	131.60	0.022	232692
9	27.60	55.20	67.5380	150.34	0.022	319774
10	27.60	68.90	91.9620	174.76	0.024	400421
11	13.80	13.80	14.1540	55.55	0.009	162057
12	13.80	27.60	30.2780	71.68	0.020	151390
13	13.80	41.40	45.8260	87.23	0.034	137307
14	13.80	55.20	65.6280	107.03	0.041	160347
15	13.80	68.90	85.6280	127.03	0.046	187192

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 4.04%. Fuente: Elaboración propia

Figura 93 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 4.04$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia

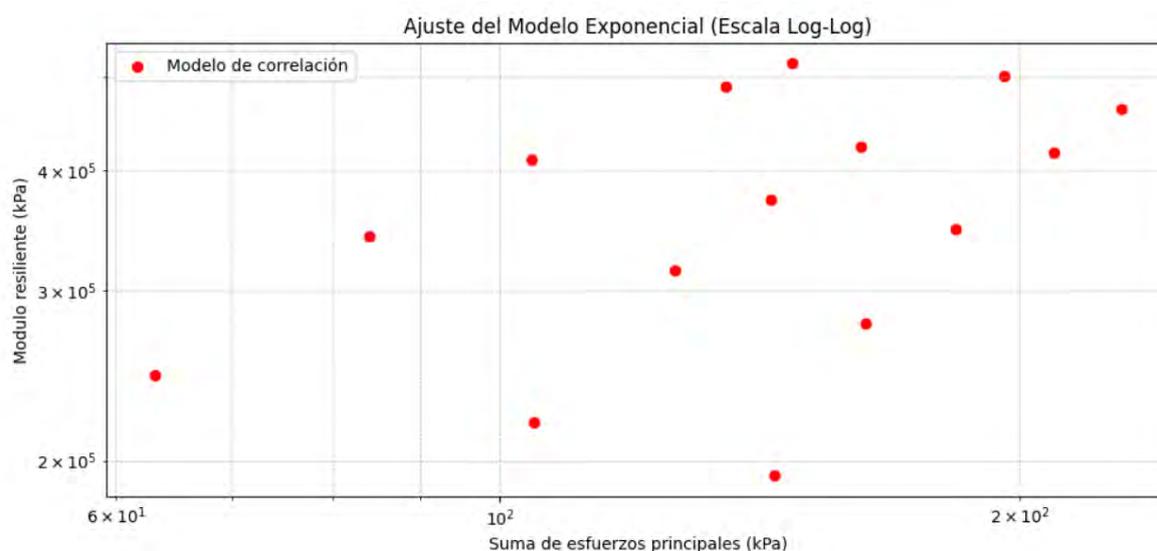
Contenido de humedad 5.93 %

Tabla 83 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 5.93$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	19.9200	144.12	0.007	284571
2	41.40	27.60	38.6200	162.82	0.022	193399
3	41.40	41.40	59.3800	183.58	0.019	312526
4	41.40	55.20	84.9400	209.14	0.023	373327
5	41.40	68.90	104.9000	229.10	0.023	485017
6	27.60	13.80	21.8600	104.66	0.013	168154
7	27.60	27.60	43.4400	126.24	0.015	300884
8	27.60	41.40	60.8400	143.64	0.018	347657
9	27.60	55.20	78.9000	161.70	0.014	567377
10	27.60	68.90	113.0200	195.82	0.020	564223
11	13.80	13.80	21.7400	63.14	0.011	197636
12	13.80	27.60	42.6800	84.08	0.011	438129
13	13.80	41.40	63.0000	104.40	0.015	422866
14	13.80	55.20	93.8800	135.28	0.019	520645
15	13.80	68.90	106.3200	147.72	0.030	357522

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 5.93%. Fuente: Elaboración propia

Figura 94 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 5.93$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia

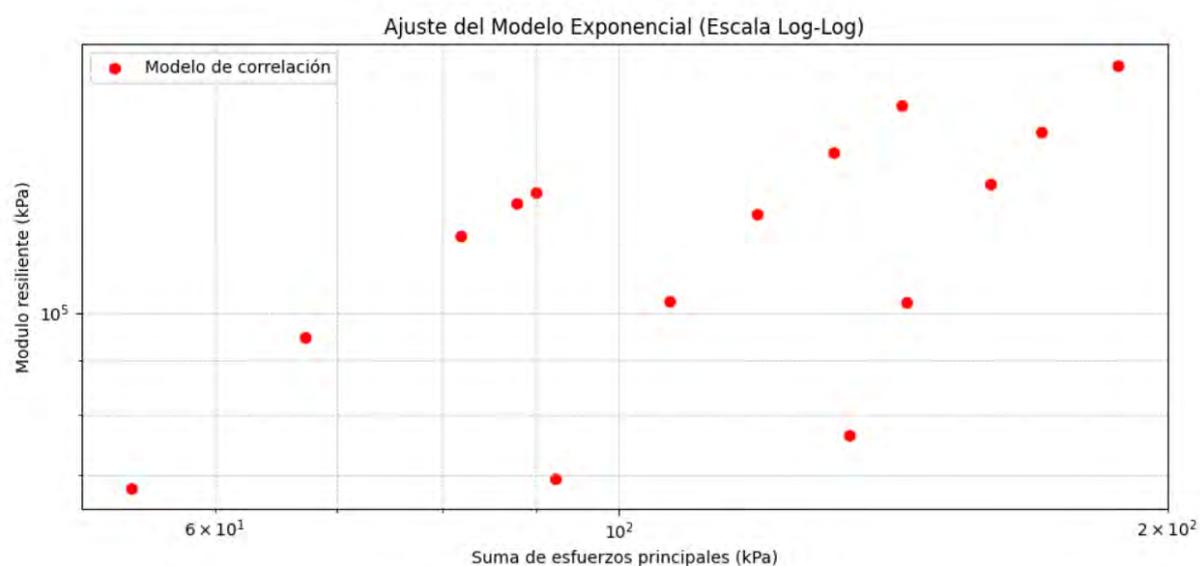
Contenido de humedad 9.97 %

Tabla 84 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 9.97$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	9.6400	133.84	0.013	74154
2	41.40	27.60	19.6200	143.82	0.013	156960
3	41.40	41.40	35.7600	159.96	0.026	137774
4	41.40	55.20	46.4000	170.60	0.029	159379
5	41.40	68.90	63.7200	187.92	0.039	162506
6	27.60	13.80	9.4800	92.28	0.014	68211
7	27.60	27.60	23.8000	106.60	0.027	71583
8	27.60	41.40	36.2000	119.00	0.029	123566
9	27.60	55.20	48.4400	131.24	0.030	162815
10	27.60	68.90	60.1000	142.90	0.042	144867
11	13.80	13.80	12.5600	53.96	0.019	66105
12	13.80	27.60	25.8000	67.20	0.023	113629
13	13.80	41.40	40.5000	81.90	0.039	104919
14	13.80	55.20	48.6600	90.06	0.038	128053
15	13.80	68.90	46.4800	87.88	0.052	89453

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 9.97%. Fuente: Elaboración propia

Figura 95 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 9.97$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia.

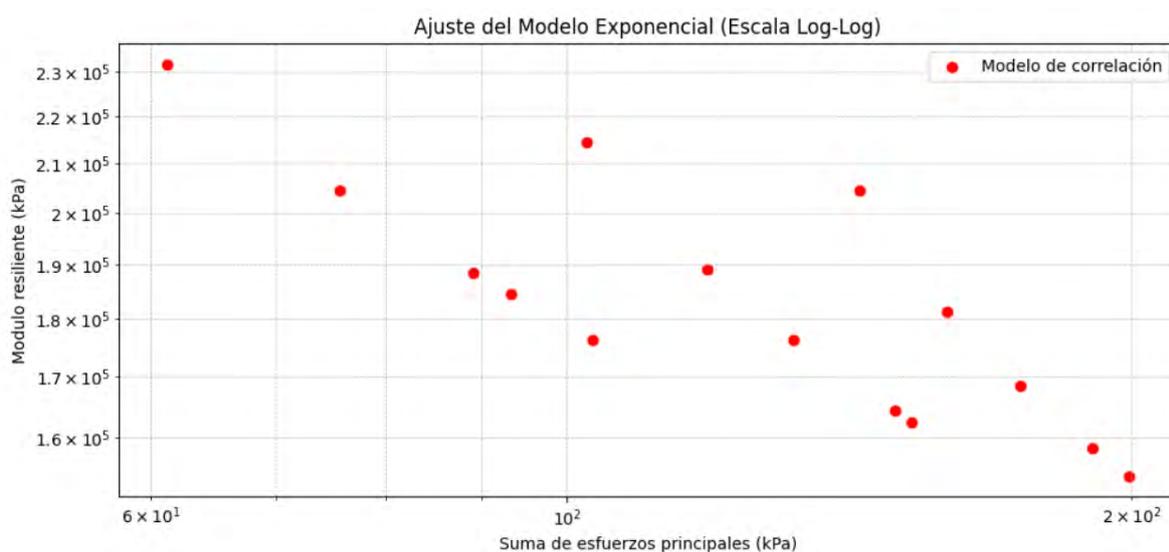
Contenido de humedad 12.35 %

Tabla 85 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 12.35$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	19.1200	143.32	0.013	147077
2	41.40	27.60	35.3400	159.54	0.020	176394
3	41.40	41.40	50.2600	174.46	0.031	165040
4	41.40	55.20	66.4200	190.62	0.038	176360
5	41.40	68.90	75.1200	199.32	0.043	174598
6	27.60	13.80	19.5800	102.38	0.011	207941
7	27.60	27.60	36.0600	118.86	0.014	266225
8	27.60	41.40	49.3000	132.10	0.022	232776
9	27.60	55.20	66.7800	149.58	0.041	164111
10	27.60	68.90	69.8400	152.64	0.048	147907
11	13.80	13.80	19.8200	61.22	0.008	247750
12	13.80	27.60	34.2800	75.68	0.014	252947
13	13.80	41.40	47.7800	89.18	0.034	140811
14	13.80	55.20	51.9200	93.32	0.037	142246
15	13.80	68.90	61.7400	103.14	0.053	116693

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 12.35%. Fuente: Elaboración propia

Figura 96 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 12.35$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia

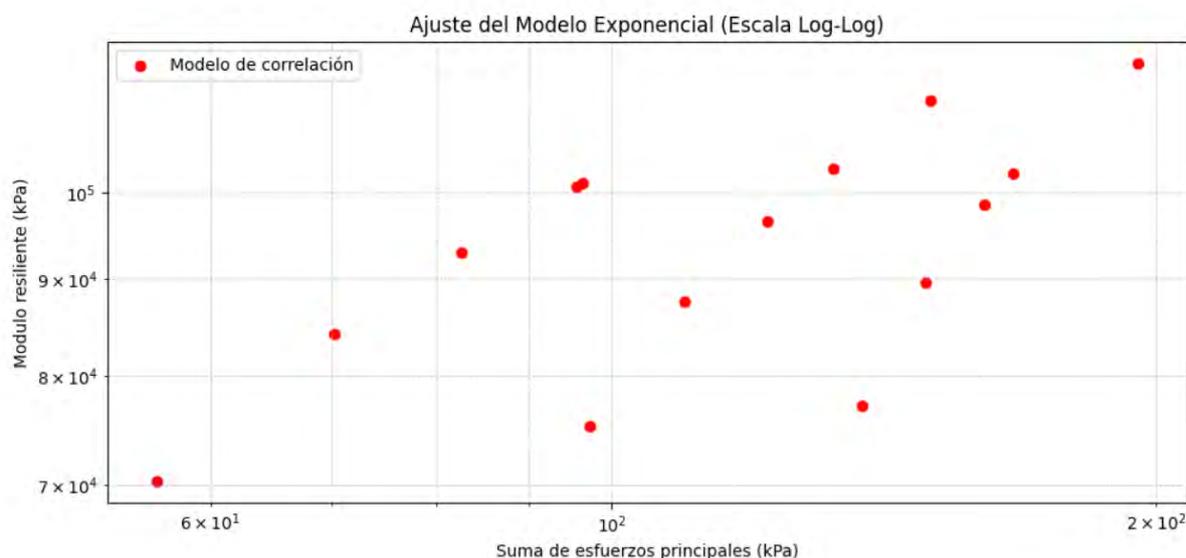
Contenido de humedad 14.05 %

Tabla 86 Resumen de datos del ensayo de módulo de resiliencia ($w\%: 14.05$)

Nro ciclo	Presión de Confinamiento S3	Esfuerzo desviador máximo Teórico	Esfuerzo desviador máximo aplicado	Suma de esfuerzos principales	Deformación resiliente media	Módulo resiliente medio
	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa
1	41.40	13.80	13.3400	137.54	0.013	109750
2	41.40	27.60	24.9200	149.12	0.026	97725
3	41.40	41.40	36.5600	160.76	0.045	80938
4	41.40	55.20	42.4600	166.66	0.039	108694
5	41.40	68.90	71.1600	195.36	0.047	158646
6	27.60	13.80	14.5000	97.30	0.015	96429
7	27.60	27.60	26.8600	109.66	0.028	97490
8	27.60	41.40	39.1000	121.90	0.043	91325
9	27.60	55.20	49.8400	132.64	0.042	119742
10	27.60	68.90	67.1000	149.90	0.051	132338
11	13.80	13.80	14.6400	56.04	0.014	104571
12	13.80	27.60	28.8600	70.26	0.027	109226
13	13.80	41.40	41.1800	82.58	0.045	93621
14	13.80	55.20	54.9200	96.32	0.045	123099
15	13.80	68.90	54.2800	95.68	0.051	108247

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo de módulo de resiliencia para un suelo compactado al 95% y con un contenido de humedad del 14.05%. Fuente: Elaboración propia

Figura 97 Grafica del modelo de correlación del módulo de resiliencia ($w\%: 14.05$)



Nota. La figura muestra los valores del módulo de resiliencia vs el esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia

Resumen Consolidado del módulo de resiliencia en el segundo subtramo

Tabla 87 Ecuación constitutiva del segundo subtramo respecto al contenido de humedad

%w	Ecuación constitutiva
1.5	$M_R = 8074.66 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.418} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.922}$
2.41	$M_R = 5669.16 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.1} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.676}$
4.04	$M_R = 1412.37 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{1.501} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.046}$
5.93	$M_R = 6933.68 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.228} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.591}$
9.46	$M_R = 3113.61 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.091} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.508}$
9.97	$M_R = 1839.32 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.328} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.37}$
12.35	$M_R = 2699.96 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.155} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.17}$
14.05	$M_R = 1711.11 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.077} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.171}$

Nota. Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 7 : ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos en el marco de la investigación. Los ensayos fueron ejecutados en su totalidad sobre muestras recolectadas en la carretera San Jerónimo a Paruro tramo 0+000 – 10+500 KM.

7.1 Propiedades físicas del suelo

7.1.1 Clasificación de suelos y límites de consistencia

En la Tabla 88 se presenta los resultados correspondientes al porcentaje de material que pasa por el tamiz N.º 200, parámetro fundamental para la clasificación del suelo conforme al sistema SUCS, según la norma NTP 339.135. Asimismo, se consignan los valores obtenidos del límite líquido (LL) y del índice de plasticidad (IP). El procedimiento de ensayo y la aplicación del método se describen detalladamente en el Capítulo IV, sección 4.11.1 (Análisis Granulométrico de Suelos Por Tamizado MTC E 107).

Tabla 88 *Análisis granulométrico por tamizado de todas las calicatas*

CALICATA	PORCENTAJE (%) QUE PASA EL TAMIZ N° 200	LIMITE LIQUIDO LL (%)	INDICE DE PLASCTICIDA D IP (%)	CLASIFICACIO N POR METODO SUCS
C- 1	73.89	23.95	11.38	CL
C- 2	64.04	23.99	10.88	CL
C- 3	76.09	34.89	18.01	CL
C- 4	27.31	24.63	6.35	SC-SM
C- 5	22.47	23.09	4.42	SC-SM
C- 6	28.17	25.20	4.68	SC-SM
C- 7	27.9	24.78	5.58	SC-SM
C- 8	24.55	26.88	2.88	GM
C- 9	19.27	20.68	2.35	GM
C- 10	14.51	26.26	3.04	GM

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 89 se presenta los resultados obtenidos de los ensayos de límites de consistencia, los cuales son considerados como parámetros fundamentales para la clasificación del suelo según el sistema AASHTO.

Tabla 89 Límites de consistencia y clasificación por método AASHTO

CALICATA	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE DE PLASTICIDAD (%)	CLASIFICACION POR METODO AASHTO
C - 1	23.95	12.58	11.38	A-4 (3)
C - 2	23.99	13.11	10.88	A-6 (4)
C - 3	34.89	16.88	18.01	A-6 (12)
C - 4	24.63	18.28	6.35	A-2-4 (0)
C - 5	23.09	18.67	4.42	A-2-4 (0)
C - 6	25.20	20.52	4.68	A-2-4 (0)
C - 7	24.78	19.20	5.58	A-2-4 (0)
C - 8	26.88	24.01	2.88	A-1-b (0)
C - 9	20.68	18.33	2.35	A-1-b (0)
C - 10	26.26	23.23	3.04	A-1-a (0)

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 90 presenta los porcentajes correspondientes a las fracciones granulométricas de finos, arenas y gravas obtenidos a partir de las muestras analizadas en cada una de las calicatas evaluadas.

Tabla 90 Fracciones granulométricas para todas las calicatas

CALICATA	PORCENTAJE (%) DE FINOS	PORCENTAJE (%) DE ARENA	PORCENTAJE (%) DE GRAVA
C- 1	73.89	26.11	0.00
C- 2	64.04	35.96	0.00
C- 3	76.09	23.91	0.00
C- 4	27.31	48.31	24.39
C- 5	22.47	54.00	23.53
C- 6	28.83	51.87	19.96
C- 7	27.90	45.57	26.52
C- 8	24.55	30.86	44.58
C- 9	19.27	47.77	32.96
C- 10	14.51	32.94	52.56

Nota. Fuente: Elaboración propia

La Tabla 91 presenta el resumen final de la clasificación de suelos correspondiente a todas las calicatas, empleando los sistemas SUCS y AASHTO. Asimismo, se detallan las características geotécnicas asociadas a cada tipo de suelo identificado.

Tabla 91 Resumen de clasificación final de métodos SUCS y AASHTO de subrasante

CALICATA	CLASIFICACION SEGÚN SUCS	CLASIFICACION SEGÚN AASHTO	
C 1	CL Arcilla de baja plasticidad	A-4 Material Limo arcillosos	(3)
C 2	CL Arcilla de baja plasticidad	A-6 Material Limo arcillosos	(4)
C 3	CL Arcilla de baja plasticidad	A-6 Material Limo arcillosos	(12)
C 4	SC-SM Arena limo arcillosa con grava	A-2-4 Materiales granulares	(0)
C 5	SC-SM Arena limo arcillosa con grava	A-2-4 Materiales granulares	(0)
C 6	SC-SM Arena limo arcillosa con grava	A-2-4 Materiales granulares	(0)
C 7	SC-SM Arena limo arcillosa con grava	A-2-4 Materiales granulares	(0)
C 8	GM Grava limosa con arena	A-1-b Materiales granulares	(0)
C 9	GM Grava limosa con arena	A-1-b Materiales granulares	(0)
C 10	GM Grava limosa con arena	A-1-a Materiales granulares	(0)

Nota. Fuente: Elaboración propia

7.2 Propiedades mecánicas del suelo

7.2.1 Compactación Proctor modificado

Se empleó el ensayo Proctor modificado con el fin de determinar el contenido de humedad óptimo y la máxima densidad seca de los suelos previamente reclasificados y agrupados según su clasificación. Dado el objetivo estructural del estudio, se seleccionó la energía de compactación correspondiente al método modificado. En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos para cada tipo de suelo evaluado.

Tabla 92 Resumen de porcentajes óptimos de agua

Subtramo	Tipo de suelo	Máxima densidad seca (gr/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Km: 0+000 – 04+000	CL	2.01	12.55
Km: 04+000 – 07+500	SC-SM	2.16	9.46
Km: 07+500 – 10+500	GM	2.21	8.95

Nota. Fuente: Elaboración propia

7.2.2 CBR (California Bearing Ratio)

La determinación del índice CBR constituye un parámetro fundamental en el desarrollo de la presente investigación, ya que permite evaluar la capacidad portante, la calidad estructural y el comportamiento mecánico de la subrasante correspondiente a la carretera San Jerónimo – Paruro (0+000 – 10+500 km). Asimismo, este valor sirve como base para la estimación del módulo de resiliencia, especialmente en correlaciones empíricas comúnmente empleadas en el diseño de pavimentos.

Tabla 93 Resumen de valores de CBR por calicatas al 1"

Progresiva	tipo de suelo	CBR al 100% de la MDS al 1"	CBR al 95% de la MDS al 1"	Sub- tramos CBR al 95% prom. (%)
km 01+500	CL	8.05	2.94	3.76
km 02+200	CL	11.66	2.07	
km 03+060	CL	11.20	6.28	
km 04+040	SC-CM	33.30	14.29	21.22
km 05+360	SC-CM	44.81	22.60	
km 06+550	SC-CM	41.41	29.64	
km 07+400	SC-CM	43.11	18.36	
km 08+300	GM	81.98	35.94	39.60
km 09+630	GM	90.60	38.20	
km 10+500	GM	85.17	44.67	

Nota. Fuente: Elaboración propia

7.3 Estado de tensión en el modelo de comportamiento del módulo resiliente

Con el fin de evidenciar la incorporación de las variables asociadas al estado de tensiones, se representaron gráficamente los datos experimentales junto con las estimaciones generadas mediante el modelo sugerido por la AASTHO 93 (ecuación 15). Las figuras correspondientes muestran los valores medidos y calculados para los materiales de la

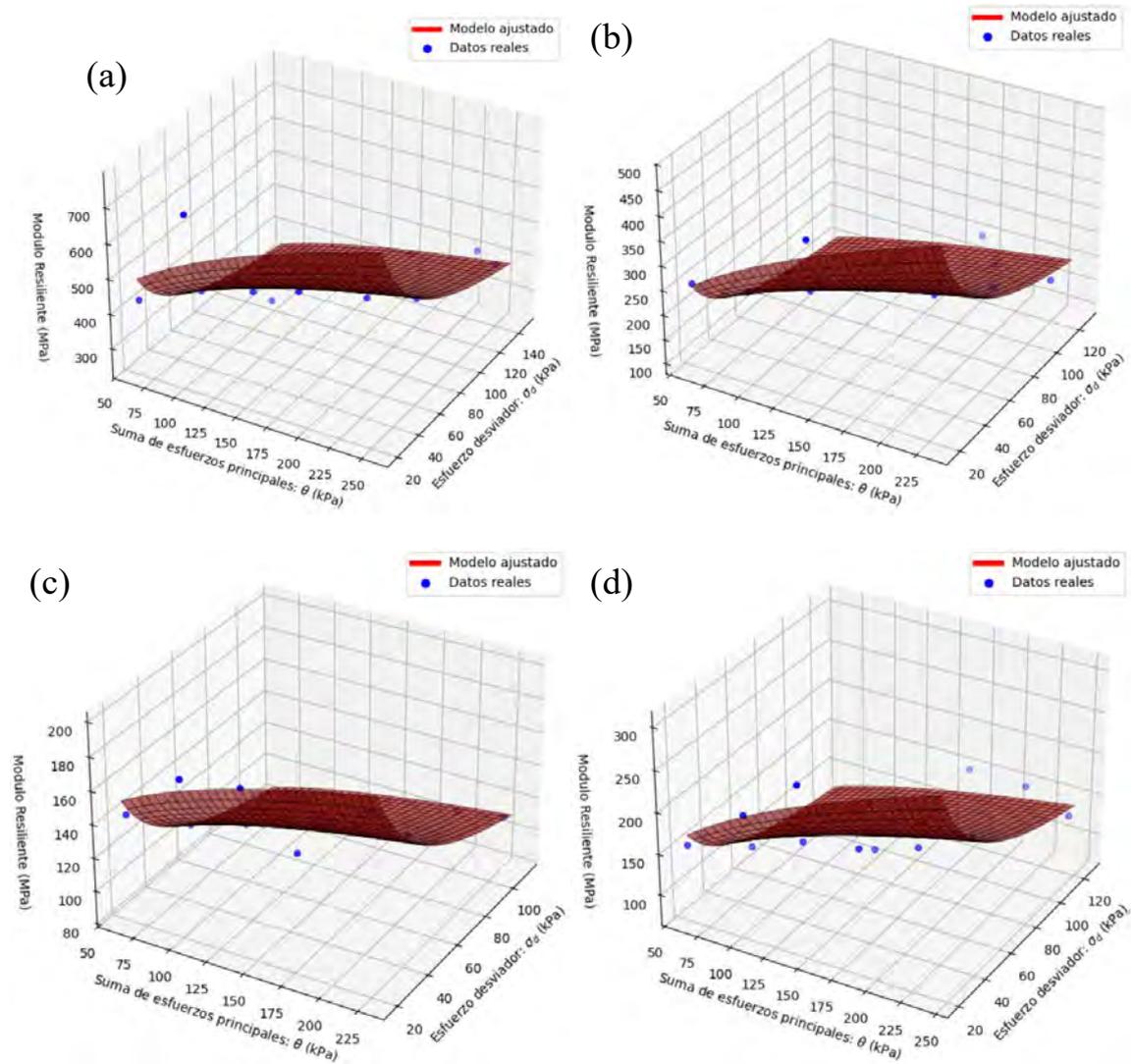
subrasante, diferenciados según el grado de saturación empleado en los ensayos de módulo resiliente.

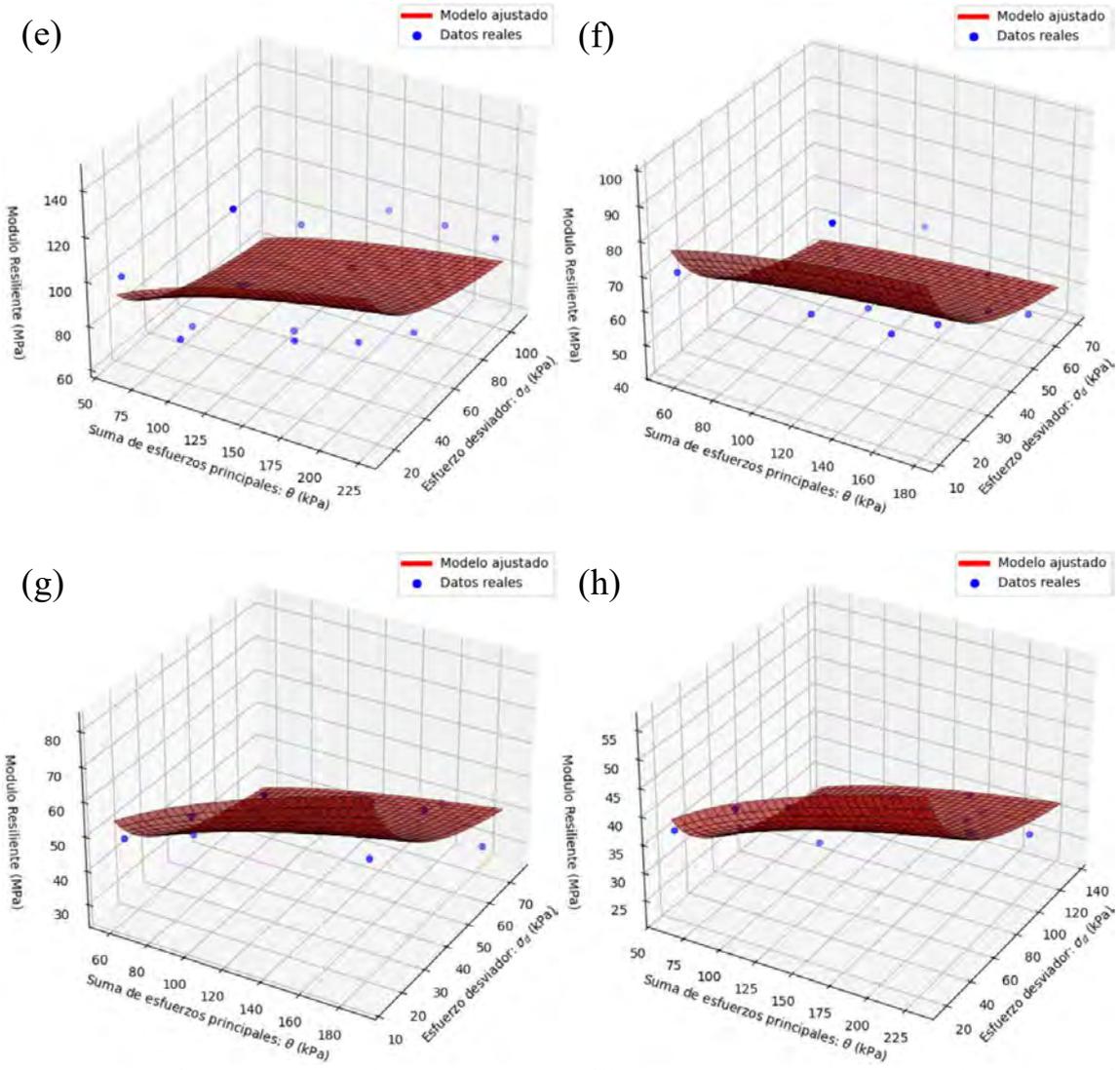
Estos gráficos permiten apreciar la sensibilidad del módulo resiliente frente a la tensión volumétrica equivalente a la suma de esfuerzos principales (θ), al esfuerzo desviador aplicado en ensayos triaxiales (σ_d) y al contenido de humedad. En el primer subtramo la subrasante, se observó un incremento del módulo resiliente a medida que aumentaba la tensión volumétrica, mientras que dicho módulo disminuyó con el incremento del esfuerzo desviador; en el segundo subtramo se observa un comportamiento variado, debido a la composición de este tipo de suelo, pero en general se puede apreciar el incremento del módulo resiliente con el incremento del esfuerzo desviador.

Asimismo, el efecto determinante del contenido de humedad sobre el módulo resiliente de la subrasante resulta claramente evidente, tal como lo muestran las figuras. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de perfeccionar los modelos predictivos del módulo resiliente, de forma que integren adecuadamente las variaciones de humedad en materiales granulares no ligados, especialmente bajo condiciones ambientales estacionales.

7.3.1 Graficas del estado de tensiones a diferentes contenidos de humedad en el primer subtramo

Figura 98 Grafica del módulo de resiliencia de la subrasante del primer subtramo con distinto contenido de humedad: (a)%w=2.8, (b)%w=4.47, (c)%w=8.63, (d)%w=9.38, (e)%w=11.27, (f)%w=12.5, (g)%w=14.5 y (h)%w=18.5.

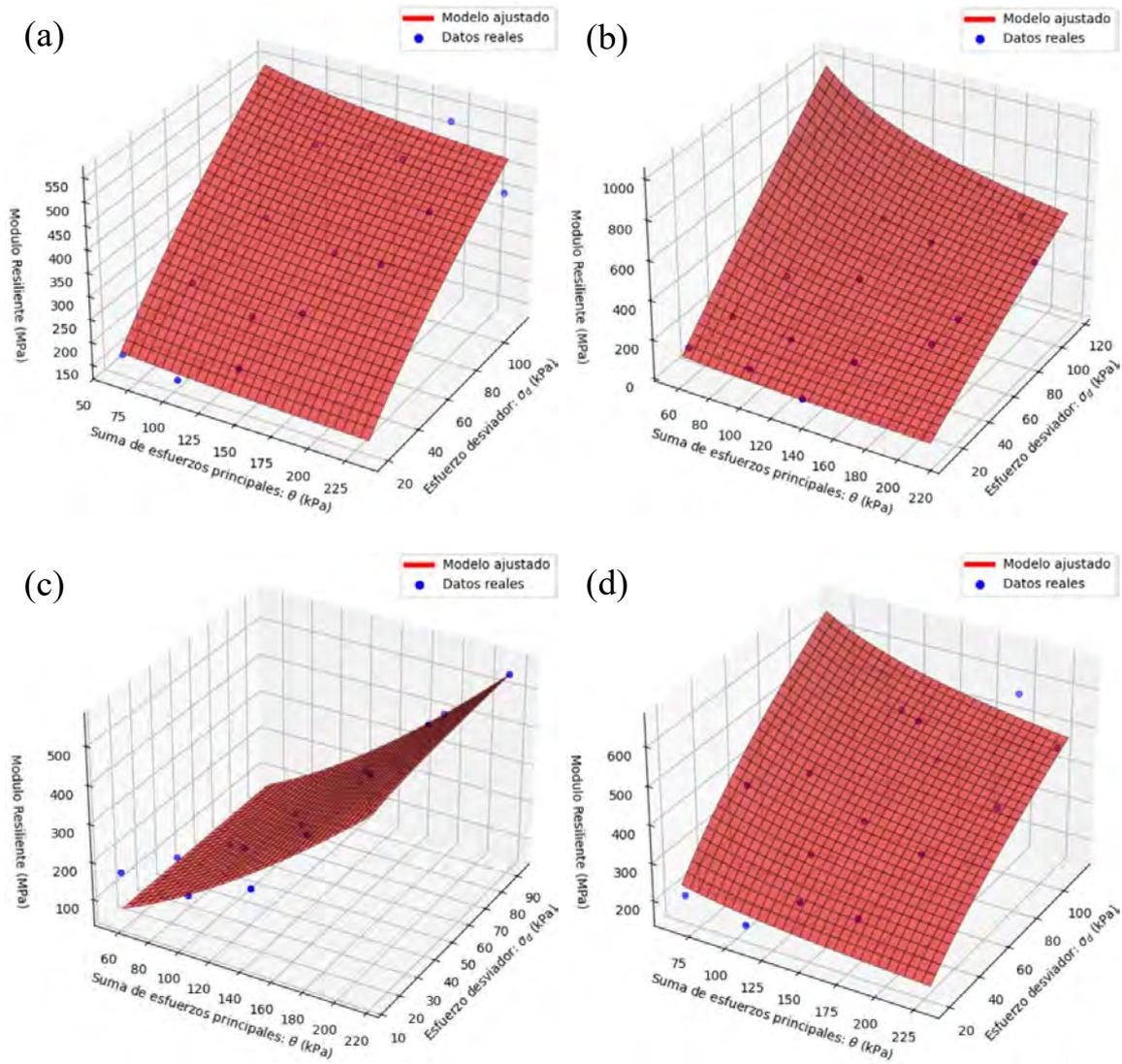


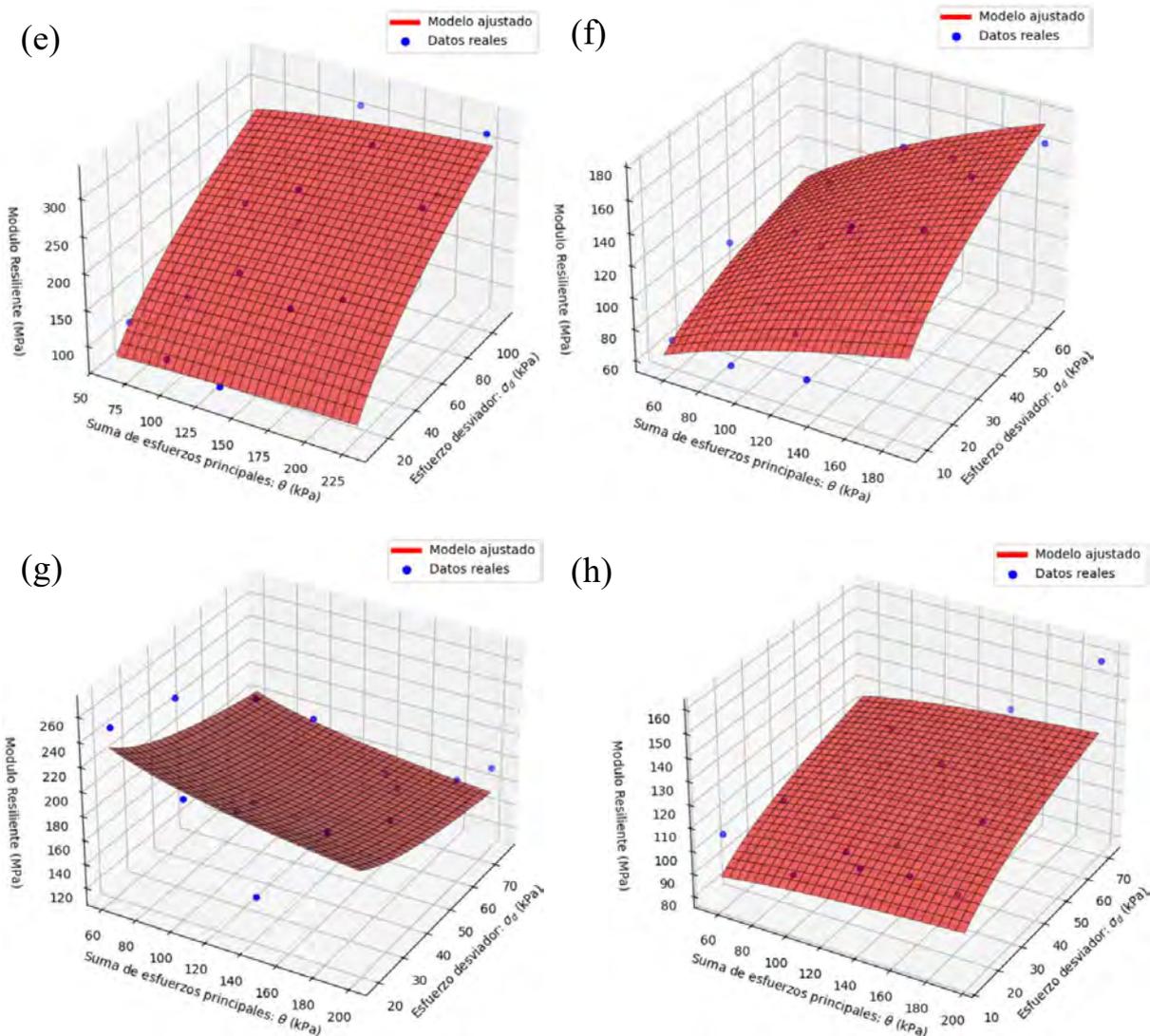


Nota. Las gráficas corresponden a un suelo arcilloso, y como se observó en la parte teórica su comportamiento vario respecto al incremento del esfuerzo desviador. Fuente: Elaboración propia

7.3.2 Graficas del estado de tensiones a diferentes contenidos de humedad en el segundo subtramo

Figura 99 Grafica del módulo de resiliencia de la subrasante del segundo subtramo con distinto contenido de humedad: (a)%w=1.5, (b)%w=2.41, (c)%w=4.04, (d)%w=5.93, (e)%w=9.46, (f)%w=9.97, (g)%w=12.35 y (h)%w=14.05.





Nota. Las gráficas corresponden a un suelo arena limo arcilloso con grava, esta variedad en sus componentes genera un comportamiento irregular respecto a los esfuerzos desviadores y suma de esfuerzos principales. Fuente: Elaboración propia

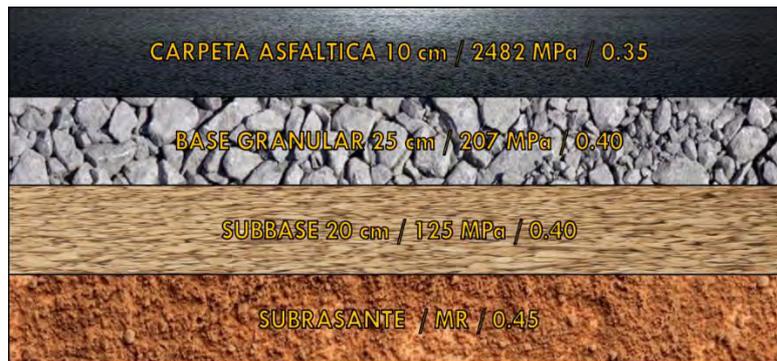
7.1 Resultados del módulo resiliente por medio de la teoría multicapa elástica

Dado que las condiciones asumidas del pavimento y las cargas vehiculares afectan los valores del módulo resiliente, se efectuará un análisis de sensibilidad de espesores y módulos para validar la fiabilidad de los resultados frente a modelos climáticos. Para el cálculo de la carga se asume la mitad de un eje simple estándar 8.2 Tn y su presión de inflado de 750 kPa; el espesor de las capas, así como sus valores de módulo de elástico son datos en base a las recomendaciones de la norma.

Para el cálculo de los esfuerzos, se empleó el software OpenPave, desarrollado por Jeremy Leah en la Universidad de California en Davis (Leah, 2019). Esta herramienta, de acceso libre para fines académicos y de investigación, fue integrada en la presente aplicación

como parte del desarrollo metodológico. Los cálculos se ejecutan de forma interna mediante la implementación del modelo de teoría de capas elásticas, incorporado como una librería dentro del software. A través de este enfoque, se determinan los esfuerzos principales en la superficie de la subrasante, y se calcula iterativamente el módulo resiliente, hasta alcanzar una variación menor a 1 MPa entre iteraciones consecutivas.

Figura 10 Estructura para el cálculo del módulo resiliente



Nota. Espesores propuestos en base a la normativa de diseño. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en los ensayos para los distintos niveles de humedad se presentan en las siguientes tablas. Se observa una variación significativa en los valores registrados, dependiendo de si el contenido de humedad se encuentra por encima o por debajo del nivel óptimo.

Tabla 94 Resultados ensayo modulo resiliente

Subtramo: km 0+000 – 04+000	
% w	MR
2.8	334.20
4.47	151.38
8.63	106.46
9.38	100.85
11.27	70.69
12.5 (opt)	36.18
14.5	30.78
18.5	28.11

Nota. Valores de modulo resiliente calculados en base a la teoría multicapa elástica para el primer subtramo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 95 Resultados ensayo modulo resiliente

Subtramo: km 04+000 – 07+500	
% w	MR
1.5	988.81
2.41	756.39
4.04	729.54
5.93	699.17
9.46 (opt)	334.95
9.97	171.29
12.35	161.52
14.05	119.42

Nota. Valores de modulo resiliente calculado en base a la teoría multicapa elástica para el segundo subtramo. Fuente: Elaboración propia.

7.1.1 Resumen consolidado de las graficas

En base a las ecuaciones propuestas se muestran en las siguientes tablas el resumen del modelo de comportamiento del Módulo de resiliencia en base a la ecuación constitutiva (ecuación 15), así mismo se recalca que la presión atmosférica (Pa) para este estudio corresponde a la presión atmosférica de la ciudad de cusco la cual es de 68.4 kPa.

Tabla 96 Ecuación constitutiva del primer con el determinado estado tensional

%w	Ecuación constitutiva	MR (MPa)	θ (kPa)	σ_d (kpa)	Observaciones
2.8	$M_R = 4884.53 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.312} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.338}$	334.2	162.1	151.45	Las muestras cilíndricas son de 70 mm de diámetro y 140 mm de altura, compactados a una densidad seca del 95%. El tipo de suelo es Arcilloso
4.47	$M_R = 2171.19 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.465} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.44}$	151.38	100.35	98.18	
8.63	$M_R = 1493.87 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.199} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.314}$	106.46	77.78	77.36	
9.38	$M_R = 1549.96 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.418} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.411}$	100.85	80.60	80.0	
11.27	$M_R = 1034.08 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.215} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.196}$	70.69	62.25	62.28	

12.5	$M_R = 658.41 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.116} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.311}$	36.18	41.59	40.71
14.5	$M_R = 436.62 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.355} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.389}$	30.78	37.6	36.7
18.5	$M_R = 409.18 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.269} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.266}$	28.11	35.5	34.6

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 97 Ecuación constitutiva del segundo subtramo con el determinado estado tensional

%w	Ecuación constitutiva	MR (MPa)	θ (kPa)	σ_d (kpa)	Observaciones
1.5	$M_R = 8074.66 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.418} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.922}$	988.81	298.8	251.1	Las muestras cilíndricas son de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, compactados a una densidad seca del 95%. El tipo de suelo es Arcilloso
2.41	$M_R = 5669.16 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.1} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.676}$	756.39	257.8	223.6	
4.04	$M_R = 1412.37 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{1.501} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.046}$	729.54	253.8	221.1	
5.93	$M_R = 6933.68 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.228} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.591}$	699.17	247.6	216.7	
9.46	$M_R = 3113.61 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.091} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.508}$	334.95	162.12	151.44	
9.97	$M_R = 1839.32 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{0.328} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.37}$	171.29	107.98	105.01	

12.35	$M_R = 2699.96 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.155}$ $\times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{-0.17}$	161.52	104.71	102.14
14.05	$M_R = 1711.11 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{-0.077}$ $\times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.171}$	119.42	86.58	85.56

Nota. Fuente: Elaboración propia

7.1.2 Correlaciones que involucran el CBR

Han sido varias las investigaciones en las que se han propuesto modelos o correlaciones, para esta investigación utilizaremos 3 correlaciones utilizadas ampliamente.

En la Tabla 98 se observa como en el primer subtramo, la segunda correlación empírica mostró la mayor concordancia con el módulo de resiliencia obtenido en laboratorio, mientras que la correlación de Newcomb y Birgisson presentó la mayor desviación respecto al valor experimental.

Tabla 98 *Calculo del Módulo de resiliencia por correlaciones de CBR*

Subtramo: km 0+000 – 04+000				
CBR (%)	Correlación	Referencia	Módulo resiliente (MPa)	Módulo resiliente Opt (MPa)
3.76	$2555CBR^{0.64}$	Powell et al. (1984)	41.14	36.18
	$1500CBR$	Heukelom y Klomp (1962)	38.92	
	$10^{(0.85\log(CBR)+2.971)}$	Newcomb y Birgisson (1999)	19.90	

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 99 se observa como en el segundo subtramo, ninguna correlación presenta similitud con el módulo de resiliencia obtenido en laboratorio, sin embargo, la segunda correlación empírica mostró la mayor concordancia respecto al valor experimental.

Tabla 99 *Calculo del Módulo de resiliencia por correlaciones de CBR*

Subtramo: km 04+000 – 07+500				
CBR (%)	Correlación	Referencia	Módulo resiliente (MPa)	Módulo resiliente Opt (MPa)
	$2555CBR^{0.64}$	Powell et al. (1984)	124.47	
21.22	1500CBR	Heukelom y Klomp (1962)	219.48	334.95
	$10^{(0.85\log(CBR)+2.971)}$	Newcomb y Birgisson (1999)	86.55	

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 100 se presenta la correlación empírica utilizada para estimar el módulo de resiliencia en el tercer subtramo, donde el suelo analizado carece de cohesión y presenta una gran proporción de partículas gruesas, lo que impidió la determinación del módulo resiliente mediante ensayos directos de laboratorio, recurriéndose únicamente a métodos indirectos de estimación.

Tabla 100 *Calculo del Módulo de resiliencia por correlaciones de CBR*

Subtramo: km 07+500 – 10+500			
CBR (%)	Correlación	Referencia	Módulo resiliente (MPa)
	$2555CBR^{0.64}$	Powell et al. (1984)	185.55
36.90	1500CBR	Heukelom y Klomp (1962)	409.58
	$10^{(0.85\log(CBR)+2.971)}$	Newcomb y Birgisson (1999)	147.09

Nota. Fuente: Elaboración propia

7.2 Módulo resiliente de diseño

De acuerdo con los lineamientos establecidos en la Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993, el procedimiento se basa en la estimación del daño relativo mensual, el cual es promediado a lo largo del año para posteriormente realizar un cálculo inverso del módulo resiliente de diseño. Los valores de módulo resiliente empleados en este proceso fueron obtenidos mediante el modelo predictivo desarrollado por Witczak et al. (2000) reflejado en la ecuación 39 y ajustados con los parámetros de regresión propuestos Zapata (Tabla 8) los cuales depende del grano fino o grano grueso del material del suelo. Asimismo, se estimó un módulo resiliente de diseño considerando como referencia los resultados experimentales obtenidos a partir de ensayos triaxiales de carga repetida realizados en laboratorio (ver la Tabla 103 y la Tabla 105).

7.2.1 Factor ambiental

El comportamiento del material de subrasante analizado está altamente condicionado por las variaciones climáticas, lo cual incide directamente en los factores obtenidos con los valores de los parámetros propuestos por Zapata et al. (2007).

Tabla 101 Factor Ambiental para cada subtramo calculado para el año 2024

Subtramo: km 0+000 – 04+000 Factor Ambiental	Subtramo: km 04+000 – 07+500 Factor Ambiental
210.96%	188.16%
209.10%	187.64%
135.22%	150.16%
202.65%	185.74%
210.96%	188.16%
210.96%	188.16%
231.69%	193.41%
243.30%	196.18%
233.09%	193.74%
234.10%	193.98%
210.96%	188.16%
192.91%	182.59%

Nota. Los resultados de factor ambiental son hallados bajo los parámetros propuestos por Zapata (2007). Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos superan el 100 % debido a que el contenido de humedad óptimo del suelo es elevado en los dos tramos, por lo que las saturaciones mensuales estimadas resultan inferiores a este valor de referencia, como se muestra en la tabla anterior.

7.2.2 Cálculo del módulo resiliente mensual

Cabe destacar que los valores obtenidos por medio de los ensayos muestran variaciones mes a mes, lo cual indica que la aplicación de un modelo que considere los efectos climáticos en el cálculo el módulo resiliente es necesario.

En el laboratorio se buscó tener el mayor rango de valores de contenidos de humedad para los subtramos, es por ello que se optó con fines académicos comparar el modelo propuesto por Witczak con respecto a las humedades similares ensayadas en el laboratorio, a continuación, se muestra la tabla que relaciona las humedades.

Tabla 102 Comparación de los datos de humedad del modelo climático y los especímenes ensayados en el primer subtramo

Mes	Witczak-Zapata		Especímen	
	% sat	% w	Famb	% w
Enero	0.4977	7.42	210.96%	8.63
Febrero	0.5064	7.55	209.10%	
Marzo	0.7427	11.07	135.22%	11.27
Abril	0.5346	7.98	202.65%	
Mayo	0.4977	7.42	210.96%	8.63
Junio	0.4977	7.42	210.96%	
Julio	0.3650	5.45	231.69%	4.47
Agosto	0.2100	3.13	243.30%	
Setiembre	0.3519	5.25	233.09%	4.47
Octubre	0.3419	5.1	234.10%	
Noviembre	0.4977	7.42	210.96%	8.63
Diciembre	0.5722	8.54	192.91%	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Ya que conocemos el valor del módulo resiliente óptimo para el primer subtramo (36.18 MPa) podemos usar la ecuación 39 y según la Tabla 8 que nos muestra el factor ambiental por mes, se procede el cálculo del módulo resiliente mensual como se muestra en la Tabla 103

El valor promedio anual del módulo resiliente del primer subtramo obtenido por medio de ensayos es de 133,68 MPa, este incremento en el valor se debe a razones climáticas donde no hubo mucha presencia de precipitaciones.

Tabla 103 Comparación de resultados de laboratorio y el modelo a partir de parámetros alcanzados por Zapata et al. (2007)

Mes	MR mensual Zapata (MPa)	MR laboratorio (MPa)	MR promedio (MPa)
Enero	76.327	106.46	91.39
Febrero	75.652	106.46	91.06
Marzo	48.922	70.69	59.81
Abril	73.317	106.46	89.89
Mayo	76.327	106.46	91.39
Junio	76.327	106.46	91.39
Julio	83.827	151.38	117.60
Agosto	88.025	334.2	211.11
Setiembre	84.334	151.38	117.86
Octubre	84.698	151.38	118.04
Noviembre	76.327	106.46	91.39
Diciembre	69.796	106.46	88.13

Nota. En la tabla se muestra los valores calculados para el primer subtramo. Fuente: Elaboración propia

Como se explicó en el primer subtramo, en el segundo subtramo también se opta por comparar el modelo de Witczak y los parámetros establecidos por Zapata et al. (2007) con las humedades similares ensayadas en laboratorio.

Tabla 104 Comparación de los datos de humedad del modelo climático y los especímenes ensayados en el segundo subtramo

Mes	Witczak-Zapata			Espécimen
	% sat	% w	Famb	% w
Enero	0.2975	3.58	188.16%	4.04
Febrero	0.3046	3.66	187.64%	
Marzo	0.5554	6.68	150.16%	5.93
Abril	0.3281	3.95	185.74%	4.04
Mayo	0.2975	3.58	188.16%	
Junio	0.2975	3.58	188.16%	
Julio	0.2016	2.43	193.41%	2.41
Agosto	0.1107	1.33	196.18%	1.5
Setiembre	0.1932	2.32	193.74%	2.41
Octubre	0.1868	2.25	193.98%	
Noviembre	0.2975	3.58	188.16%	4.04
Diciembre	0.3614	4.35	182.59%	

Nota. Fuente: Elaboración propia

El valor promedio anual del módulo resiliente del segundo subtramo obtenido por medio de ensayos es de 755.33 MPa, este incremento en el valor se debe a razones climáticas donde no hubo mucha presencia de precipitaciones.

Ya que conocemos el valor del módulo resiliente óptimo para el segundo subtramo (334.95 MPa) podemos usar la ecuación 39 y según la Tabla 8 que nos muestra el factor ambiental por mes, se procede el cálculo del módulo resiliente mensual como se muestra en la Tabla 105

Tabla 105 Comparación de resultados de laboratorio y el modelo a partir de parámetros alcanzados por Zapata et al. (2007)

Mes	MR mensual Zapata (MPa)	MR laboratorio (MPa)	MR promedio (MPa)
Enero	630.23	729.54	679.89
Febrero	628.49	729.54	679.01
Marzo	502.98	699.17	601.07
Abril	622.15	729.54	675.85
Mayo	630.23	729.54	679.89

Junio	630.23	729.54	679.89
Julio	647.83	756.39	702.11
Agosto	657.10	988.81	822.96
Setiembre	648.94	756.39	702.66
Octubre	649.73	756.39	703.06
Noviembre	630.23	729.54	679.89
Diciembre	611.60	729.54	670.57

Nota. En la tabla se muestra los valores calculados para el segundo subtramo *Fuente:*
Elaboración propia

Para el cálculo del módulo de resiliencia mensual del tercer subtramo se hizo únicamente con el apoyo de las correlaciones empíricas (CBR), ya que no se pudo realizar mediciones directas en laboratorio.

Tabla 106 Resultado de Modulo resiliente por mes según el modelo propuesto

Mes	MR mensual Zapata (MPa)
Enero	630.23
Febrero	628.49
Marzo	502.98
Abril	622.15
Mayo	630.23
Junio	630.23
Julio	647.83
Agosto	657.10
Setiembre	648.94
Octubre	649.73
Noviembre	630.23
Diciembre	611.60

Nota. En la tabla se muestra los valores calculados para el tercer subtramo *Fuente:*
Elaboración propia

7.2.3 Daño relativo y Modulo resiliente de diseño

Se evidencia que los módulos resilientes de diseño estimados mediante el factor ambiental presentan valores menores y mayor variabilidad, lo cual es coherente con el enfoque teórico, ya que estos modelos incorporan propiedades del suelo, los cuales fueron para suelos cohesivos altamente sensibles a la humedad. El cálculo del daño relativo (u_f) se realiza en base a la normativa AASTHO 93 expresada en la ecuación 8 y la Figura 18.

En el primer subtramo se muestra la presencia de suelos arcillosos con baja plasticidad, es un indicativo de la variación de estos resultados, es razonable que las estimaciones reflejen una mayor dispersión.

Tabla 107 *Calculo del módulo de resiliencia de diseño a partir del daño relativo*

Mes	Daño relativo (Zapata)	Daño relativo (MR laboratorio)
Enero	0.0489	0.0226
Febrero	0.0499	0.0226
Marzo	0.1373	0.0584
Abril	0.0537	0.0226
Mayo	0.0489	0.0226
Junio	0.0489	0.0226
Julio	0.0394	0.0100
Agosto	0.0351	0.0016
Setiembre	0.0388	0.0100
Octubre	0.0384	0.0100
Noviembre	0.0489	0.0226
Diciembre	0.0602	0.0226
Daño relativo promedio	0.0540	0.0207
Modulo resiliente diseño (MPa)	73.11	110.6005

Nota. En la tabla se muestra los resultados para el cálculo del módulo de resiliencia para el primer subtramo *Fuente: Elaboración propia*

El módulo resiliente de diseño para el segundo subtramo, presenta una variación considerable entre el modelo calculado a partir de los valores de los parámetros propuestos Zapata con respecto a los calculados en laboratorio, lo cual nos indica que su modelo predictivo no es compatible con el segundo tipo de suelo.

Tabla 108 *Calculo del módulo de resiliencia de diseño a partir del daño relativo*

Mes	Daño relativo (Zapata)	Daño relativo (MR laboratorio)
Enero	0.00037	0.00026
Febrero	0.00037	0.00026
Marzo	0.00062	0.00029
Abril	0.00038	0.00026
Mayo	0.00037	0.00026
Junio	0.00037	0.00026
Julio	0.00034	0.00024
Agosto	0.00033	0.00013
Setiembre	0.00034	0.00024
Octubre	0.00034	0.00024
Noviembre	0.00037	0.00026
Diciembre	0.00039	0.00026
Daño relativo promedio	0.00038	0.00025

Modulo resiliente diseño (MPa)	618.9324	746.9202
---------------------------------------	-----------------	-----------------

Nota. En la tabla se muestra los resultados para el cálculo del módulo de resiliencia para el segundo subtramo *Fuente: Elaboración propia*

En el tercer subtramo, únicamente fue posible calcular el daño relativo utilizando los valores de los parámetros propuestos por Zapata.

Tabla 109 *Calculo del módulo de resiliencia de diseño a partir del daño relativo*

Mes	Daño relativo (Zapata)
Enero	0.00032
Febrero	0.00033
Marzo	0.00048
Abril	0.00034
Mayo	0.00032
Junio	0.00032
Julio	0.00027
Agosto	0.00023
Setiembre	0.00026
Octubre	0.00026
Noviembre	0.00032
Diciembre	0.00036
Daño relativo promedio	0.00032
Modulo resiliente diseño (MPa)	668.13

Nota. En la tabla se muestra los resultados para el cálculo del módulo de resiliencia para el tercer subtramo *Fuente: Elaboración propia*

7.3 Discusión de resultados respecto a los antecedentes de la investigación

Los resultados obtenidos en la presente investigación sobre el módulo resiliente de suelos compactados permiten establecer comparaciones relevantes con estudios previos realizados en diversas condiciones geotécnicas. Meza (2020) estudió arcillas blandas en el norte de Bogotá, obteniendo valores de módulo resiliente en el rango de 9.3 MPa a 26.1 MPa, asociados a una compactación en estado saturado, característica común de los suelos cohesivos blandos. Por su parte, Elsharief, Dafalla y Awad (2024) evaluaron tres tipos de suelos bajo una variación de contenido de humedad de $\pm 4\%$ respecto al óptimo, registrando módulos entre 57.6 MPa y 39.3 MPa, 21 MPa y 12 MPa, y 28.2 MPa a 17.8 MPa, lo cual evidencia la fuerte dependencia del módulo resiliente respecto al contenido de humedad.

En contraste, Herrera Montealegre (2014) reportó valores superiores, entre 65.9 MPa y 92.4 MPa, en suelos sometidos a condiciones de compactación controlada, reflejando una mejor estructura interna y mayor capacidad de respuesta elástica. Asimismo, en el Congreso

realizado en Iquitos (2003), se presentaron valores de módulo resiliente entre 15 MPa y 70 MPa, correspondientes a suelos propios de la región amazónica, posiblemente influenciados por altos contenidos de humedad natural y estructura granular variable.

En el presente estudio, se evaluaron dos tipos de suelos. El primer tipo, clasificado como CL (arcilla de baja plasticidad), alcanzó un valor de módulo resiliente de 36.18 MPa en su estado óptimo de compactación. Este valor se encuentra dentro del rango reportado en los antecedentes, particularmente cercano a los resultados de Elsharief et al. (2024) y superior a los valores obtenidos por Meza (2020), lo cual puede atribuirse a una mejor condición de compactación y control del contenido de humedad.

Por otro lado, el segundo tipo de suelo, clasificado como SC-SM (arena limo arcillosa con grava), alcanzó un módulo resiliente de 334.95 MPa bajo su contenido óptimo de humedad, valor que supera ampliamente los rangos reportados para suelos fino granulares, incluyendo los valores más altos indicados por Herrera Montealegre (2014) y por la bibliografía técnica general, que sitúa este tipo de suelos entre 148 MPa y 276 MPa. Este comportamiento puede estar asociado a una alta densidad seca lograda durante la compactación, baja plasticidad y una estructura interna más estable, lo cual incrementa su capacidad elástica bajo cargas repetidas.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que las propiedades mecánicas del suelo, en particular el módulo resiliente, están fuertemente condicionadas por la clasificación del suelo, el método de compactación, el contenido de humedad y la estructura interna resultante. El suelo SC-SM mostró un desempeño significativamente superior, destacándose como un material con alta resistencia a deformaciones recuperables, lo cual lo hace potencialmente favorable para aplicaciones estructurales en capas de subrasante estabilizada o bases granulares mejoradas.

CAPITULO 8 :CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

La evaluación de la variación del módulo de resiliencia de la subrasante en la carretera San Jerónimo – Paruro, tramo 0+000 – 10+500 km, bajo la influencia de factores climáticos, ha identificado las condiciones ambientales afectan significativamente el módulo resiliente de la subrasante. En los resultados obtenidos se observó variaciones en el módulo resiliente, especialmente ante cambios de humedad durante la temporada de lluvias, donde se evidenció una disminución del 20 % al 40 % respecto al valor óptimo.

En función del objetivo planteado, se determinó el valor óptimo del módulo de resiliencia de los suelos de subrasante presentes en la carretera San Jerónimo – Paruro (tramo 0+000 – 10+500 km), identificando que la variación del contenido de humedad, influenciada por factores climáticos, impacta significativamente su magnitud. En condiciones óptimas de compactación, el módulo resiliente alcanza valores de 36.18 MPa en el primer subtramo y de 334.95 MPa en el segundo, constituyendo estos los parámetros de referencia para su aplicación en el diseño estructural del pavimento flexible.

Se analizó el comportamiento del módulo de resiliencia de la subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro (tramo 0+000 – 10+500 km) frente a condiciones climáticas variables simuladas mediante el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM). Los resultados evidencian que el módulo, estimado a partir de modelos basados en la curva SWCC y el EICM, presenta variaciones asociadas a la succión matricial: disminuye en meses de mayor saturación y aumenta cuando esta es elevada. Este comportamiento confirma que el grado de saturación mensual incide de forma significativa en la respuesta resiliente del suelo, constituyéndose en un factor clave para el diseño estructural del pavimento.

Se evaluó el módulo de resiliencia con variaciones en el contenido de humedad inducidas por factores climáticos en la subrasante de la carretera San Jerónimo – Paruro (tramo 0+000 – 10+500 km). Los resultados evidencian que el contenido de humedad ejerce un efecto determinante sobre la respuesta resiliente del suelo: en el primer subtramo, la muestra con un contenido de agua de 18.5 % reduce el módulo a 28.11 MPa, mientras que una disminución al 2.8 % lo incrementa a 334.20 MPa; en el segundo subtramo, un contenido de agua del 14.05 % reduce el módulo a 119.42 MPa y un descenso al 1.5 % lo eleva a 988.81 MPa. Estos resultados

confirman que bajos niveles de humedad incrementan significativamente la rigidez estructural del suelo, mientras que altos contenidos de humedad disminuyen su capacidad portante.

En relación con el objetivo de comparar los valores del módulo resiliente obtenidos mediante ensayos de carga cíclica y los estimados a partir del CBR, se determinó que las correlaciones empíricas basadas en este último proporcionan estimaciones aceptables únicamente en el primer subtramo, donde los valores se aproximaron a los obtenidos en laboratorio. En contraste, en el segundo subtramo, dichas correlaciones no representaron fielmente el comportamiento resiliente del suelo. En consecuencia, se recomienda que las estimaciones derivadas del CBR sean validadas con ensayos directos de carga repetida antes de su aplicación en el diseño estructural de pavimentos.

Estos resultados reflejan claramente que el contenido de humedad, regulado por las condiciones climáticas, tiene un efecto directo, no lineal sobre el módulo resiliente del suelo, lo que resalta la necesidad de incorporar esta variabilidad en los criterios de diseño estructural de pavimentos.

8.2 Recomendaciones

Se recomienda utilizar ensayos de carga repetida para la determinación directa del módulo de resiliencia durante la fase de diseño, especialmente en carreteras de gran envergadura (categorías I y II). Esta práctica permite una caracterización más precisa del comportamiento del suelo bajo condiciones reales de carga, por lo que no se debe depender exclusivamente de correlaciones empíricas, como aquellas basadas en el CBR, particularmente en obras de infraestructura vial de alta importancia.

Incorporación del uso intensivo del EICM en estudios regionales: Para zonas con marcada estacionalidad climática como Cusco, es fundamental aplicar modelos como el EICM que integren la variabilidad ambiental, mejorando la estimación del desempeño a largo plazo.

Se recomienda verificar periódicamente la calibración de los instrumentos utilizados en los ensayos de laboratorio, con el fin de garantizar la precisión de las mediciones. Asimismo, se sugiere implementar mejoras en los componentes del sistema RM (unidad de control, receptor y emisor) para aumentar la confiabilidad y repetibilidad de los resultados obtenidos durante las pruebas.

Se recomienda desarrollar futuras investigaciones orientadas a evaluar el módulo resiliente en otros tipos de suelos y en capas superiores del pavimento (base o subbase), así como analizar el efecto de aditivos estabilizantes o geotextiles sobre su comportamiento. Esto permitiría optimizar el diseño estructural considerando mejoras en la rigidez y durabilidad de los materiales bajo cargas repetitivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Asociación Paraguaya de Carreteras (Director). (2021, mayo 2). *Seminario Módulo Resiliente 1er disertante 1er Día* [Video recording]. https://www.youtube.com/watch?v=x_hMhQKVIgC
- Cary, C. E., & Zapata, C. E. (2010). Enhanced Model for Resilient Response of Soils Resulting from Seasonal Changes as Implemented in Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2170(1), 36-44. <https://doi.org/10.3141/2170-05>
- Coria Gutiérrez, C., Hernández Domínguez, R. I., & Garnica Anguas, P. (2018). Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: Un enfoque mecanicista. *Documento técnico*, 72. <https://trid.trb.org/View/1741954>
- Hussan, S., Kamal, M. A., Khan, M. B., Irfan, M., & Hafeez, I. (2013). Determining the contribution of different structural layers of asphalt pavement system to rutting using transverse profile analysis. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(6), 174-180.
- Loría Salazar, L. G., Aguiar Moya, J. P., Trejos Castillo, C., & Rojas Pérez, F. (2017a). *Solución a la teoría de multicapa elástica y software de cálculo de las respuestas del pavimento PITRA PAVE*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1021/Solucion%20a%20la%20teoria%20de%20multicapa%20elastica.pdf?sequence=1>
- Loría Salazar, L. G., Aguiar Moya, J. P., Trejos Castillo, C., & Rojas Pérez, F. (2017b). *Solución a la teoría de multicapa elástica y software de cálculo de las respuestas del pavimento PITRA PAVE*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1021/Solucion%20a%20la%20teoria%20de%20multicapa%20elastica.pdf?sequence=1>
- Mancera, A. O. (2017). Instructivo del proceso constructivo de una vía en pavimento flexible. *Bogotá: Tecnología en construcciones Civiles, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/f762b184-3861-4199-a9f2-083cba5d68d8/content>
- Maximiliano Velásquez, E. J. (2016). *Implementación del modelo climático EICM con fines de diseño para pavimento de concreto asfáltico aplicando la metodología MEPDG*.

- Mena Abadía, W. B. (2013). *Implementación del modelo climático de la MEPDG AASHTO 2008 en Colombia para tres condiciones climáticas* [PhD Thesis, Universidad EAFIT]. https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/1277/MenaAbadia_WilmerBernardo_2013.pdf?sequence=2
- Meza Soto, M. J. (2020). *Estimación del cambio del módulo resiliente de la subrasante por efectos del clima en arcillas blandas del norte de Bogotá* [PhD Thesis, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1246>
- Parra, F., Montero, P. J. E., Fernández, L., Zambrano, H., & Cando, W. (2020). Correlación analítica-técnica entre ensayos de laboratorio de módulo resiliente y California bearing ratio de la mina Copeto. *infoANALÍTICA*, 8(1), 139-152.
- Perez Garcia, N., Garnica Anguas, P., Gonzalez Rufino, J. L., Curiel Iniguez, N. P., & Ruiz Sanginez, M. (2016). MODELO PARA ESTIMAR EL MODULO DE RESILENCIA DE SUELOS FINOS COMPACTADOS EN LA CONDICION OPTIMA DE COMPACTACION. *PUBLICACION TECNICA*, 475. <https://trid.trb.org/View/1442618>
- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., Nute Vargas, H., & Gudiño Espino, M. (2012). Evaluación del módulo de resiliencia, en trayectorias de humedecimiento y secado. *PUBLICACION TECNICA*, 355. <https://trid.trb.org/View/1245451>
- Resilient Modulus Test System. (s. f.). *Geocomp*. Recuperado 2 de mayo de 2025, de <https://www.geocomp.com/products/resilient-modulus-test-system-2/>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. (2007). Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: Estado del conocimiento. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(11), 65-90.
- Stamm, A. (2021, enero 13). *NI LabView 2020 SPI v20.0.1 Free Download*. FileCR. <https://filecr.com/windows/labview>
- XIV Congreso Nacional DE Ingeniería CIVI - Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de*. (s. f.). Studocu. Recuperado 1 de mayo de 2025, de <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-autonoma-gabriel-rene-moreno/ingenieria-civil/xiv-congreso-nacional-de-ingenieria-civi/102070938>

- Zapata, C. E., Perera, Y. Y., & Houston, W. N. (2009a). Matric Suction Prediction Model in New AASHTO Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2101(1), 53-62. <https://doi.org/10.3141/2101-07>
- Zapata, C. E., Perera, Y. Y., & Houston, W. N. (2009b). Matric Suction Prediction Model in New AASHTO Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2101(1), 53-62. <https://doi.org/10.3141/2101-07>
- Davies, B. O. A. (2004). A model for the prediction of subgrade soil resilient modulus for flexible-pavement design: Influence of moisture content and climate change (Tesis de maestría, University of Toledo).
- Herrera Montealegre, M. C. (2014). *Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios AASHTO 1993 y 2002* (Tesis de maestría). Universidad de Piura, Perú.
- PEREZ GARCIA, N., GARNICA ANGUAS, P., & MESTAS MARTINEZ, N. (2016). EL MÓDULO DE RESILENCIA: COMO FLUCTUA DESPUES DE LA CONSTRUCCION DEL PAVIMENTO Y COMO ESTIMAR ESTAS FLUCTUACIONES. PUBLICACION TECNICA, (478).
- Von Quintus, H. L., & Killingsworth, B. (1997). Design pamphlet for the determination of design subgrade in support of the 1993 AASHTO guide for the design of pavement structures (No. FHWA-RD-97-083). United States. Federal Highway Administration. Office of Engineering Research and Development.

ANEXOS

ANEXO A. ENSAYOS

ANEXO A-1. ENSAYO DE GRANULOMETRIA

Anexo A-1.1 Granulometría de la calicata del kilómetro 01+500

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

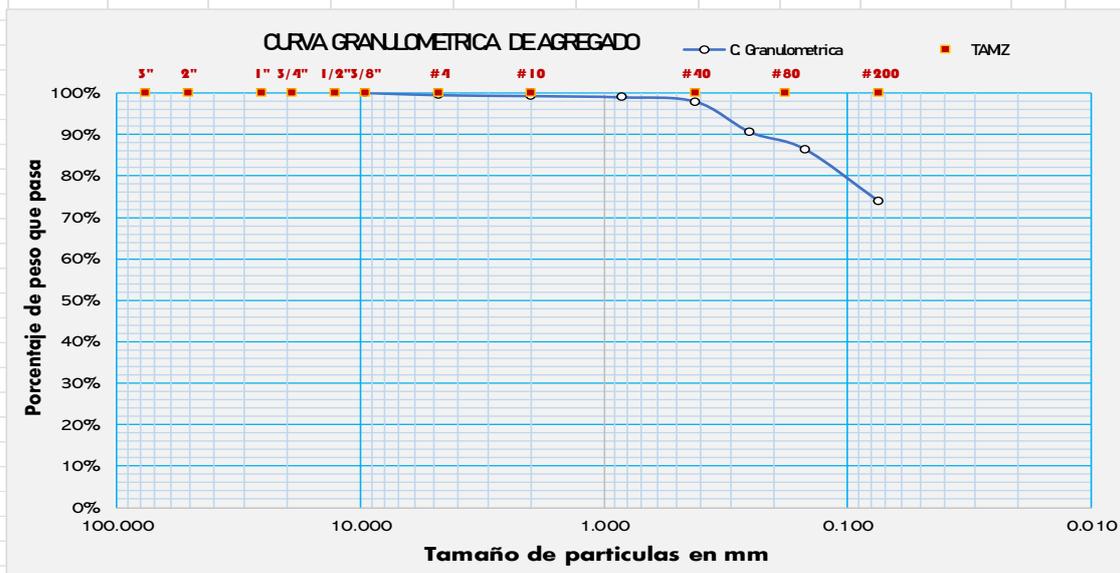
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM

UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERÓNIMO - PARURO (CU-123)

BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA 01+500 KM		
3"	76.200					GRAVA GRUESA	Profundidad: 1.50 metros Límites de consistencia: LL : 23.95 LP : 12.58 IP : 11.38 Peso de la muestra: 569.50 gr		
2 1/2"	63.500								
2"	50.600								
1 1/2"	38.100								
1"	25.400								
3/4"	19.050								
1/2"	12.700					GRAVA FINA	GRAVA: 0.00% ARENA: 100.00%		
3/8"	9.525	0.00	0.00%	0.00%	100.00%				
1/4"	6.350								
#4	4.760	11.49	0.54%	0.54%	99.46%			ARENA GRUESA	Porcentaje de paso malla #200: 73.11% 1548.39 gr
#8	2.380	4.56	0.22%	0.76%	99.24%				
#10	2.000	6.49	0.31%	1.06%	98.94%			ARENA MEDIA	Clasificación SUCS: (CL) Arcilla mal gradada arenosa.
#16	1.190	21.80	1.03%	2.09%	97.91%				
#20	0.840	155.99	7.37%	9.46%	90.54%			ARENA FINA	Clasificación AASHTO: "A-4 (3)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
#30	0.590								
#40	0.420								
#50	0.300								
#60	0.250								
#80	0.180								
#100	0.149								
#200	0.074								
BASE		16.49	0.78%	26.89%	73.11%	FINOS			
TOTAL		569.50	100.00%						



Anexo A-1.2 Granulometría de la calicata del kilómetro 02+200

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

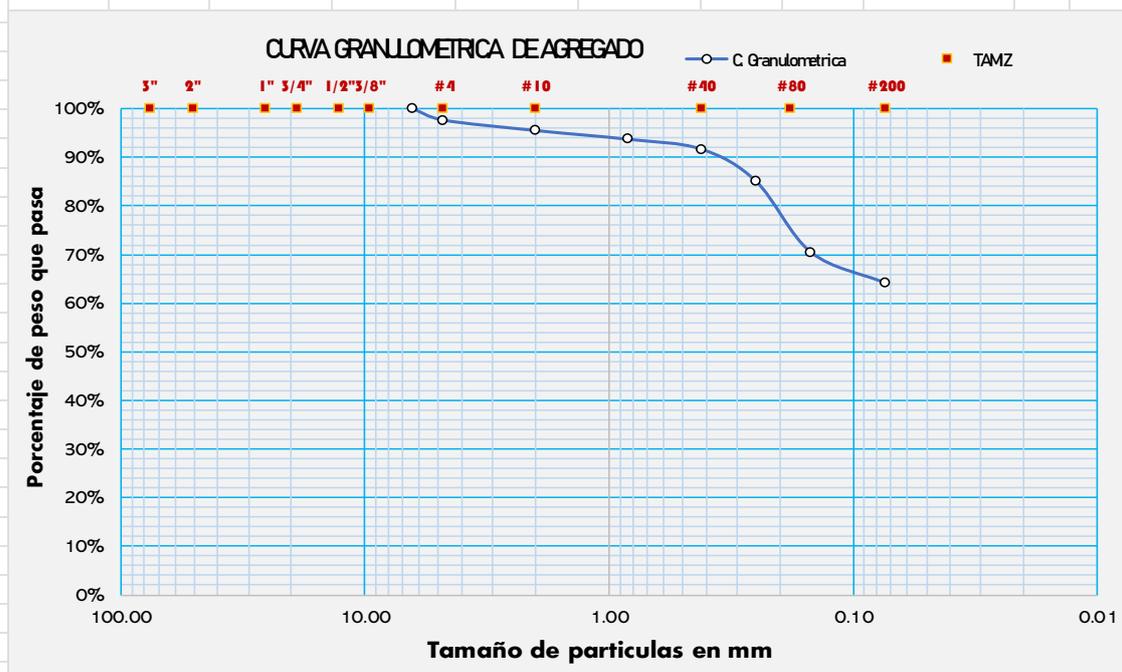
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM

UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)

BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

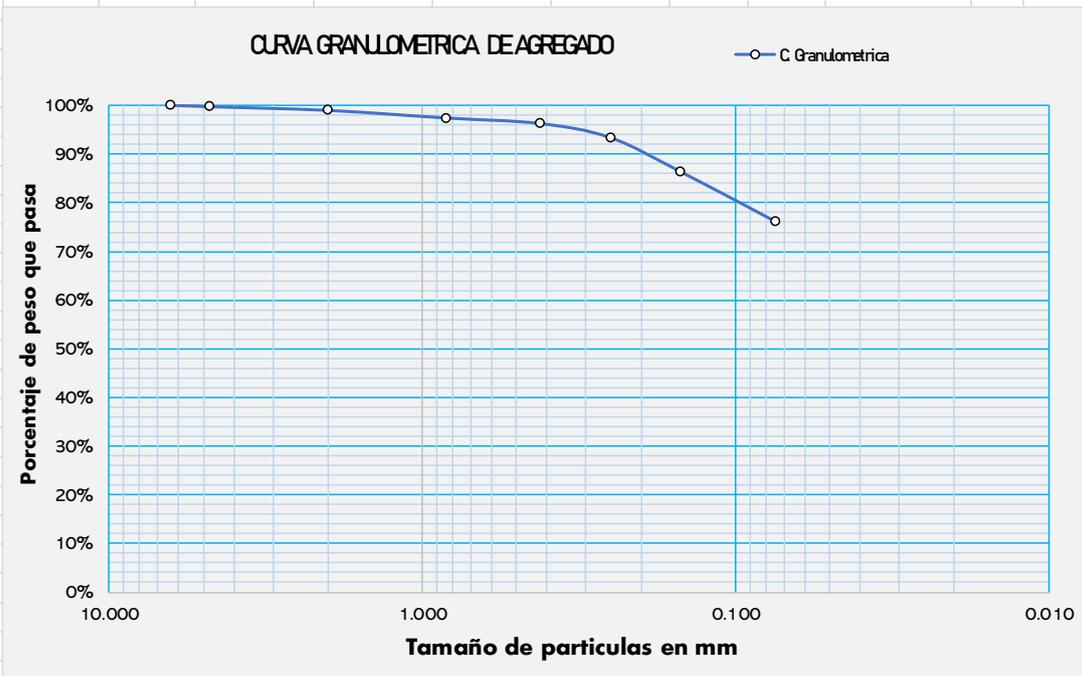
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA
3"	76.200					GRAVA GRUESA	02+200 KM
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100						
1"	25.400						
3/4"	19.050						
1/2"	12.700					GRAVA FINA	Profundidad: 1.50 metros Límites de consistencia: LL : 23.99 LP : 13.11 IP : 10.88 Peso de la muestra: 663.06 gr
3/8"	9.525						
1/4"	6.350	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	ARENA GRUESA	GRAVA: 0.00% ARENA: 100.00%
#4	4.760	43.27	2.37%	2.37%	97.63%		
#8	2.380						
#10	2.000	39.26	2.15%	4.52%	95.48%		
#16	1.190						
#20	0.840	32.88	1.80%	6.31%	93.69%		
#30	0.590						
#40	0.420	37.19	2.03%	8.35%	91.65%		
#50	0.300						
#60	0.250	121.74	6.66%	15.01%	84.99%		
#80	0.180					ARENA FINA	Porcentaje de paso malla #200: 63.72% 1164.56 gr Clasificación SUCS: (CL) Arcilla mal gradada arenosa.
#100	0.149	267.40	14.63%	29.64%	70.36%		
#200	0.074	115.48	6.32%	35.96%	64.04%		
BASE		5.84	0.32%	36.28%	63.72%	FINOS	Clasificación AASHTO: "A-6 (4)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
TOTAL		663.06	100.00%				



Anexo A-1.3 Granulometría de la calicata del kilómetro 03+060

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS							
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM							
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)							
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE : BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE							
TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA 03+060 KM Profundidad: 1.50 metros Limites de consistencia: LL : 34.89 LP : 16.88 IP : 18.01 Peso de la muestra: 501.00 gr GRAVA: 0.00% ARENA: 100.00% Porcentaje de paso malla #200: 75.26% 1524.06 gr Clasificación SUCS: (CL) Arcilla mal gradada arenosa. Clasificación AASHTO: "A-6 (12)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
3"	76.200					GRAVA GRUESA	
2 1/2"	63.500					GRAVA	
2"	50.600						
1 1/2"	38.100						
1"	25.400						
3/4"	19.050						
1/2"	12.700					GRAVA FINA	
3/8"	9.525					ARENA	
1/4"	6.350	0.00	0.00%	0.00%	100.00%		
#4	4.760	5.79	0.29%	0.29%	99.71%		
#8	2.380						
#10	2.000	15.34	0.76%	1.04%	98.96%		
#16	1.190						
#20	0.840	31.45	1.55%	2.60%	97.40%		
#30	0.590						
#40	0.420	23.18	1.14%	3.74%	96.26%		
#50	0.300						
#60	0.250	58.78	2.90%	6.64%	93.36%		
#80	0.180						
#100	0.149	141.97	7.01%	13.65%	86.35%		
#200	0.074	207.69	10.26%	23.91%	76.09%		
BASE		16.79	0.83%	24.74%	75.26%	FINOS	
TOTAL		501.00	100.00%				



Anexo A-1.4 Granulometría de la calicata del kilómetro 04+040

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

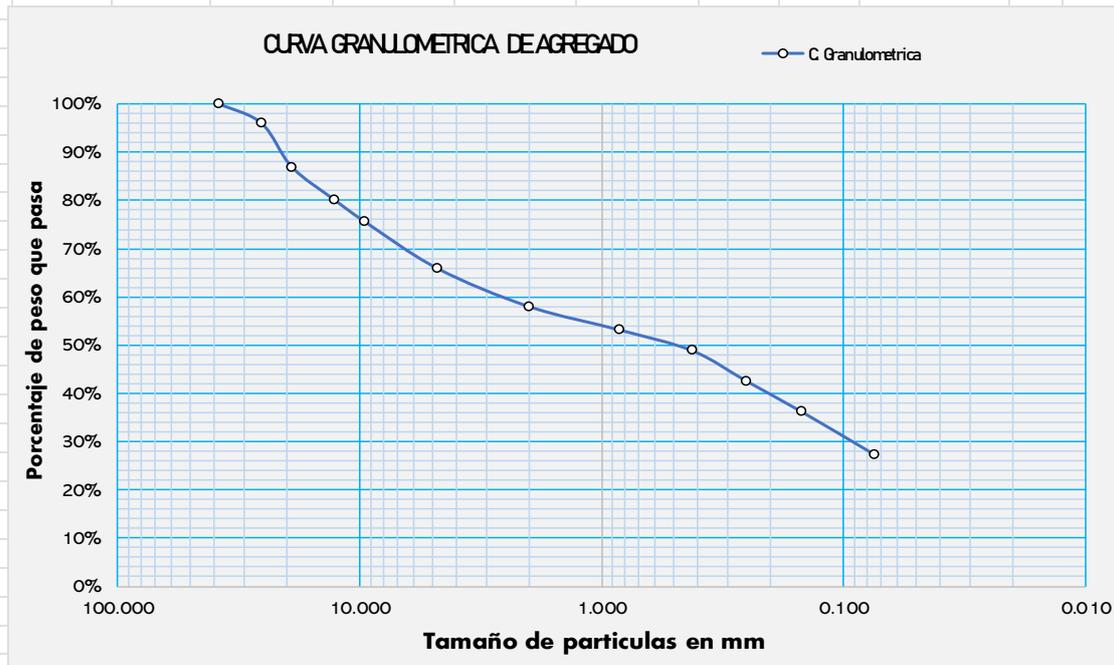
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM

UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)

BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA
3"	76.200					GRAVA GRUESA	04+040 KM Profundidad: 1.50 metros Limites de consistencia: LL : 24.63 LP : 18.28 IP : 6.35 Peso de la muestra: 2894.28 gr
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.400	160.13	4.05%	4.05%	95.95%	GRAVA FINA	GRAVA: 24.39% ARENA: 75.61%
3/4"	19.050	357.32	9.04%	13.09%	86.91%		
1/2"	12.700	268.79	6.80%	19.88%	80.12%		
3/8"	9.525	177.94	4.50%	24.39%	75.61%		
1/4"	6.350					ARENA	Porcentaje de paso malla #200: 26.80% 1059.65 gr Clasificación SUCS: (SC-SM) Arena limo arcillosa con grava Clasificación AASHTO: "A-2-4 (0)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
#4	4.760	384.30	9.72%	34.10%	65.90%		
#8	2.380						
#10	2.000	311.01	7.87%	41.97%	58.03%		
#16	1.190						
#20	0.840	193.06	4.88%	46.85%	53.15%		
#30	0.590						
#40	0.420	170.31	4.31%	51.16%	48.84%		
#50	0.300						
#60	0.250	250.76	6.34%	57.50%	42.50%		
#80	0.180						
#100	0.149	246.77	6.24%	63.74%	36.26%	FINOS	
#200	0.074	353.80	8.95%	72.69%	27.31%		
BASE		20.10	0.51%	73.20%	26.80%		
TOTAL		2894.28	100.00%				



Anexo A-1.5 Granulometría de la calicata del kilómetro 05+360

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

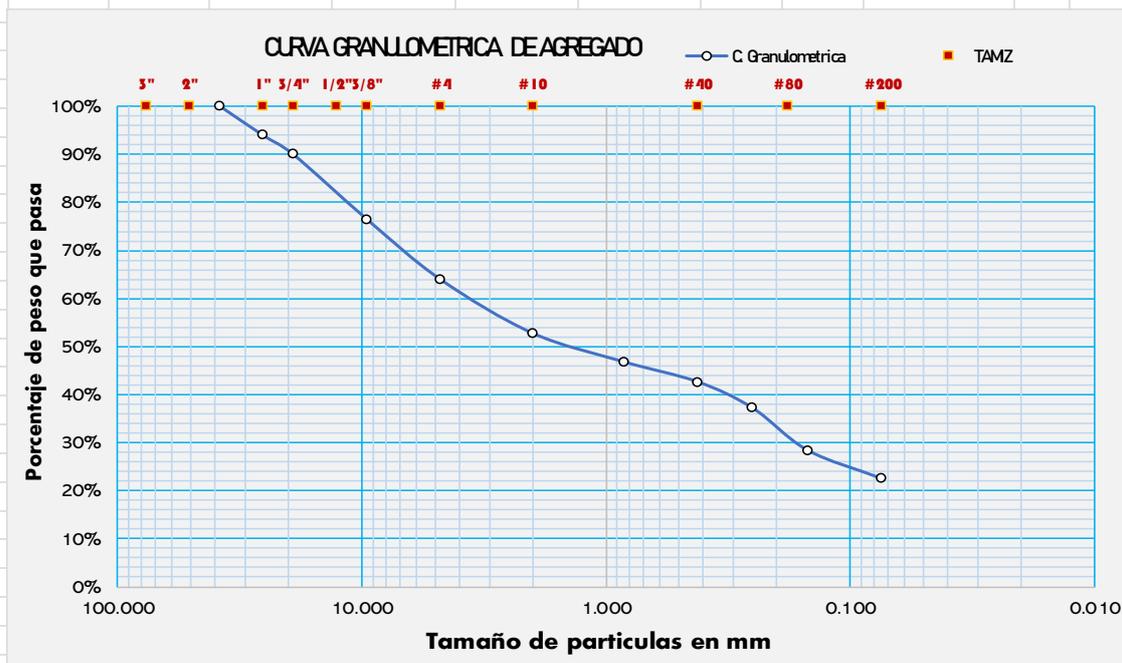
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM

UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)

BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

TAMICES	DIAMETRO	PESO	PORCENTAJE	PORCENTAJE	PORCENTAJE	MATERIAL	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA
ASTM	mm	RETENIDO (gr)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO	QUE PASA (%)	OBTENIDO	
3"	76.200					GRAVA GRUESA	05+360 KM Profundidad: 1.50 metros Límites de consistencia: LL : 23.09 LP : 18.67 IP : 4.42 Peso de la muestra: 3086.45 gr
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.400	237.68	6.04%	6.04%	93.96%	GRAVA FINA	GRAVA: 23.53% ARENA: 76.47%
3/4"	19.050	157.46	4.00%	10.05%	89.95%		
1/2"	12.700						
3/8"	9.525	530.14	13.48%	23.53%	76.47%		
1/4"	6.350					ARENA GRUESA	Porcentaje de paso malla #200: 21.50% 845.33 gr
#4	4.760	492.54	12.53%	36.06%	63.94%		
#8	2.380						
#10	2.000	439.39	11.18%	47.24%	52.76%		
#16	1.190						
#20	0.840	236.35	6.01%	53.25%	46.75%		
#30	0.590						
#40	0.420	163.10	4.15%	57.40%	42.60%		
#50	0.300					ARENA FINA	Clasificación SUCS: (SC-SM) Arena limo arcillosa con grava Clasificación AASHTO: "A-2-4 (0)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
#60	0.250	214.51	5.46%	62.85%	37.15%		
#80	0.180						
#100	0.149	345.16	8.78%	71.63%	28.37%		
#200	0.074	232.04	5.90%	77.53%	22.47%		
BASE		38.08	0.97%	78.50%	21.50%	FINOS	
TOTAL		3086.45	100.00%				



Anexo A-1.6 Granulometría de la calicata del kilómetro 06+550

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

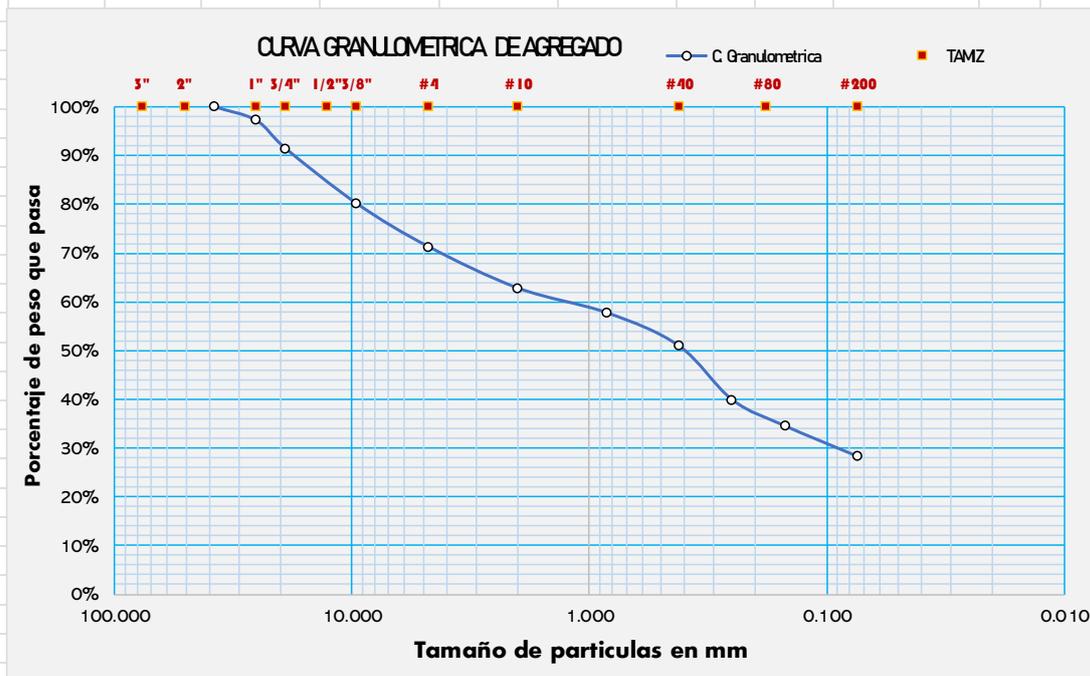
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS
EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO
0+000 – 10+500 KM

UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)

BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

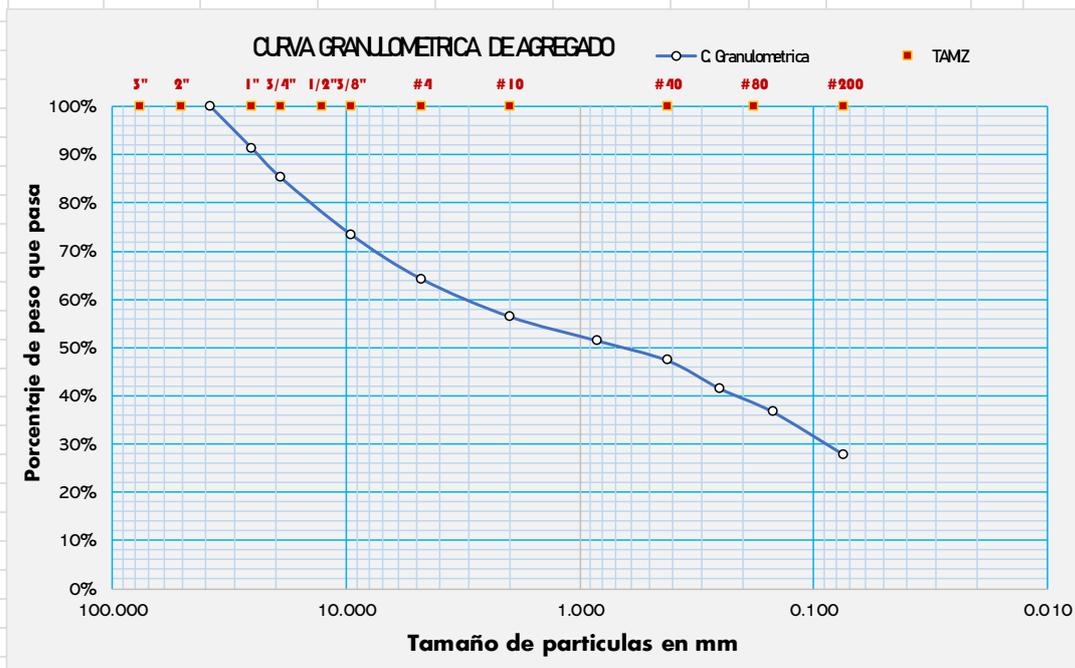
TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA
3"	76.200					GRAVA GRUESA	06+550 KM Profundidad: 1.50 metros Limites de consistencia: LL : 25.20 LP : 20.52 IP : 4.68 Peso de la muestra: 3106.38 gr
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.400	119.73	2.79%	2.79%	97.21%		
3/4"	19.050	249.82	5.83%	8.62%	91.38%	GRAVA FINA	GRAVA: 19.96% ARENA: 80.04%
1/2"	12.700	293.72	6.85%	15.48%	84.52%		
3/8"	9.525	192.09	4.48%	19.96%	80.04%	ARENA GRUESA	Porcentaje de paso malla #200: 27.51% 1178.87 gr Clasificación SUCS: (SC-SM) Arena limo arcillosa con grava Clasificación AASHTO: "A-2-4 (0)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
1/4"	6.350						
#4	4.760	377.01	8.80%	28.76%	71.24%		
#8	2.380						
#10	2.000	363.86	8.49%	37.25%	62.75%		
#16	1.190						
#20	0.840	218.15	5.09%	42.34%	57.66%		
#30	0.590						
#40	0.420	289.55	6.76%	49.10%	50.90%		
#50	0.300						
#60	0.250	476.16	11.11%	60.21%	39.79%	ARENA FINA	
#80	0.180						
#100	0.149	231.12	5.39%	65.60%	34.40%		
#200	0.074	266.79	6.23%	71.83%	28.17%		
BASE		28.38	0.66%	72.49%	27.51%	FINOS	
TOTAL		3106.38	100.00%				



Anexo A-1.7 Granulometría de la calicata del kilómetro 07+400

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS	
TESIS	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM
UBICACIÓN	CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)
BACHILLERES	BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

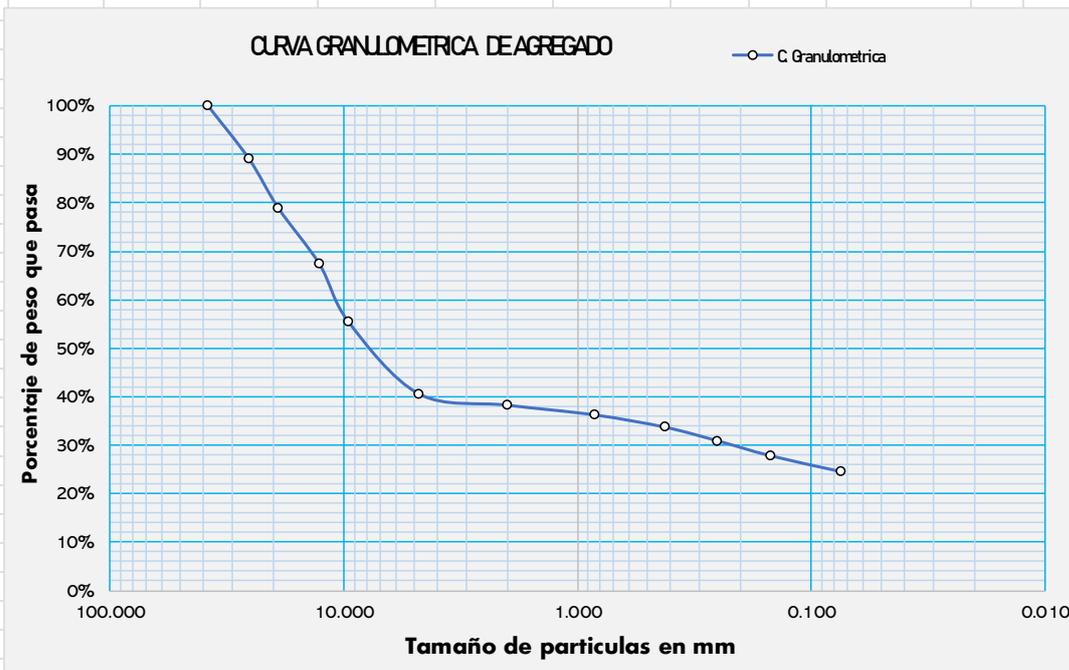
TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA
3"	76.200					GRAVA GRUESA	07+400 KM
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.400	347.24	8.59%	8.59%	91.41%	GRAVA FINA	Profundidad: 1.50 metros
3/4"	19.050	248.12	6.14%	14.72%	85.28%		Límites de consistencia:
1/2"	12.700	283.65	7.01%	21.74%	78.26%		LL : 24.78
3/8"	9.525	193.46	4.78%	26.52%	73.48%		LP : 19.20
1/4"	6.350					ARENA GRUESA	IP : 5.58
#4	4.760	371.89	9.20%	35.72%	64.28%		Peso de la muestra:
#8	2.380						2928.71 gr
#10	2.000	314.45	7.78%	43.50%	56.50%		GRAVA: 26.52%
#16	1.190						ARENA: 73.48%
#20	0.840	203.47	5.03%	48.53%	51.47%		Porcentaje de paso malla #200:
#30	0.590						27.57%
#40	0.420	165.93	4.10%	52.63%	47.37%		1114.79 gr
#50	0.300						Clasificación SUCS:
#60	0.250	235.99	5.84%	58.47%	41.53%		(SC-SM) Arena limo arcillosa con grava
#80	0.180					Clasificación AASHTO: "A-2-4 (0)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado	
#100	0.149	193.11	4.78%	63.24%	36.76%		
#200	0.074	357.90	8.85%	72.10%	27.90%		
BASE		13.51	0.33%	72.43%	27.57%	FINOS	
TOTAL		2928.71	100.00%				



Anexo A-1.8 Granulometría de la calicata del kilómetro 08+300

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS					
TESIS	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM				
UBICACIÓN	CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)				
BACHILLERES	BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE				

TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA
3"	76.200					GRAVA GRUESA	08+300 KM
2 1/2"	63.500						
2"	50.600					GRAVA FINA	Profundidad: 1.50 metros Limites de consistencia: LL : 26.88 LP : 24.01 IP : 2.88
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.400	376.07	10.98%	10.98%	89.02%	ARENA GRUESA	Peso de la muestra: 2602.76 gr GRAVA: 44.58% ARENA: 55.42%
3/4"	19.050	346.06	10.10%	21.09%	78.91%		
1/2"	12.700	395.76	11.56%	32.64%	67.36%	ARENA MEDIA	Porcentaje de paso malla #200: 24.00% 821.92 gr
3/8"	9.525	408.98	11.94%	44.58%	55.42%		
1/4"	6.350					ARENA FINA	Clasificación SUCS: (GM) Grava limosa con arena.
#4	4.760	507.60	14.82%	59.41%	40.59%		
#8	2.380					ARENA FINA	Clasificación AASHTO: "A-1-b (0)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
#10	2.000	79.69	2.33%	61.73%	38.27%		
#16	1.190					FINOS	
#20	0.840	69.08	2.02%	63.75%	36.25%		
#30	0.590						
#40	0.420	86.80	2.53%	66.29%	33.71%		
#50	0.300						
#60	0.250	96.55	2.82%	69.10%	30.90%		
#80	0.180						
#100	0.149	104.49	3.05%	72.16%	27.84%		
#200	0.074	112.70	3.29%	75.45%	24.55%		
BASE		18.96	0.55%	76.00%	24.00%		
TOTAL		2602.76	100.00%				



Anexo A-1.9 Granulometría de la calicata del kilómetro 09+630

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

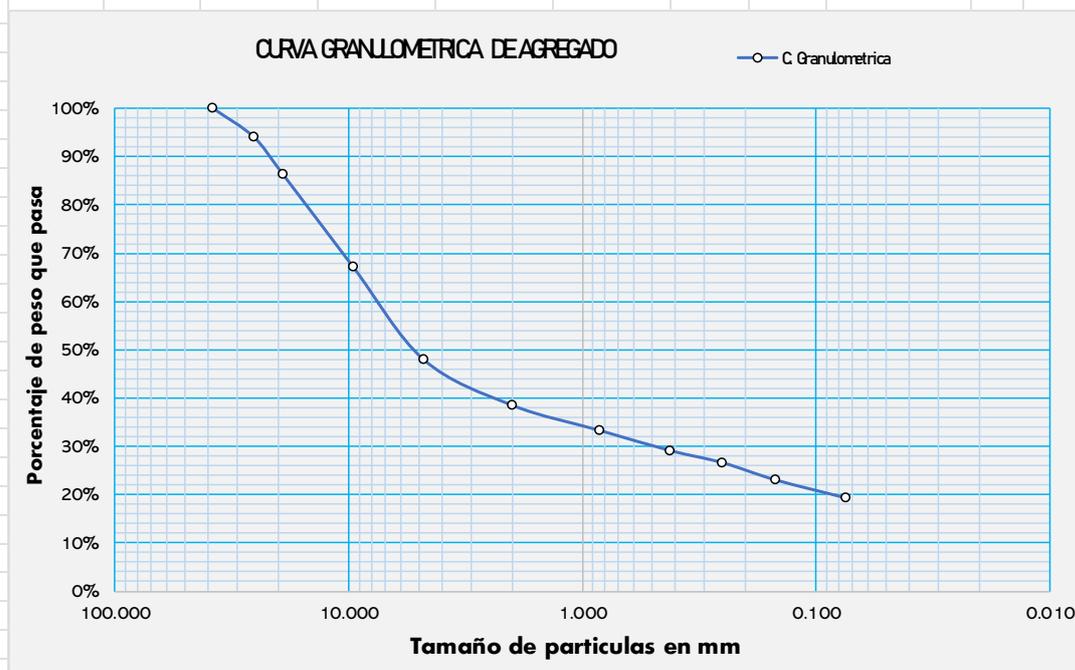
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS
EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO
0+000 – 10+500 KM

UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)

BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA
3"	76.200					GRAVA GRUESA	09+630 KM Profundidad: 1.50 metros Limites de consistencia: LL : 20.68 LP : 18.33 IP : 2.35 Peso de la muestra: 3373.74 gr
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.400	248.50	5.99%	5.99%	94.01%		
3/4"	19.050	321.64	7.75%	13.74%	86.26%		
1/2"	12.700					GRAVA FINA	GRAVA: 32.96% ARENA: 67.04%
3/8"	9.525	797.27	19.22%	32.96%	67.04%		
1/4"	6.350					ARENA	Porcentaje de paso malla #200: 18.67% 774.47 gr Clasificación SUCS: (GM) Grava limosa con arena. Clasificación AASHTO: "A-1-b (0)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
#4	4.760	793.65	19.13%	52.10%	47.90%		
#8	2.380						
#10	2.000	389.83	9.40%	61.49%	38.51%		
#16	1.190						
#20	0.840	217.64	5.25%	66.74%	33.26%		
#30	0.590						
#40	0.420	172.82	4.17%	70.91%	29.09%		
#50	0.300						
#60	0.250	104.84	2.53%	73.43%	26.57%		
#80	0.180						
#100	0.149	146.71	3.54%	76.97%	23.03%		
#200	0.074	156.08	3.76%	80.73%	19.27%		
BASE		24.76	0.60%	81.33%	18.67%	FINOS	
TOTAL		3373.74	100.00%				



Anexo A-1.10 Granulometría de la calicata del kilómetro 10+500

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

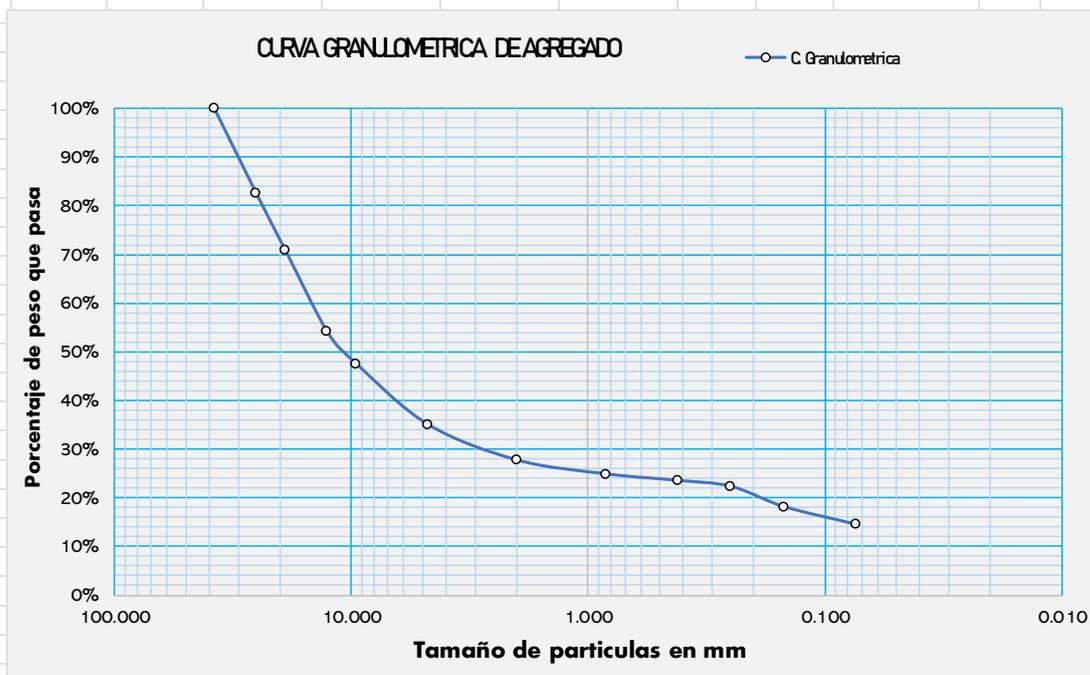
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS
EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO
0+000 – 10+500 KM

UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)

BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

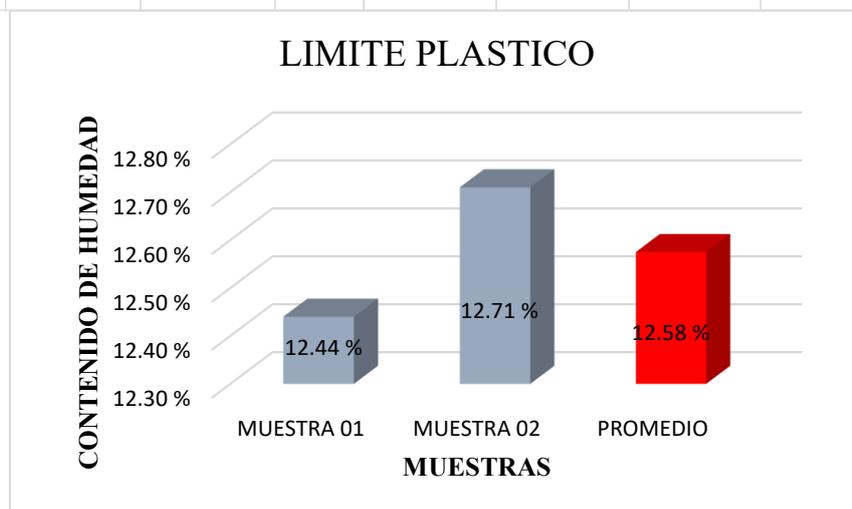
TAMICES ASTM	DIAMETRO mm	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA (%)	MATERIAL OBTENIDO	DESCRIPCION DE LA MUESTRA CALICATA
3"	76.200					GRAVA GRUESA	10+500 KM Profundidad: 1.50 metros Limites de consistencia: LL : 26.26 LP : 23.23 IP : 3.04 Peso de la muestra: 3000.00 gr
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%		
1"	25.400	604.82	17.32%	17.32%	82.68%		
3/4"	19.050	415.78	11.91%	29.22%	70.78%		
1/2"	12.700	581.72	16.66%	45.88%	54.12%	GRAVA FINA	
3/8"	9.525	233.23	6.68%	52.56%	47.44%		
1/4"	6.350					ARENA	GRAVA: 52.56% ARENA: 47.44% Porcentaje de paso malla #200: 14.10% 492.43 gr Clasificación SUCS: (GM) Grava limosa con arena. Clasificación AASHTO: "A-1-a (0)" Según el sistema de clasificación AASHTO utilizado
#4	4.760	433.67	12.42%	64.98%	35.02%		
#8	2.380						
#10	2.000	255.50	7.32%	72.29%	27.71%		
#16	1.190						
#20	0.840	99.61	2.85%	75.14%	24.86%		
#30	0.590						
#40	0.420	46.37	1.33%	76.47%	23.53%		
#50	0.300						
#60	0.250	42.48	1.22%	77.69%	22.31%		
#80	0.180						
#100	0.149	145.93	4.18%	81.87%	18.13%	ARENA FINA	
#200	0.074	126.73	3.63%	85.49%	14.51%		
BASE		14.17	0.41%	85.90%	14.10%	FINOS	
TOTAL		3000.00	100.00%				



ANEXO A-2. ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA

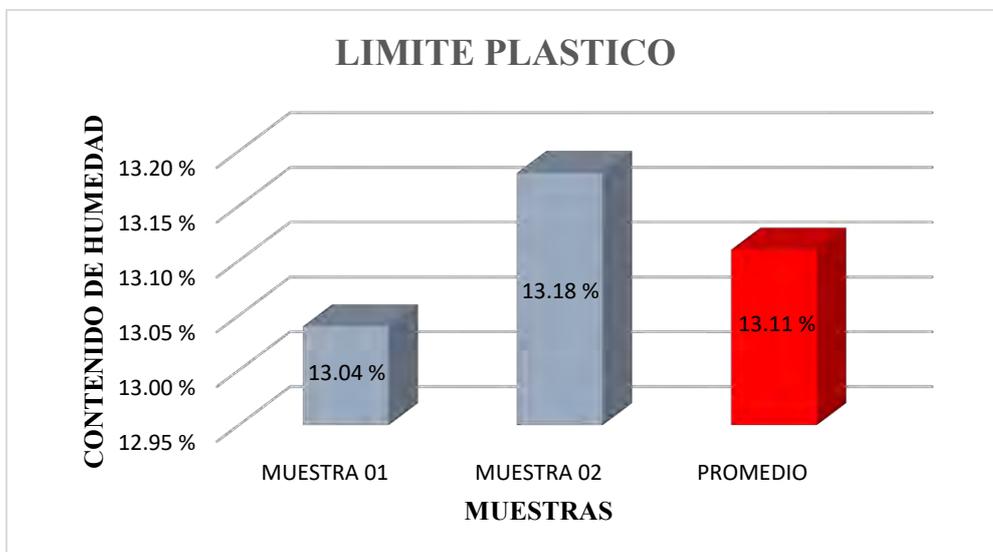
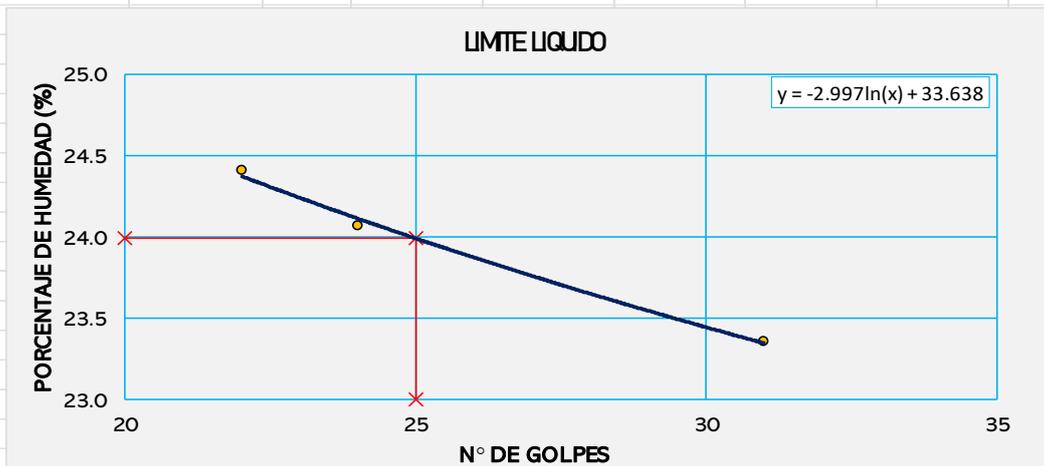
Anexo A-2.1 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 01+500

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS							
TESIS :		VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
UBICACIÓN :		CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)					
BACHILLERES :		BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE					
FECHA :		10/04/2024		MUESTRA : 01+500 KM			
CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND					
1. N° de Tara		M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr	20	45	24	40		
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	75.06	76.35	70.15	71.64	62.48	64.30
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	71.91	73.45	67.54	69.17	61.94	63.62
5. Peso de Agua	gr	3.15	2.9	2.61	2.47	0.54	0.68
6. Peso de Tara	gr	58.84	60.52	56.72	58.40	57.60	58.27
7. Peso de Muestra Seca	gr	13.07	12.93	10.82	10.77	4.34	5.35
8. Contenido de Humedad	%	24.1	22.43	24.12	22.93	12.44	12.71
	LL	23.46	24.08	24.00	24.27	LP	12.58
		23.95					
	IP	(IP = LL - LP)					11.38



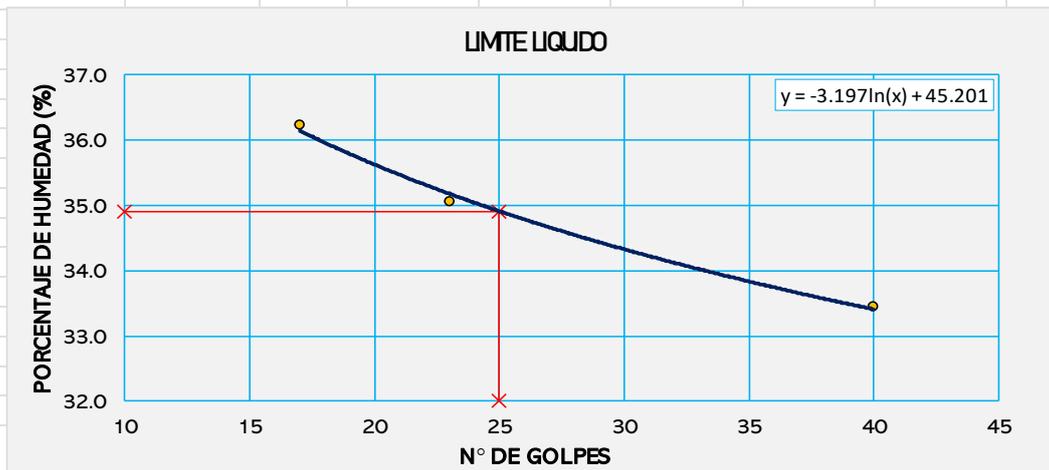
Anexo A-2.2 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 02+200

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS								
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM								
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)								
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE								
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE								
FECHA : 12/03/2024		MUESTRA : 02+200 KM						
CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO		
DATOS DE ENSAYO		UND	M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
1. N° de Tara			M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr		31	22	24			
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr		78.78	75.81	37.66		59.52	60.34
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr		75.03	72.58	34.55		58.86	59.66
5. Peso de Agua	gr		3.75	3.23	3.11		0.66	0.68
6. Peso de Tara	gr		58.98	59.35	21.63		53.80	54.50
7. Peso de Muestra Seca	gr		16.05	13.23	12.92		5.06	5.16
8. Contenido de Humedad	%		23.36	24.41	24.07		13.04	13.18
		LL	23.98	24.04	23.95		LP	13.11
			23.99					
		IP	(IP = LL - LP)					10.88



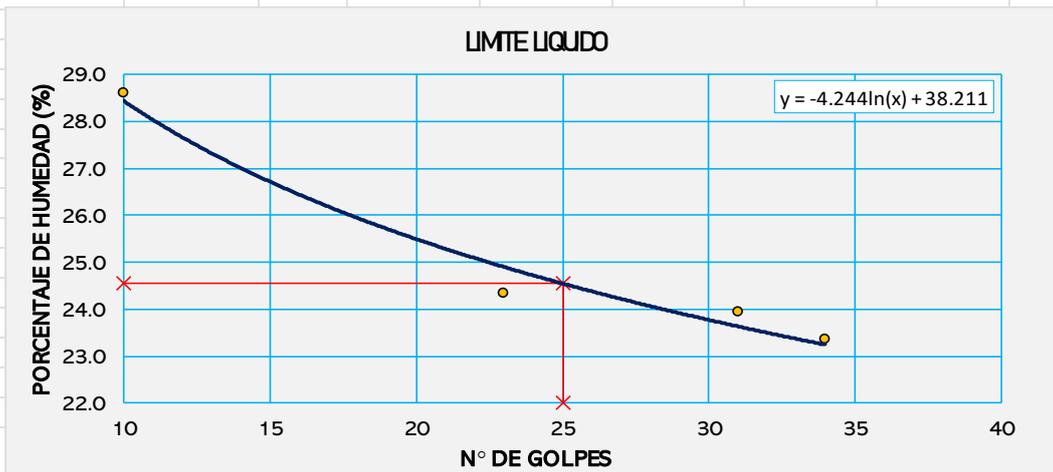
Anexo A-2.3 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 03+060

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS							
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS							
EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO							
0+000 – 10+500 KM							
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)							
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE							
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE							
FECHA : 12/03/2024		MUESTRA : 03+060 KM					
CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND	M-01	M - 02	M - 03	M - 04	
1. N° de Tara							M-01 M-02
2. N° de Golpes	gr	23	17	40			
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	67.13	74.67	32.83			67.59 66.40
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	63.33	70.28	30.01			66.69 65.45
5. Peso de Agua	gr	3.8	4.39	2.82			0.90 0.95
6. Peso de Tara	gr	52.49	58.16	21.58			61.38 59.80
7. Peso de Muestra Seca	gr	10.84	12.12	8.43			5.31 5.65
8. Contenido de Humedad	%	35.06	36.22	33.45			16.95 16.81
	LL	34.71	34.57	35.41			LP 16.88
		34.89					
	IP	(IP = LL - LP)					18.01



Anexo A-2.4 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 04+040

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS							
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM							
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)							
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE							
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE							
FECHA : 10/04/2024		MUESTRA : 04+040 KM					
CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND					
1. N° de Tara		M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr	34	23	31	10		
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	67.61	72.39	70.18	79.54	63.22	61.94
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	65.49	69.68	67.68	76.32	62.47	61.18
5. Peso de Agua	gr	2.12	2.71	2.5	3.22	0.75	0.76
6. Peso de Tara	gr	56.41	58.54	57.24	65.06	58.39	57.00
7. Peso de Muestra Seca	gr	9.08	11.14	10.44	11.26	4.08	4.18
8. Contenido de Humedad	%	23.35	24.33	23.95	28.6	18.38	18.18
	LL	24.24	24.09	24.58	25.60	LP	18.28
		24.63					
	IP	(IP = LL - LP)				6.35	



Anexo A-2.5 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 05+360

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM

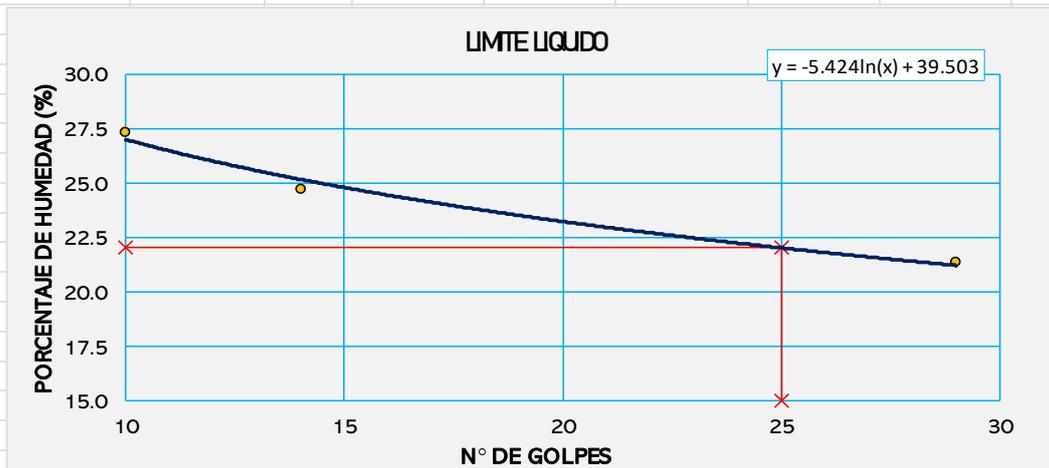
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)

BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

FECHA : 19/03/2024

MUESTRA : 05+360 KM

CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND					
1. N° de Tara		M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr	10	14	29			
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	75.86	74.27	79.54		64.25	64.30
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	71.86	71.12	75.85		63.42	63.42
5. Peso de Agua	gr	4	3.15	3.69		0.83	0.88
6. Peso de Tara	gr	57.22	58.39	58.59		58.81	58.87
7. Peso de Muestra Seca	gr	14.64	12.73	17.26		4.61	4.55
8. Contenido de Humedad	%	27.32	24.74	21.38		18.00	19.34
	LL	24.45	23.06	21.77		LP	18.67
		23.09					
	IP	(IP = LL - LP)					4.42



Anexo A-2.6 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 06+550

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM

UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)

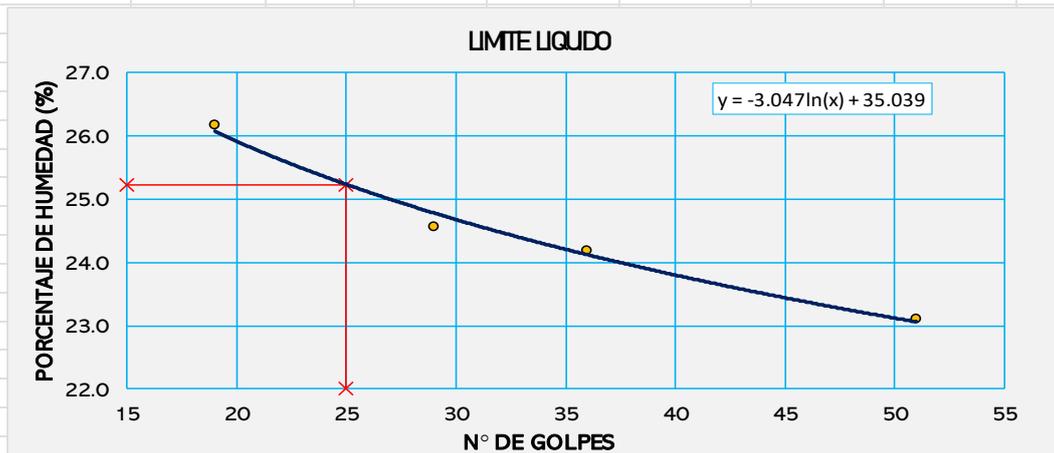
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE

: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE

FECHA : 16/05/2024

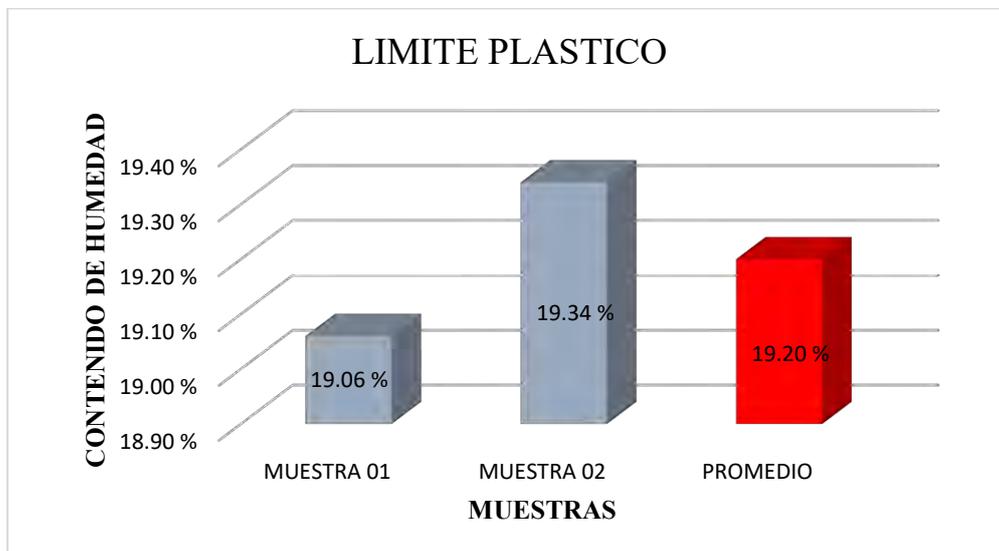
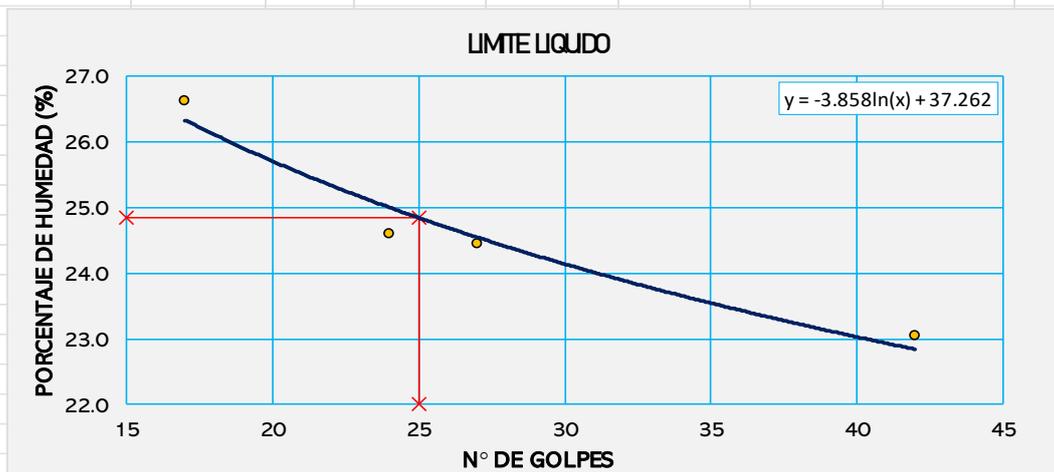
MUESTRA : 06+550 KM

CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND					
1. N° de Tara		M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr	29	51	36	19		
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	66.71	75.49	75.84	77.05	27.98	34.30
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	64.48	73.01	73.09	73.74	26.70	33.22
5. Peso de Agua	gr	2.23	2.48	2.75	3.31	1.28	1.08
6. Peso de Tara	gr	55.40	62.28	61.72	61.09	20.56	27.87
7. Peso de Muestra Seca	gr	9.08	10.73	11.37	12.65	6.14	5.35
8. Contenido de Humedad	%	24.56	23.11	24.19	26.17	20.85	20.19
	LL	25.01	25.19	25.28	25.32	LP	20.52
		25.20					
	IP	(IP = LL - LP)				4.68	



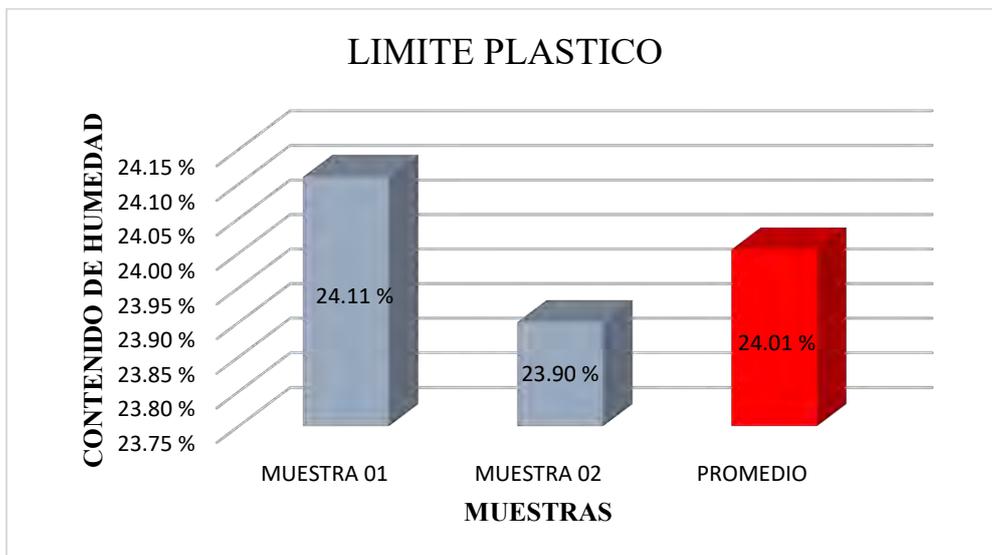
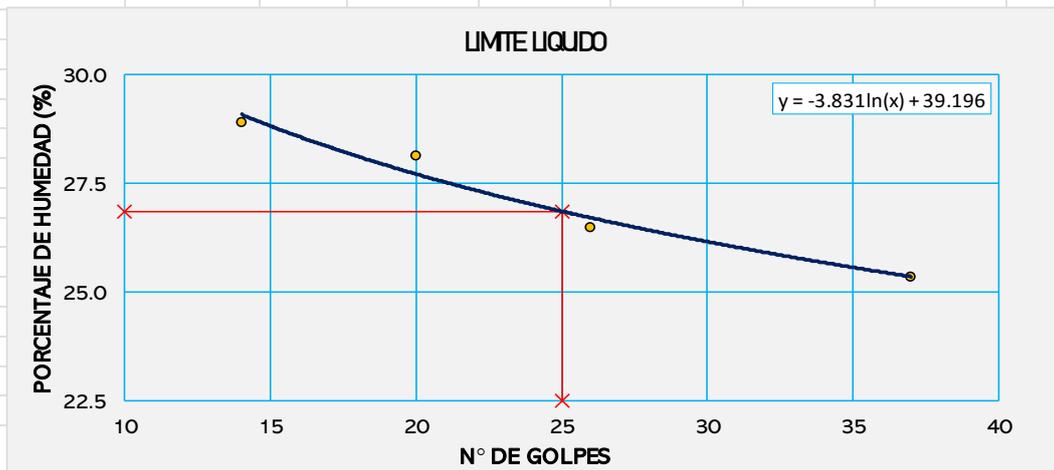
Anexo A-2.7 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 07+400

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS							
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM							
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)							
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE							
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE							
FECHA : 11/06/2024		MUESTRA : 07+400 KM					
CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND					
1. N° de Tara		M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr	42	27	24	17		
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	74.12	72.45	73.03	33.84	27.00	34.30
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	71.27	69.68	70.35	31.17	26.15	33.42
5. Peso de Agua	gr	2.85	2.77	2.68	2.67	0.85	0.88
6. Peso de Tara	gr	58.90	58.35	59.46	21.14	21.69	28.87
7. Peso de Muestra Seca	gr	12.37	11.33	10.89	10.03	4.46	4.55
8. Contenido de Humedad	%	23.04	24.45	24.61	26.62	19.06	19.34
	LL	24.53	24.68	24.49	25.41	LP	19.20
		24.78					
	IP	(IP = LL - LP)				5.58	



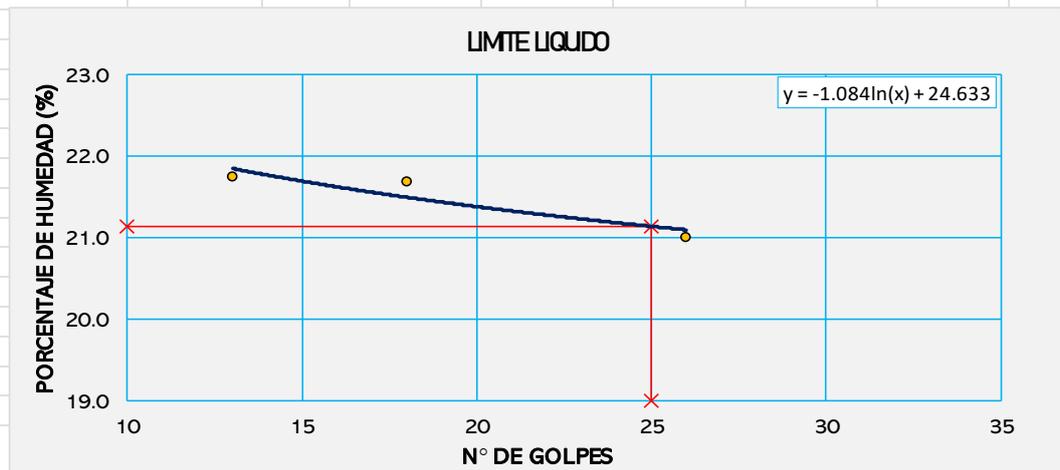
Anexo A-2.8 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 08+300

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS							
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS							
EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO							
0+000 – 10+500 KM							
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)							
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE							
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE							
FECHA : 11/06/2024							
MUESTRA : 08+300 KM							
CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND					
1. N° de Tara		M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr	26	37	20	14		
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	68.62	69.96	73.13	72.84	25.96	31.94
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	65.51	67.40	69.72	70.23	25.15	31.18
5. Peso de Agua	gr	3.11	2.56	3.41	2.61	0.81	0.76
6. Peso de Tara	gr	53.77	57.30	57.60	61.20	21.79	28.00
7. Peso de Muestra Seca	gr	11.74	10.1	12.12	9.03	3.36	3.18
8. Contenido de Humedad	%	26.49	25.35	28.14	28.9	24.11	23.90
	LL	26.62	26.58	27.39	26.94	LP	24.01
		26.88					
	IP	(IP = LL - LP)				2.88	



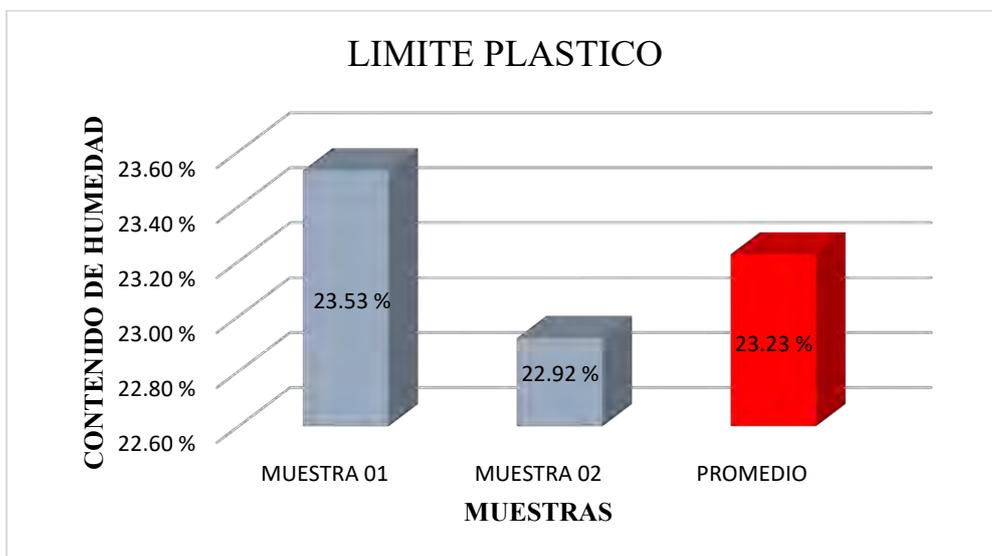
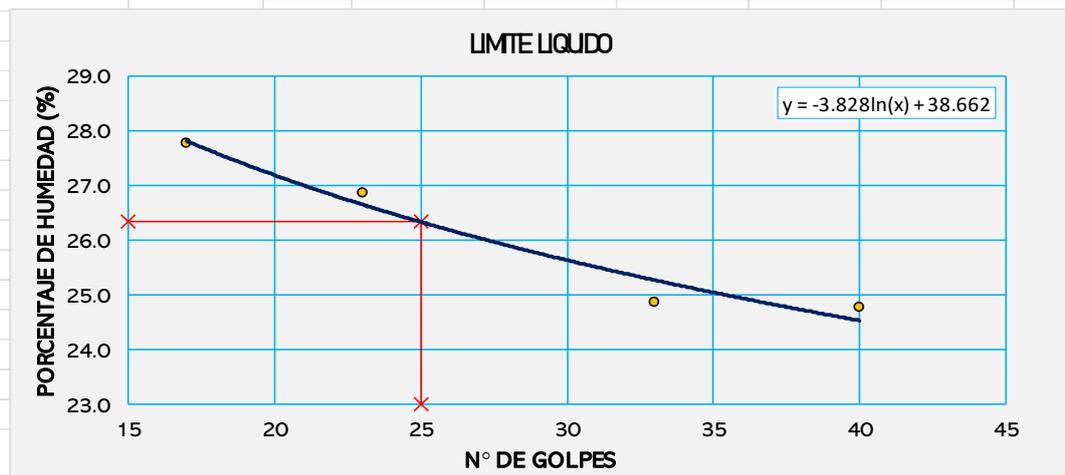
Anexo A-2.9 Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 09+630

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS							
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS							
EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO							
0+000 – 10+500 KM							
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)							
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE							
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE							
FECHA : 19/03/2024							
MUESTRA : 09+630 KM							
CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND					
1. N° de Tara		M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr	13	26	18			
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	70.57	67.60	61.91		61.94	62.43
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	68.48	65.89	60.91		61.18	61.63
5. Peso de Agua	gr	2.09	1.71	1		0.76	0.80
6. Peso de Tara	gr	58.87	57.75	56.30		57.00	57.30
7. Peso de Muestra Seca	gr	9.61	8.14	4.61		4.18	4.33
8. Contenido de Humedad	%	21.75	21.01	21.69		18.18	18.48
	LL	20.10	21.11	20.84		LP	18.33
		20.68					
	IP	(IP = LL - LP)					2.35



Anexo A-2.10 *Limite líquido, limite plástico e Índice de plasticidad de la calicata del kilómetro 10+500*

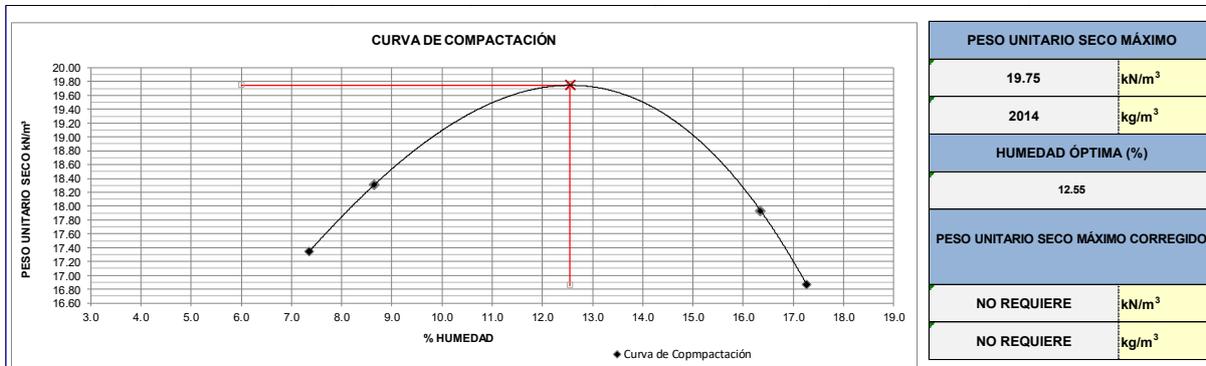
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS							
TESIS : VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM							
UBICACIÓN : CARRETERA SAN JERONIMO - PARURO (CU-123)							
BACHILLERES : BACH. ADDERLY PEREZ CANAHUIRE							
: BACH. ELMER CASTRO CANAHUIRE							
FECHA : 16/05/2024		MUESTRA : 10+500 KM					
CALICATA 01		LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
DATOS DE ENSAYO		UND					
1. N° de Tara		M-01	M - 02	M - 03	M - 04	M-01	M-02
2. N° de Golpes	gr	40	17	23	33		
3. Peso de Muestra Húmeda + Tara	gr	71.21	76.77	70.02	70.50	28.27	31.94
4. Peso de Muestra seca + Tara	gr	68.66	72.98	67.65	68.19	27.03	30.18
5. Peso de Agua	gr	2.55	3.79	2.37	2.31	1.24	1.76
6. Peso de Tara	gr	58.37	59.33	58.83	58.90	21.76	22.50
7. Peso de Muestra Seca	gr	10.29	13.65	8.82	9.29	5.27	7.68
8. Contenido de Humedad	%	24.78	27.77	26.87	24.87	23.53	22.92
	LL	26.23	26.50	26.60	25.72	LP	23.23
		26.26					
	IP	(IP = LL - LP)					3.04



ANEXO A-3. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

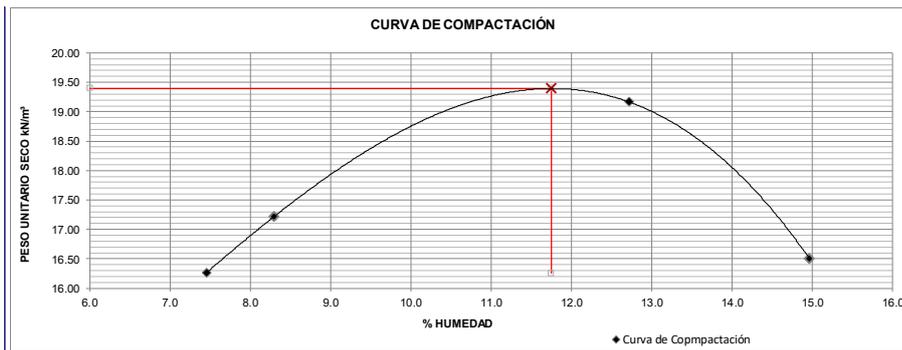
Anexo A-3.1 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 01+500

COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		A
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	4	4	4	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	926.80	926.80	926.80	926.80	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	3787.30	3907.81	4000.26	3897.46	
MASA DEL MOLDE	g	2028.27	2028.27	2028.27	2028.27	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1759.03	1879.54	1971.99	1869.19	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	87.2	98.2	102.8	104.9	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	85.0	95.1	96.5	97.1	
MASA DEL MOLDE	g	56.2	59.2	57.7	51.8	
MASA DEL AGUA	g	2.1	3.1	6.3	7.8	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	28.9	35.9	38.8	45	
% de HUMEDAD	%	7.3	8.6	16.3	17.3	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	1.898	2.028	2.128	2.017	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.768	1.867	1.829	1.7	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.34	18.31	17.93	16.87	
	lb/ft ³	110.38	116.53	114.17	107.37	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	20.1	17.1	18.2	21.7	



Anexo A-3.2 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 02+200

COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		A
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	4	4	4	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	926.80	926.80	926.80	926.80	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	3680.00	3790.00	3821.00	4070.00	
MASA DEL MOLDE	g	2028.27	2028.27	2028.27	2028.27	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1651.73	1761.73	1792.73	2041.73	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	75.2	78.0	73.6	92.4	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	74.1	76.5	71.7	88.4	
MASA DEL MOLDE	g	58.9	58.4	58.9	57.0	
MASA DEL AGUA	g	1.1	1.5	1.9	4.0	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	15.2	18.1	12.8	31	
% de HUMEDAD	%	7.5	8.3	15.0	12.7	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	1.782	1.901	1.934	2.203	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.659	1.755	1.683	2.0	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	16.26	17.21	16.50	19.17	
	lb/ft ³	103.54	109.58	105.04	122.01	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	23.7	20.4	22.8	14.6	

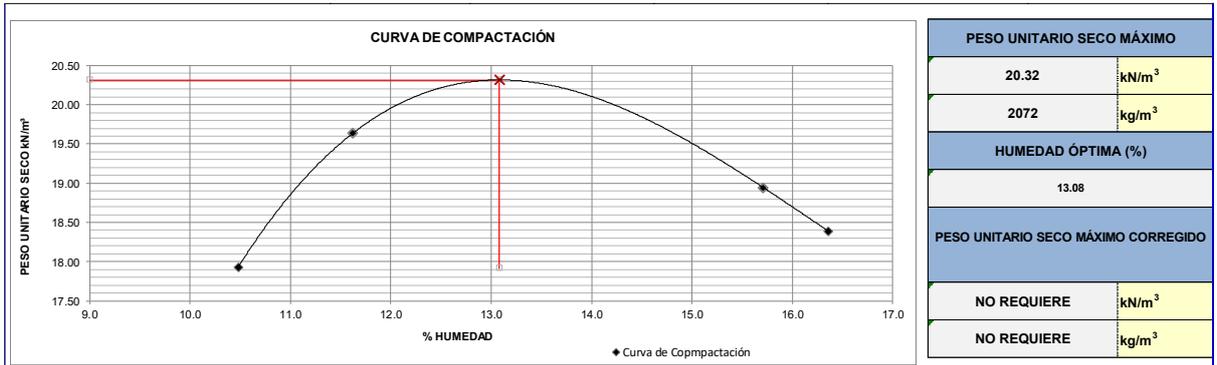


PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
19.39	kN/m ³
1977	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
11.75	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Anexo A-3.3 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 03+060

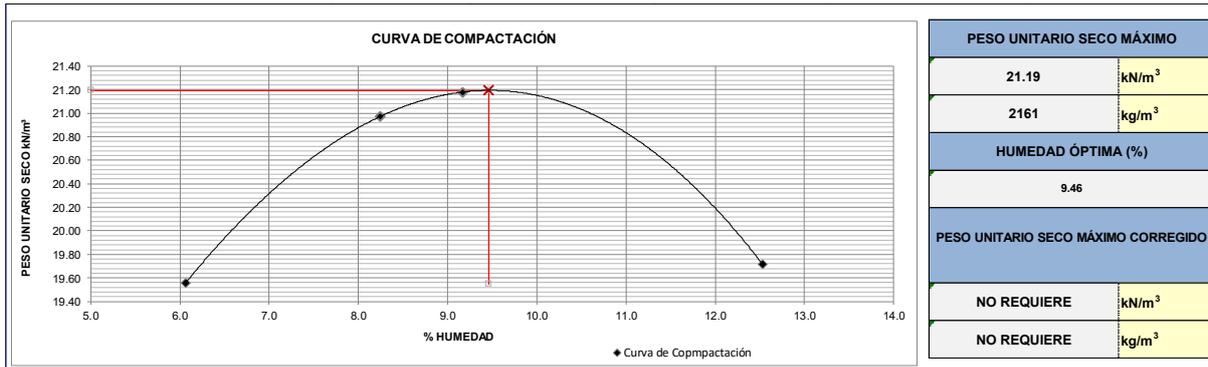
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		A
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	25	25	25	25	
NUMERO DE MOLDE	No	4	4	4	4	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	926.80	926.80	926.80	926.80	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	3900.00	4100.00	4100.00	4050.46	
MASA DEL MOLDE	g	2028.27	2028.27	2028.27	2028.27	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	1871.73	2071.73	2071.73	2022.19	

HUMEDAD DE COMPACTACIÓN					
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	75.3	78.1	79.9	104.5
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	73.5	76.0	77.1	97.1
MASA DEL MOLDE	g	56.4	57.3	58.9	51.8
MASA DEL AGUA	g	1.8	2.2	2.9	7.4
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	17.2	18.7	18.1	45
% de HUMEDAD	%	10.5	11.6	15.7	16.4
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES					
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.020	2.235	2.235	2.182
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.828	2.003	1.932	1.9
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.93	19.64	18.94	18.39
	lbf/pe ³	114.12	125.02	120.60	117.06
HUMEDAD DE SATURACIÓN					
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	18.0	13.2	15.0	16.6



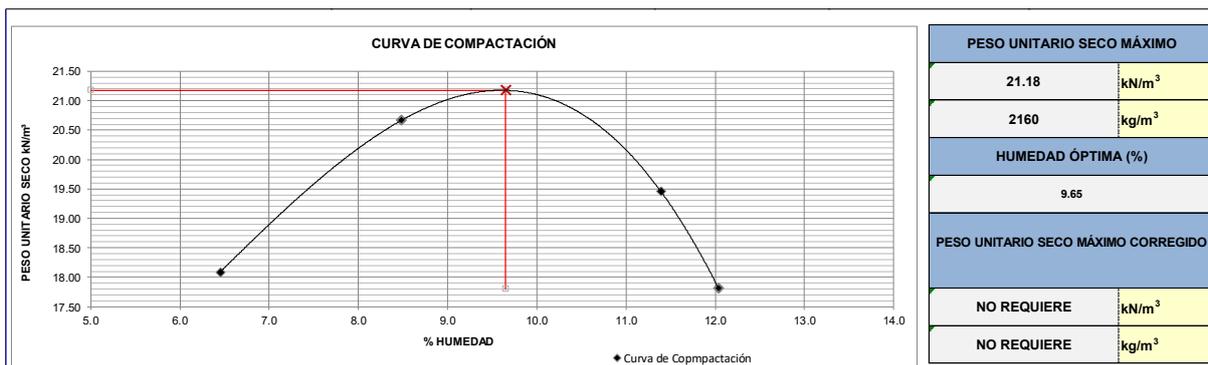
Anexo A-3.4 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 04+040

COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		c
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	55	55	55	55	
NUMERO DE MOLDE	No	1	1	1	1	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105.00	2105.00	2105.00	2105.00	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	7310.00	7820.00	7730.00	7620.00	
MASA DEL MOLDE	g	2857.00	2857.00	2857.00	2857.00	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	4453.00	4963.00	4873.00	4763.00	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	119.3	119.0	121.3	107.6	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	115.8	113.9	116.5	102.4	
MASA DEL MOLDE	g	57.1	59.1	57.8	61.3	
MASA DEL AGUA	g	3.6	5.0	4.8	5.2	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	58.7	54.9	58.7	41	
% de HUMEDAD	%	6.1	9.2	8.2	12.5	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.115	2.358	2.315	2.263	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.994	2.160	2.139	2.0	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	19.56	21.18	20.97	19.72	
	lbf/pe ³	124.51	134.83	133.51	125.53	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	12.3	8.5	8.9	11.9	



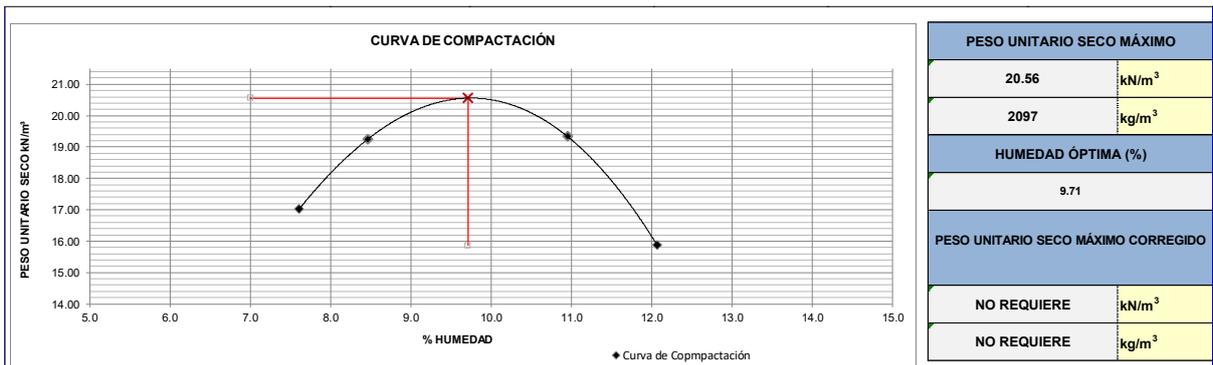
Anexo A-3.5 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 05+360

COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		c
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	55	55	55	55	
NUMERO DE MOLDE	No	1	1	1	1	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105.00	2105.00	2105.00	2105.00	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6990.00	7140.00	7670.00	7510.00	
MASA DEL MOLDE	g	2857.00	2857.00	2857.00	2857.00	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	4133.00	4283.00	4813.00	4653.00	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	87.8	106.4	102.4	112.8	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	86.0	101.3	99.0	107.2	
MASA DEL MOLDE	g	57.3	58.7	58.9	58.5	
MASA DEL AGUA	g	1.8	5.1	3.4	5.6	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	28.7	42.6	40.1	49	
% de HUMEDAD	%	6.5	12.0	8.5	11.4	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	1.963	2.035	2.286	2.210	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.844	1.816	2.108	2.0	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	18.09	17.81	20.67	19.46	
	lbf/pie ³	115.14	113.37	131.57	123.88	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	16.4	17.2	9.6	12.6	



Anexo A-3.6 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 06+550

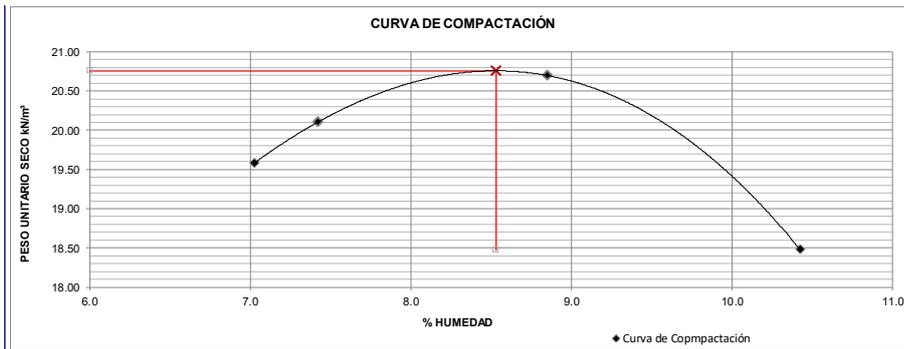
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	55	55	55	55	
NUMERO DE MOLDE	No	1	1	1	1	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105.00	2105.00	2105.00	2105.00	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6782.00	7333.00	7456.00	6667.00	
MASA DEL MOLDE	g	2850.00	2850.00	2850.00	2850.00	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	3932.00	4483.00	4606.00	3817.00	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	136.4	154.2	128.8	129.4	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	130.7	147.1	121.9	121.9	
MASA DEL MOLDE	g	55.8	62.5	58.4	59.3	
MASA DEL AGUA	g	5.7	7.2	7.0	7.6	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	74.9	84.6	63.5	63	
% de HUMEDAD	%	7.6	8.5	10.9	12.1	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	1.868	2.130	2.188	1.813	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.736	1.963	1.972	1.6	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	17.02	19.26	19.34	15.87	
	lb/ft ³	108.37	122.58	123.12	101.01	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	20.2	13.5	13.3	24.4	



Anexo A-3.7 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 07+400

COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	55	55	55	55	
NUMERO DE MOLDE	No	1	1	1	1	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105.00	2105.00	2105.00	2105.00	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	7343.00	7480.00	7680.00	7225.00	
MASA DEL MOLDE	g	2844.00	2844.00	2844.00	2844.00	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	4499.00	4636.00	4836.00	4381.00	

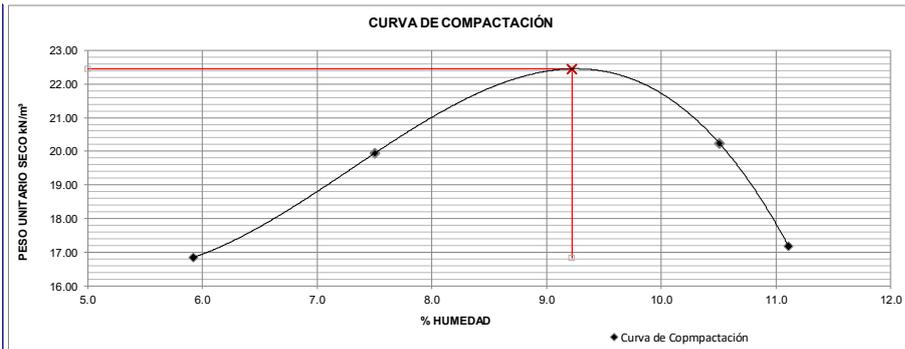
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN					
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	138.0	151.7	144.8	128.4
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	132.7	145.1	137.8	121.9
MASA DEL MOLDE	g	55.9	57.3	57.7	59.3
MASA DEL AGUA	g	5.4	6.5	7.1	6.5
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	76.7	87.9	80.0	63
% de HUMEDAD	%	7.0	7.4	8.8	10.4
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES					
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.137	2.202	2.297	2.081
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.997	2.050	2.111	1.9
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	19.58	20.11	20.70	18.48
	lbf/pie ³	124.67	127.99	131.76	117.66
HUMEDAD DE SATURACIÓN					
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	12.7	11.4	10.0	15.6



PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
20.76	kN/m ³
2117	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
8.53	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Anexo A-3.8 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 08+300

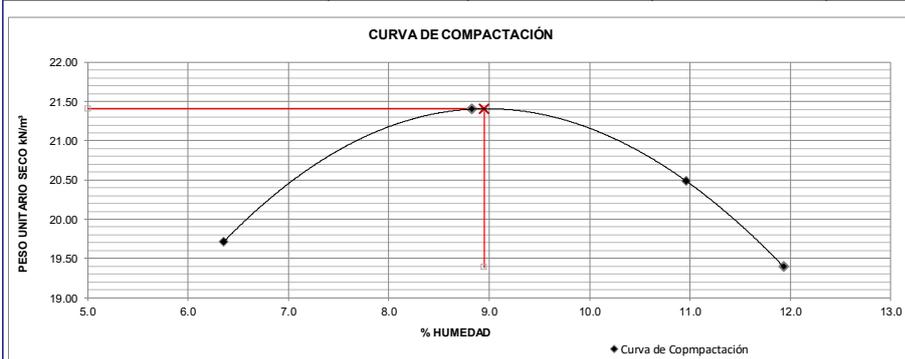
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		c
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	55	55	55	55	
NUMERO DE MOLDE	No	1	1	1	1	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105.00	2105.00	2105.00	2105.00	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	6680.00	7456.00	7650.00	6950.00	
MASA DEL MOLDE	g	2852.00	2852.00	2852.00	2852.00	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	3828.00	4604.00	4798.00	4098.00	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	93.8	142.1	108.9	124.9	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	91.8	136.1	104.1	118.9	
MASA DEL MOLDE	g	57.5	57.3	57.7	65.2	
MASA DEL AGUA	g	2.0	5.9	4.9	6.0	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	34.3	78.9	46.3	54	
% de HUMEDAD	%	5.9	7.5	10.5	11.1	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	1.819	2.187	2.279	1.947	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	1.717	2.034	2.063	1.8	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	16.84	19.95	20.23	17.18	
	lbf/pie ³	107.19	127.01	128.76	109.38	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	20.7	11.6	10.9	19.5	



PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
22.45	kN/m ³
2289	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
9.22	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Anexo A-3.9 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 09+630

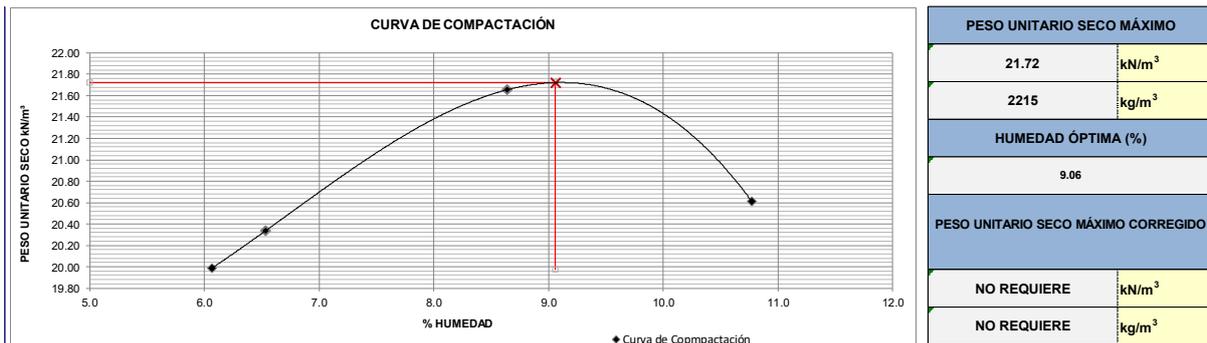
COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		c
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	55	55	55	55	
NUMERO DE MOLDE	No	1	1	1	1	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105.00	2105.00	2105.00	2105.00	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	7400.00	7560.00	7900.00	7780.00	
MASA DEL MOLDE	g	2900.00	2900.00	2900.00	2900.00	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	4500.00	4660.00	5000.00	4880.00	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	94.0	104.5	115.6	124.8	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	91.8	99.7	110.9	118.9	
MASA DEL MOLDE	g	57.5	58.9	57.8	65.2	
MASA DEL AGUA	g	2.2	4.9	4.7	5.9	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	34.3	40.7	53.1	54	
% de HUMEDAD	%	6.4	11.9	8.8	11.0	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.138	2.214	2.375	2.318	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	2.010	1.978	2.183	2.1	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	19.71	19.40	21.40	20.49	
	lbf/ft ³	125.48	123.47	136.25	130.43	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	12.2	13.0	8.3	10.3	



PESO UNITARIO SECO MÁXIMO	
21.41	kN/m ³
2183	kg/m ³
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	
8.95	
PESO UNITARIO SECO MÁXIMO CORREGIDO	
NO REQUIERE	kN/m ³
NO REQUIERE	kg/m ³

Anexo A-3.10 MTC E 115 Compactación en laboratorio – Proctor modificado km: 10+500

COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS				MÉTODO DE ENSAYO:		C
PRUEBA	Und	1	2	3	4	
MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ 3/4"	g	0	0	0	0	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	No	55	55	55	55	
NUMERO DE MOLDE	No	1	1	1	1	
VOLUMEN MOLDE	cm ³	2105.00	2105.00	2105.00	2105.00	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	7450.00	7550.00	7950.00	7800.00	
MASA DEL MOLDE	g	2900.00	2900.00	2900.00	2900.00	
MASA MUESTRA HUMEDA	g	4550.00	4650.00	5050.00	4900.00	
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN						
NUMERO DE RECIPIENTE	No	C-1	C-2	C-3	C-4	
MASA MUESTRA HUMEDA Y MOLDE	g	93.9	102.3	115.5	124.7	
MASA MUESTRA SECA Y MOLDE	g	91.8	99.7	110.9	118.9	
MASA DEL MOLDE	g	57.5	58.9	57.8	65.2	
MASA DEL AGUA	g	2.1	2.7	4.6	5.8	
MASA DE LA MUESTRA SECA	g	34.3	40.7	53.1	54	
% de HUMEDAD	%	6.1	6.5	8.6	10.8	
DETERMINACIÓN DEL PESOS UNITARIOS DE LOS ESPECÍMENES						
DENSIDAD HÚMEDA	g/cm ³	2.162	2.209	2.399	2.328	
DENSIDAD SECA	g/cm ³	2.038	2.074	2.208	2.1	
PESO UNITARIO SECO	kN/m ³	19.99	20.33	21.66	20.61	
	lb/ft ³	127.23	129.45	137.86	131.19	
HUMEDAD DE SATURACIÓN						
HUMEDAD DE SATURACIÓN	%	11.5	10.7	7.8	10.0	



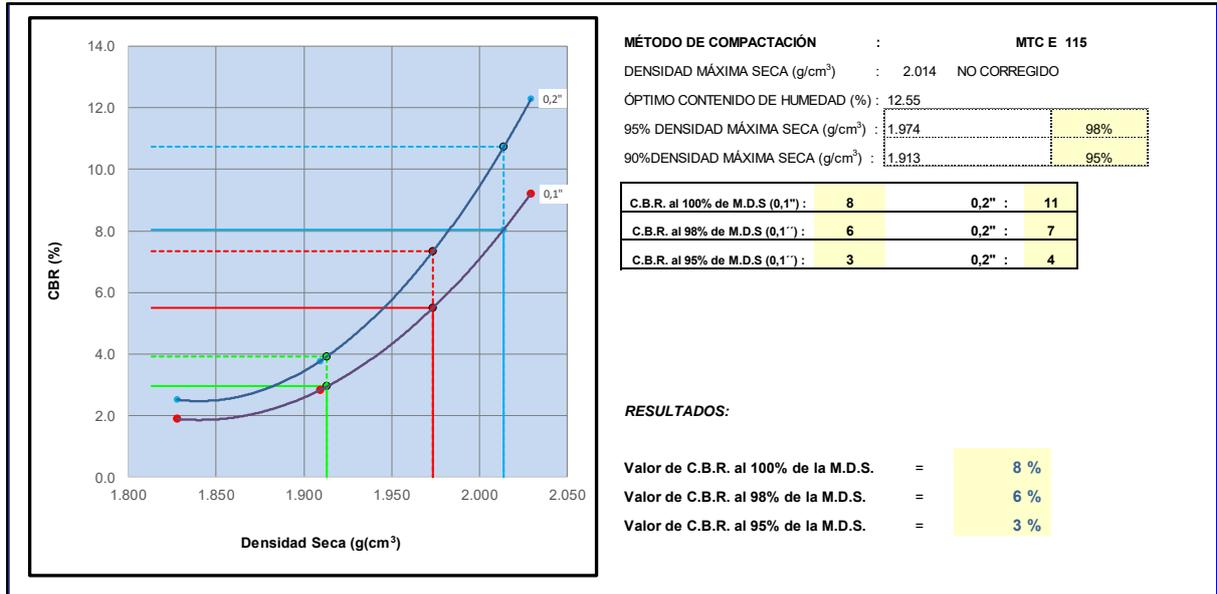
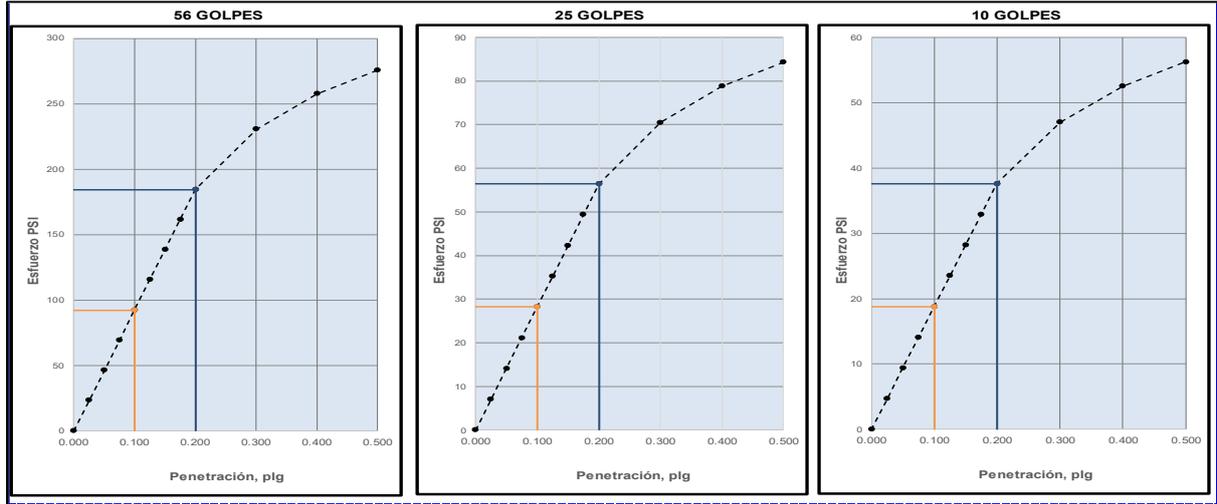
ANEXO A-4. ENSAYO DE CBR EN LABORATORIO

Anexo A-4.1 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 01+500

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	12360.00	12257.00	10490.00	11383.00	11600.00	11659.00
Peso de molde (g)	7145.00	7145.00	6117.00	6117.00	6868.00	6868.00
Peso del Suelo húmedo (g)	5215.00	5112.00	4373.00	5266.00	4732.00	4791.00
Volumen del molde (cm ³)	2279.78	2279.78	2037.36	2037.36	2298.17	2298.17
Densidad húmeda (g/cm ³)	2.288	2.242	2.146	2.585	2.059	2.085
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	48.56	107.14	44.15	105.43	55.20	118.64
Peso suelo seco + tara (g)	45.49	101.54	41.67	98.98	51.42	109.45
Peso tara (g)	21.33	61.56	21.71	59.04	21.53	59.04
Peso de agua (g)	3.07	5.60	2.48	6.45	3.78	9.19
Peso de suelo seco (g)	24.16	39.98	19.96	39.94	29.89	50.41
Contenido de humedad (%)	12.71	14.01	12.42	16.15	12.65	18.23
Densidad seca (g/cm ³)	2.030	1.967	1.909	2.225	1.828	1.763
Densidad seca (g/cm ³) - No corregido	2.030	1.967	1.909	2.225	1.828	1.763

EXPANSIÓN											
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN	
				mm	%		mm	%		mm	%
14/04/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0
15/04/24	11:20	24.00	27	0.686	0.5	30	0.762	0.6	35	0.889	0.7
16/04/24	11:20	48.00	58	1.473	1.2	61	1.549	1.2	72	1.829	1.5
17/04/24	11:20	72.00	85	2.159	1.7	88	2.235	1.8	96	2.489	2.0
18/04/24	11:20	96.00	111	2.819	2.3	119	3.023	2.4	132	3.353	2.7

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm2	MOLDE N° 3				MOLDE N° 2				MOLDE N° 1			
mm	pulg.		lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		38	27.8	23.0		25	18.4	7.1		21	15.2	4.7	
1.270	0.050		68	49.7	46.1		34	24.6	14.1		29	21.5	9.4	
1.905	0.075		97	71.6	69.1		42	30.9	21.2		38	27.8	14.1	
2.540	0.100	70.455	132	96.7	92.2	9.2	55	40.3	28.2	2.8	42	30.9	18.8	1.9
3.175	0.125		161	118.7	115.2		68	49.7	35.3		46	34.0	23.5	
3.810	0.150		183	134.3	138.2		72	52.8	42.3		51	37.2	28.2	
4.445	0.175		204	150.0	161.3		76	56.0	49.4		55	40.3	32.9	
5.080	0.200	105.680	221	162.6	184.3	12.3	80	59.1	56.4	3.8	59	43.4	37.6	2.5
7.620	0.300		277	203.3	230.4		97	71.6	70.5		63	46.6	47.0	
10.160	0.400		319	234.7	257.5		106	77.9	78.8		72	52.8	52.6	
12.700	0.500		358	262.9	275.6		119	87.3	84.4		76	56.0	56.2	

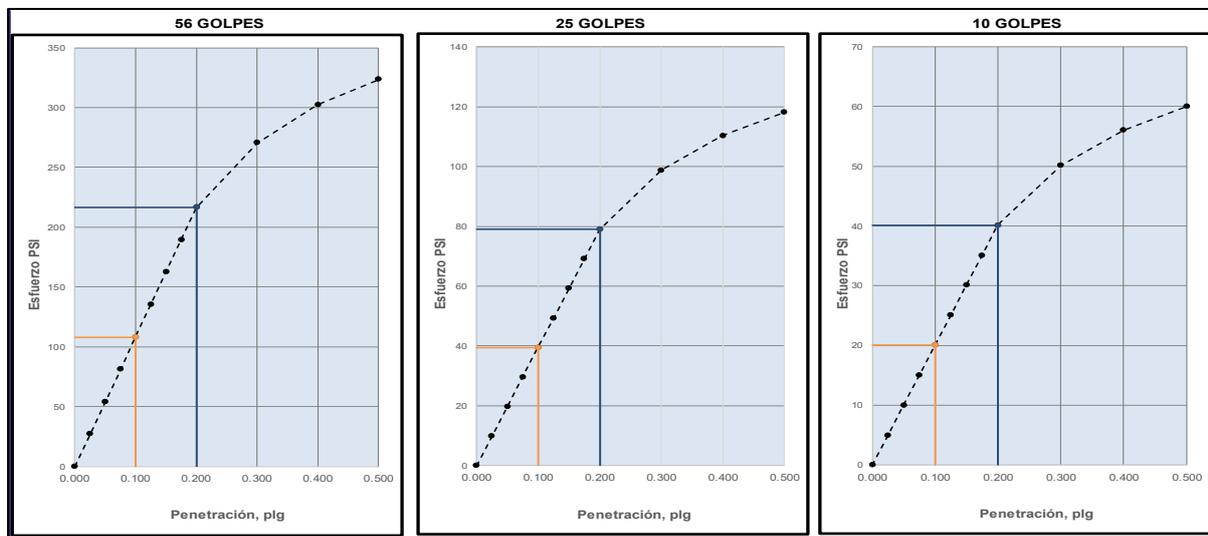


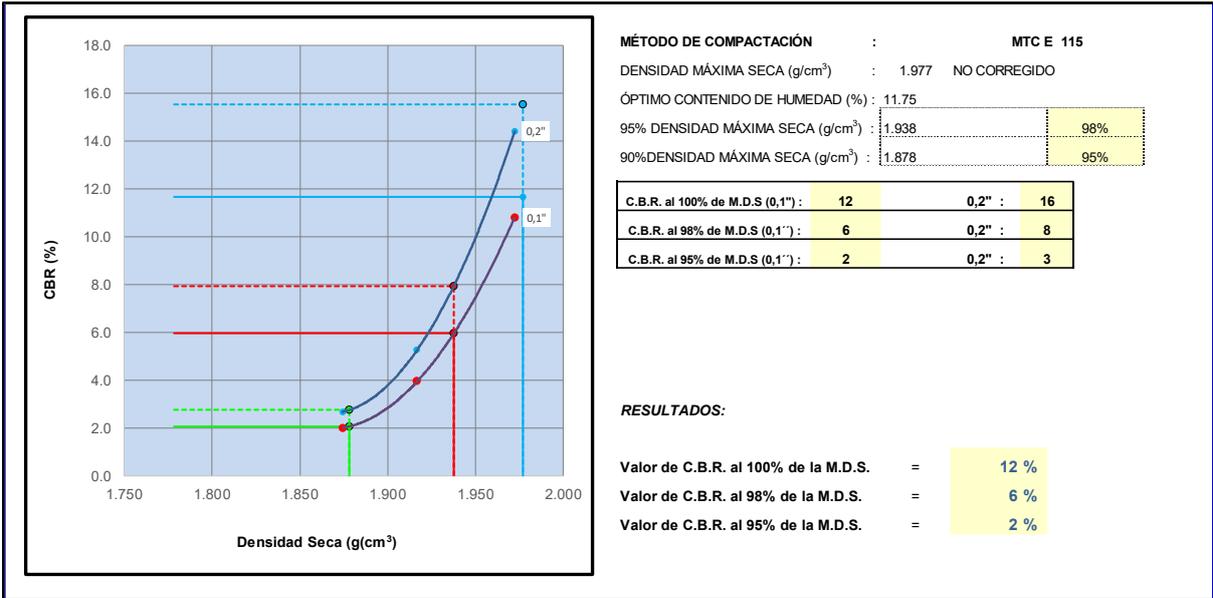
Anexo A-4.2 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 02+200

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	12190.00	12210.00	12110.00	12290.00	10800.00	11200.00
Peso de molde (g)	7145.00	7145.00	7145.00	7145.00	5968.00	5968.00
Peso del Suelo húmedo (g)	5045.00	5065.00	4965.00	5145.00	4832.00	5232.00
Volumen del molde (cm ³)	2279.78	2279.78	2309.68	2309.68	2298.17	2298.17
Densidad húmeda (g/cm³)	2.213	2.222	2.150	2.228	2.103	2.277
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	110.83	88.64	87.37	99.93	93.72	104.15
Peso suelo seco + tara (g)	105.56	84.37	84.46	94.04	89.67	98.24
Peso tara (g)	62.36	57.23	60.50	56.72	56.39	63.11
Peso de agua (g)	5.27	4.27	2.91	5.89	4.05	5.91
Peso de suelo seco (g)	43.20	27.14	23.96	37.32	33.28	35.13
Contenido de humedad (%)	12.20	15.73	12.15	15.78	12.17	16.82
Densidad seca (g/cm³)	1.972	1.920	1.917	1.924	1.874	1.949
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	1.972	1.920	1.917	1.924	1.874	1.949

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
27/03/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
28/03/24	11:20	24.00	15	0.381	0.3	27	0.686	0.5	33	0.838	0.7	
29/03/24	11:20	48.00	38	0.965	0.8	45	1.143	0.9	48	1.219	1.0	
30/03/24	11:20	72.00	48	1.219	1.0	55	1.397	1.1	59	1.499	1.2	
01/04/24	11:20	120.00	52	1.321	1.1	61	1.549	1.2	69	1.753	1.4	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm ²	MOLDE N° 3				MOLDE N° 2				MOLDE N° 1			
mm	pulg.		lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		51	37.2	27.0		25	18.4	9.9		29	21.5	5.0	
1.270	0.050		106	77.9	54.1		38	27.8	19.7		34	24.6	10.0	
1.905	0.075		170	124.9	81.1		59	43.4	29.6		38	27.8	15.0	
2.540	0.100	70.455	204	150.0	108.2	10.8	72	52.8	39.5	3.9	42	30.9	20.1	2.0
3.175	0.125		230	168.8	135.2		85	62.2	49.4		46	34.0	25.1	
3.810	0.150		260	190.8	162.2		93	68.5	59.2		51	37.2	30.1	
4.445	0.175		281	206.4	189.3		102	74.8	69.1		55	40.3	35.1	
5.080	0.200	105.680	302	222.1	216.3	14.4	110	81.1	79.0	5.3	59	43.4	40.1	2.7
7.620	0.300		362	266.0	270.4		132	96.7	98.7		63	46.6	50.2	
10.160	0.400		405	297.4	302.2		153	112.4	110.4		68	49.7	56.1	
12.700	0.500		434	319.3	323.4		170	124.9	118.1		72	52.8	60.0	



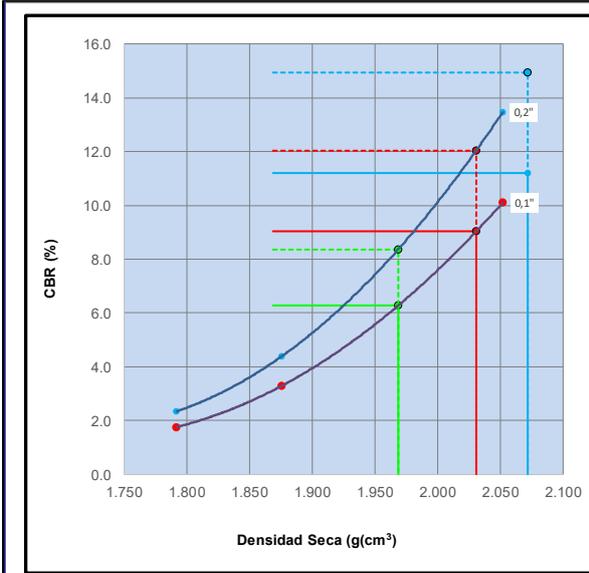
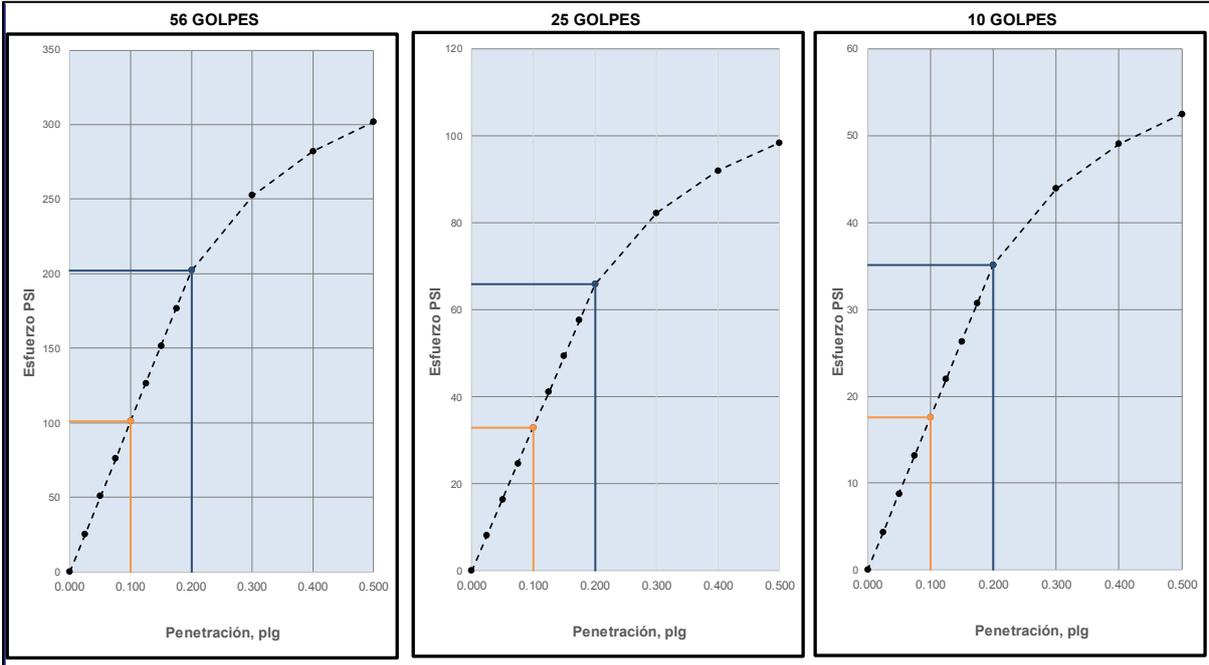


Anexo A-4.3 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 03+060

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	12100.00	11957.00	11780.00	11823.00	11780.00	11959.00
Peso de molde (g)	6845.00	6845.00	6917.00	6917.00	7138.00	7138.00
Peso del Suelo húmedo (g)	5255.00	5112.00	4863.00	4906.00	4642.00	4821.00
Volumen del molde (cm ³)	2279.78	2279.78	2309.68	2309.68	2298.17	2298.17
Densidad húmeda (g/cm³)	2.305	2.242	2.105	2.124	2.020	2.098
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	88.46	94.92	102.54	105.65	90.38	105.45
Peso suelo seco + tara (g)	84.97	89.70	97.75	97.59	86.86	98.55
Peso tara (g)	56.72	58.45	58.68	56.73	59.26	63.46
Peso de agua (g)	3.49	5.22	4.79	8.06	3.52	6.90
Peso de suelo seco (g)	28.25	31.25	39.07	40.86	27.60	35.09
Contenido de humedad (%)	12.35	16.70	12.26	19.73	12.75	19.66
Densidad seca (g/cm³)	2.052	1.921	1.876	1.774	1.791	1.753
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	2.052	1.921	1.876	1.774	1.791	1.753

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
27/03/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
28/03/24	11:20	24.00	15	0.381	0.3	27	0.686	0.5	33	0.838	0.7	
29/03/24	11:20	48.00	38	0.965	0.8	45	1.143	0.9	48	1.219	1.0	
30/03/24	11:20	72.00	48	1.219	1.0	55	1.397	1.1	59	1.499	1.2	
01/04/24	11:20	120.00	52	1.321	1.1	61	1.549	1.2	69	1.753	1.4	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm2	MOLDE N°				MOLDE N°				MOLDE N°			
mm	pulg.		lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		55	40.3	25.2		25	18.4	8.2		22	16.0	4.4	
1.270	0.050		102	74.8	50.5		34	24.6	16.5		29	21.5	8.8	
1.905	0.075		170	124.9	75.7		42	30.9	24.7		38	27.9	13.2	
2.540	0.100	70.455	204	150.0	100.9	10.1	55	40.3	32.9	3.3	44	32.4	17.6	1.8
3.175	0.125		221	162.6	126.2		59	43.4	41.1		48	35.5	21.9	
3.810	0.150		251	184.5	151.4		68	49.7	49.4		52	37.9	26.3	
4.445	0.175		272	200.2	176.6		76	56.0	57.6		57	41.8	30.7	
5.080	0.200	105.680	302	222.1	201.9	13.5	85	62.2	65.8	4.4	61	44.9	35.1	2.3
7.620	0.300		341	250.3	252.4		98	72.0	82.3		65	48.0	43.9	
10.160	0.400		400	294.2	282.0		115	84.2	92.0		75	55.0	49.1	
12.700	0.500		422	309.9	301.8		132	96.7	98.4		79	58.2	52.5	



MÉTODO DE COMPACTACIÓN : MTC E 115

DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.072 NO CORREGIDO

ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) : 13.08

95% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.031 98%

90% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 1.968 95%

C.B.R. al 100% de M.D.S (0,1") :	11	0,2" :	15
C.B.R. al 98% de M.D.S (0,1") :	9	0,2" :	12
C.B.R. al 95% de M.D.S (0,1") :	6	0,2" :	8

RESULTADOS:

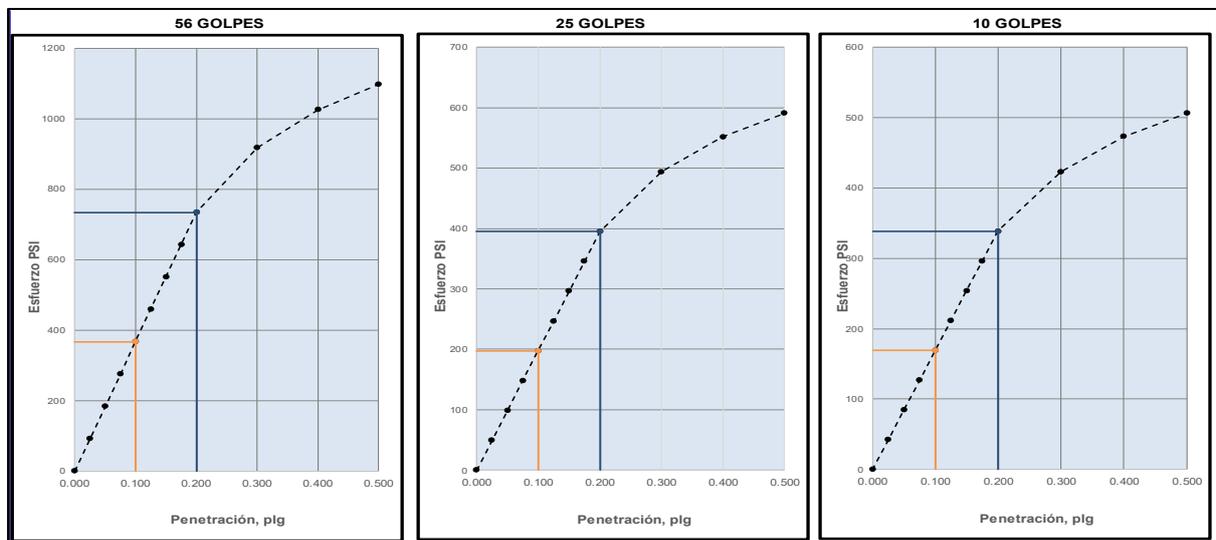
Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 11 %
 Valor de C.B.R. al 98% de la M.D.S. = 9 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 6 %

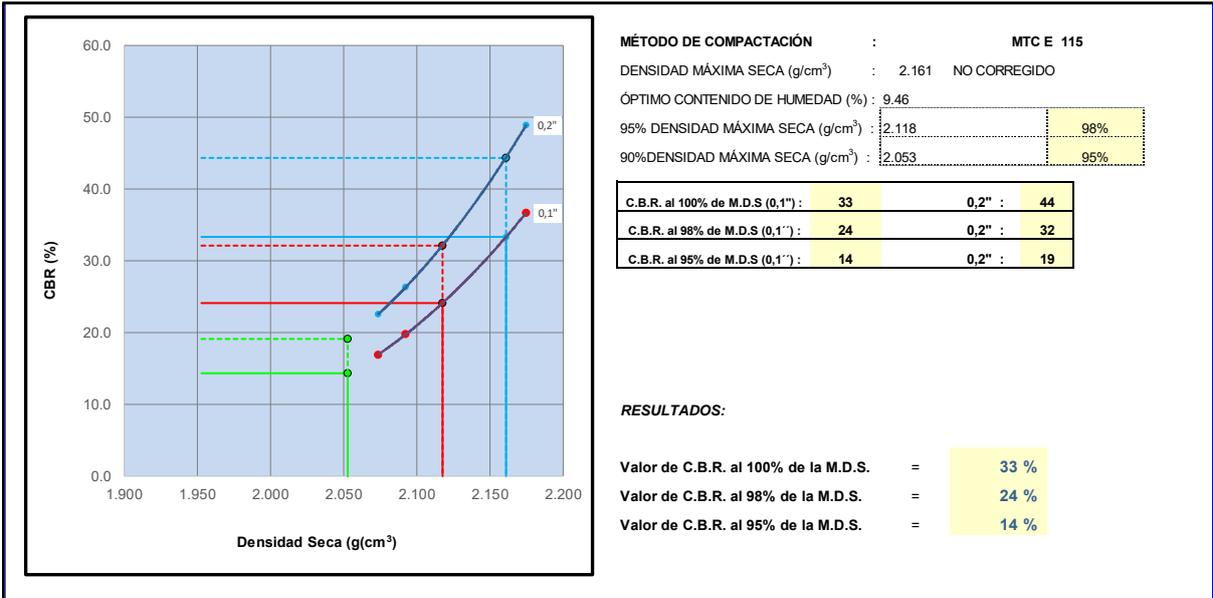
Anexo A-4.4 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 04+040

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11582.00	12147.00	10603.00	11352.00	12118.00	11882.00
Peso de molde (g)	6762.00	6762.00	5965.00	5965.00	7040.00	7040.00
Peso del Suelo húmedo (g)	4820.00	5385.00	4638.00	5387.00	5078.00	4842.00
Volumen del molde (cm ³)	2047.36	2047.36	2047.36	2047.36	2279.78	2279.78
Densidad húmeda (g/cm³)	2.354	2.630	2.265	2.631	2.227	2.124
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	57.08	143.60	68.99	141.19	66.56	119.76
Peso suelo seco + tara (g)	54.37	134.88	65.35	130.96	63.44	112.49
Peso tara (g)	21.56	59.59	21.31	57.13	21.40	62.56
Peso de agua (g)	2.71	8.72	3.64	10.23	3.12	7.27
Peso de suelo seco (g)	32.81	75.29	44.04	73.83	42.04	49.93
Contenido de humedad (%)	8.26	11.58	8.27	13.86	7.42	14.56
Densidad seca (g/cm³)	2.175	2.357	2.092	2.311	2.074	1.854
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	2.175	2.357	2.092	2.311	2.074	1.854

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
18/04/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
19/04/24	11:20	24.00	12	0.305	0.2	25	0.635	0.5	32	0.813	0.7	
20/04/24	11:20	48.00	24	0.610	0.5	35	0.889	0.7	45	1.143	0.9	
21/04/24	11:20	72.00	36	0.914	0.7	45	1.143	0.9	55	1.397	1.1	
22/04/24	11:20	96.00	44	1.118	0.9	57	1.448	1.2	61	1.549	1.2	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm ²	MOLDE N° 3				MOLDE N° 2				MOLDE N° 1			
mm	pulg.		lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		29	21.5	91.7		38	27.8	49.4		29	21.5	42.3	
1.270	0.050		85	62.2	183.4		89	65.4	98.7		55	40.3	84.6	
1.905	0.075		187	137.5	275.1		161	118.7	148.1		59	43.4	127.0	
2.540	0.100	70.455	319	234.7	366.8	36.7	217	159.4	197.5	19.7	68	49.7	169.3	16.9
3.175	0.125		417	306.8	458.5		264	193.9	246.9		76	56.0	211.6	
3.810	0.150		498	366.3	550.2		302	222.1	296.2		97	71.6	253.9	
4.445	0.175		550	403.9	641.9		336	247.2	345.6		123	90.5	296.2	
5.080	0.200	105.680	597	438.4	733.5	48.9	366	269.1	395.0	26.3	144	106.1	338.6	22.6
7.620	0.300		708	519.9	916.9		460	338.1	493.7		208	153.2	423.2	
10.160	0.400		763	560.7	1024.8		520	382.0	551.8		251	184.5	473.0	
12.700	0.500		895	657.9	1096.7		605	444.7	590.5		294	215.9	506.2	



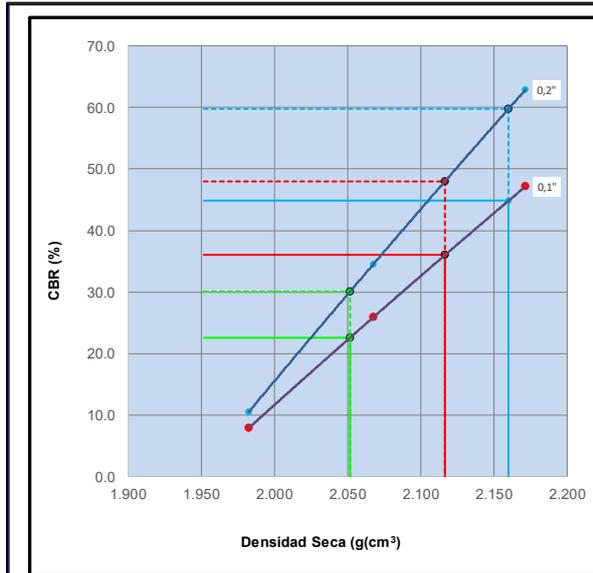
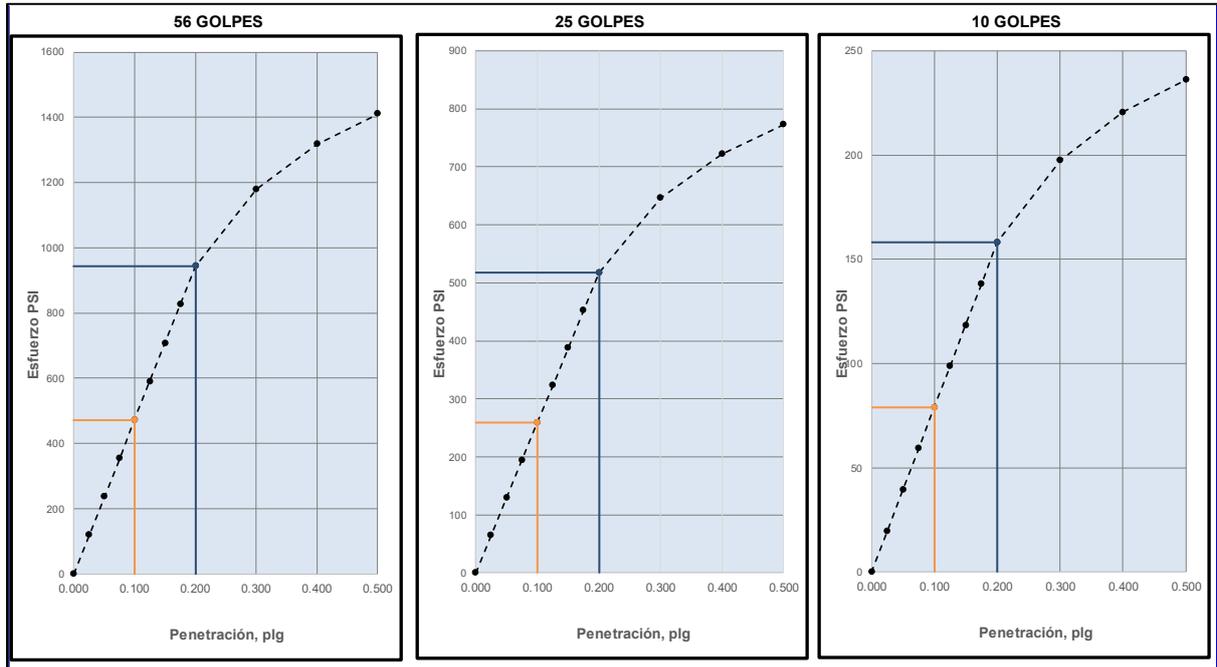


Anexo A-4.5 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 05+360

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11654.00	11800.00	11300.00	11500.00	10400.00	10800.00
Peso de molde (g)	6867.00	6867.00	6755.00	6755.00	5960.00	5960.00
Peso del Suelo húmedo (g)	4787.00	4933.00	4545.00	4745.00	4440.00	4840.00
Volumen del molde (cm³)	2017.36	2017.36	2017.36	2017.36	2047.36	2047.36
Densidad húmeda (g/cm³)	2.373	2.445	2.253	2.352	2.169	2.364
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	87.28	96.65	86.51	115.99	105.63	116.33
Peso suelo seco + tara (g)	84.85	92.60	84.10	109.24	101.98	108.35
Peso tara (g)	58.67	58.84	57.25	60.52	63.11	56.73
Peso de agua (g)	2.43	4.05	2.41	6.75	3.65	7.98
Peso de suelo seco (g)	26.18	33.76	26.85	48.72	38.87	51.62
Contenido de humedad (%)	9.28	12.00	8.98	13.85	9.39	15.46
Densidad seca (g/cm³)	2.171	2.183	2.067	2.066	1.982	2.047
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	2.171	2.183	2.067	2.066	1.982	2.047

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
27/11/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
28/11/24	11:20	24.00	15	0.381	0.3	23	0.584	0.5	33	0.838	0.7	
29/11/24	11:20	48.00	24	0.610	0.5	27	0.686	0.5	36	0.914	0.7	
30/11/24	11:20	72.00	27	0.686	0.5	32	0.813	0.7	42	1.067	0.9	
01/12/24	11:20	96.00	28	0.711	0.6	40	1.016	0.8	45	1.143	0.9	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm2	MOLDE N°			3	MOLDE N°			2	MOLDE N°			1
mm	pulg.		lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		38	27.8	117.9		29	21.5	64.7		38	27.8	19.7	
1.270	0.050		93	68.5	235.7		55	40.3	129.3		55	40.3	39.5	
1.905	0.075		243	178.2	353.6		106	77.9	194.0		85	62.2	59.2	
2.540	0.100	70.455	417	306.8	471.5	47.1	196	143.7	258.6	25.9	110	81.1	79.0	7.9
3.175	0.125		562	413.3	589.3		277	203.3	323.3		136	99.9	98.7	
3.810	0.150		682	501.1	707.2		336	247.2	387.9		153	112.4	118.5	
4.445	0.175		759	557.5	825.1		388	284.8	452.6		170	124.9	138.2	
5.080	0.200	105.680	818	601.4	943.0	62.9	430	316.2	517.2	34.5	187	137.5	158.0	10.5
7.620	0.300		1027	755.0	1178.7		533	391.4	646.6		243	178.2	197.5	
10.160	0.400		1211	889.8	1317.4		631	463.5	722.6		285	209.6	220.7	
12.700	0.500		1382	1015.2	1409.8		699	513.7	773.3		328	240.9	236.2	



MÉTODO DE COMPACTACIÓN : MTC E 115

DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.160 NO CORREGIDO

ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) : 9.65

95% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.117 98%

90% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.052 95%

C.B.R. al 100% de M.D.S (0,1") :	45	0,2" :	60
C.B.R. al 98% de M.D.S (0,1") :	36	0,2" :	48
C.B.R. al 95% de M.D.S (0,1") :	23	0,2" :	30

RESULTADOS:

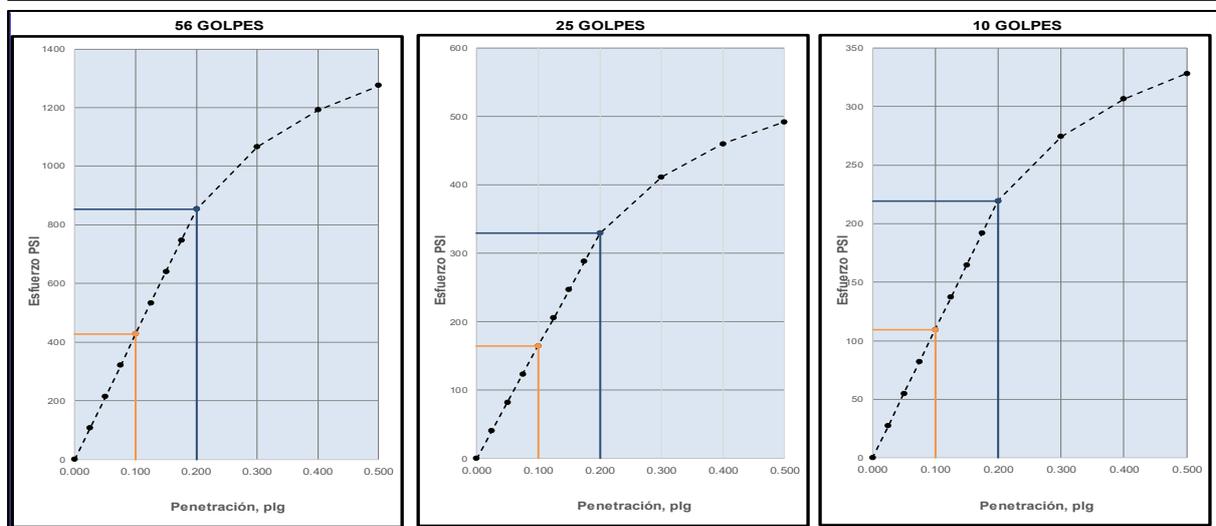
Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 45 %
 Valor de C.B.R. al 98% de la M.D.S. = 36 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 23 %

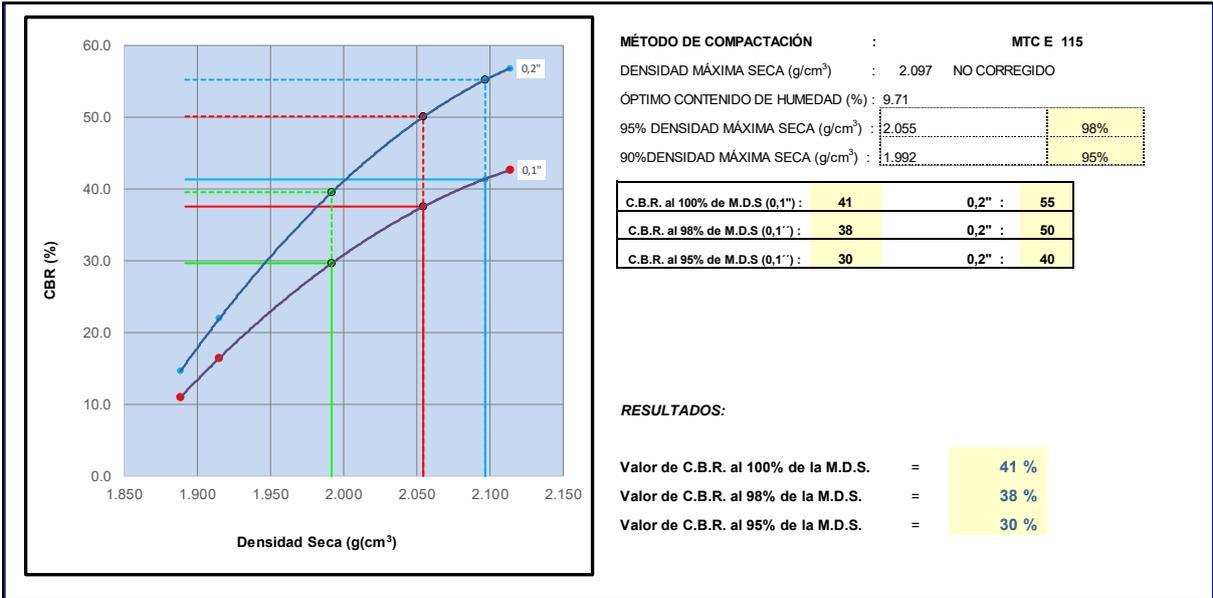
Anexo A-4.6 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 06+550

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11467.00	11892.00	10165.00	11160.00	10859.00	11460.00
Peso de molde (g)	6867.00	6867.00	5960.00	5960.00	6755.00	6755.00
Peso del Suelo húmedo (g)	4600.00	5025.00	4205.00	5200.00	4104.00	4705.00
Volumen del molde (cm ³)	2017.36	2017.36	2047.36	2047.36	2017.36	2017.36
Densidad húmeda (g/cm³)	2.280	2.491	2.054	2.540	2.034	2.332
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	103.57	117.51	108.06	120.27	123.89	131.34
Peso suelo seco + tara (g)	99.93	109.87	104.63	111.80	119.27	121.22
Peso tara (g)	53.77	53.76	57.32	57.31	59.50	57.61
Peso de agua (g)	3.64	7.64	3.43	8.47	4.62	10.12
Peso de suelo seco (g)	46.16	56.11	47.31	54.49	59.77	63.61
Contenido de humedad (%)	7.89	13.62	7.25	15.54	7.73	15.91
Densidad seca (g/cm³)	2.114	2.192	1.915	2.198	1.888	2.012
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	2.114	2.192	1.915	2.198	1.888	2.012

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
27/11/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
28/11/24	11:20	24.00	25	0.635	0.5	12	0.305	0.2	25	0.635	0.5	
29/11/24	11:20	48.00	36	0.914	0.7	24	0.610	0.5	35	0.889	0.7	
30/11/24	11:20	72.00	50	1.270	1.0	36	0.914	0.7	45	1.143	0.9	
01/12/24	11:20	96.00	74	1.880	1.5	44	1.118	0.9	57	1.448	1.2	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND.	MOLDE N° 3				MOLDE N° 2				MOLDE N° 1			
			lecturas Kg	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kg	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kg	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
mm	pulg.	kg/cm ²												
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		29	21.5	106.6		38	27.8	41.1		34	24.6	27.4	
1.270	0.050		85	62.2	213.2		89	65.4	82.3		59	43.4	54.9	
1.905	0.075		204	150.0	319.8		161	118.7	123.4		102	74.8	82.3	
2.540	0.100	70.455	379	278.5	426.3	42.6	217	159.4	164.6	16.5	144	106.1	109.7	
3.175	0.125		516	378.9	532.9		264	193.9	205.7		191	140.6	137.1	
3.810	0.150		567	416.5	639.5		302	222.1	246.9		234	172.0	164.6	
4.445	0.175		656	482.3	746.1		319	234.7	288.0		268	197.0	192.0	
5.080	0.200	105.680	742	545.0	852.7	56.8	366	269.1	329.2	21.9	294	215.9	219.4	
7.620	0.300		929	682.9	1065.8		460	338.1	411.4		375	275.4	274.3	
10.160	0.400		1087	798.9	1191.2		520	382.0	459.9		434	319.3	306.6	
12.700	0.500		1211	889.8	1274.8		605	444.7	492.1		507	372.6	328.1	



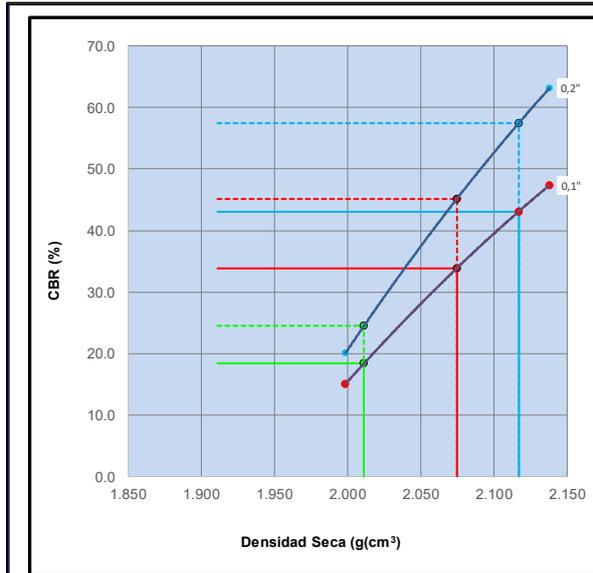
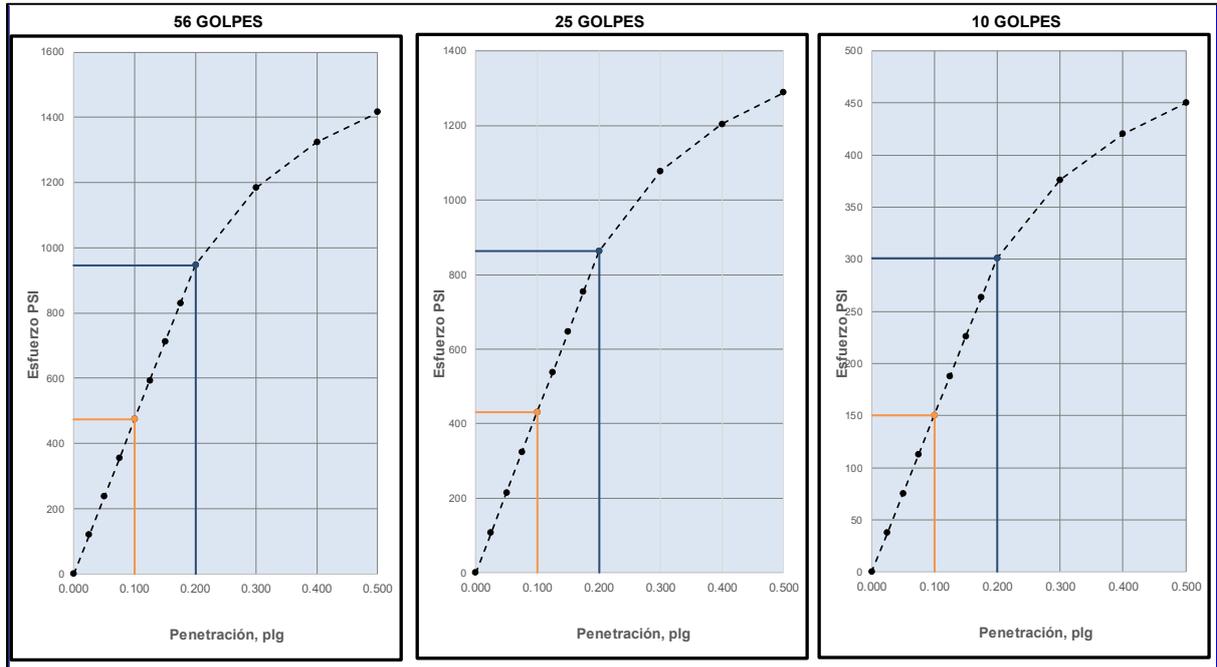


Anexo A-4.7 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 07+400

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11900.00	12310.00	10756.00	11197.00	11297.00	11700.00
Peso de molde (g)	7145.00	7145.00	6114.00	6114.00	6845.00	6845.00
Peso del Suelo húmedo (g)	4755.00	5165.00	4642.00	5083.00	4452.00	4855.00
Volumen del molde (cm³)	2047.36	2047.36	2017.36	2017.36	2047.36	2047.36
Densidad húmeda (g/cm³)	2.323	2.523	2.301	2.520	2.175	2.371
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	134.66	98.88	127.78	131.85	134.15	121.91
Peso suelo seco + tara (g)	128.94	94.44	122.14	123.01	127.82	112.82
Peso tara (g)	62.75	54.66	57.30	57.26	55.95	51.73
Peso de agua (g)	5.72	4.44	5.64	8.84	6.33	9.09
Peso de suelo seco (g)	66.19	39.78	64.84	65.75	71.87	61.09
Contenido de humedad (%)	8.64	11.16	8.70	13.44	8.81	14.88
Densidad seca (g/cm³)	2.138	2.269	2.117	2.221	1.998	2.064
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	2.138	2.269	2.117	2.221	1.998	2.064

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
28/06/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
29/06/24	11:20	24.00	24	0.610	0.5	34	0.864	0.7	35	0.889	0.7	
30/06/24	11:20	48.00	28	0.711	0.6	36	0.914	0.7	37	0.940	0.8	
01/07/24	11:20	72.00	29	0.737	0.6	36	0.914	0.7	38	0.965	0.8	
02/07/24	11:20	96.00	30	0.762	0.6	37	0.940	0.8	39	0.991	0.8	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm2	MOLDE N° 3				MOLDE N° 2				MOLDE N° 1			
mm	pulg.		lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		38	27.8	118.3		44	32.5	107.8		25	18.4	37.6	
1.270	0.050		123	90.5	236.7		70	51.3	215.5		46	34.0	75.2	
1.905	0.075		307	225.3	355.0		121	88.9	323.3		80	59.1	112.9	
2.540	0.100	70.455	729	535.6	473.4	47.3	211	154.8	431.0	43.1	97	71.6	150.5	15.0
3.175	0.125		1062	780.1	591.7		292	214.3	538.8		115	84.2	188.1	
3.810	0.150		1177	864.8	710.0		334	245.7	646.6		127	93.6	225.7	
4.445	0.175		1305	958.8	828.4		403	295.8	754.3		136	99.9	263.3	
5.080	0.200	105.680	1373	1009.0	946.7	63.1	445	327.2	862.1	57.5	149	109.3	300.9	20.1
7.620	0.300		1497	1099.9	1183.4		548	402.4	1077.6		179	131.2	376.2	
10.160	0.400		1544	1134.4	1322.6		646	474.5	1204.4		204	150.0	420.4	
12.700	0.500		1676	1231.5	1415.4		714	524.7	1288.9		234	172.0	449.9	



MÉTODO DE COMPACTACIÓN : MTC E 115

DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.117 NO CORREGIDO

ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) : 8.53

95% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.075 98%

90% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.011 95%

C.B.R. al 100% de M.D.S (0,1") :	43	0,2" :	57
C.B.R. al 98% de M.D.S (0,1") :	34	0,2" :	45
C.B.R. al 95% de M.D.S (0,1") :	18	0,2" :	24

RESULTADOS:

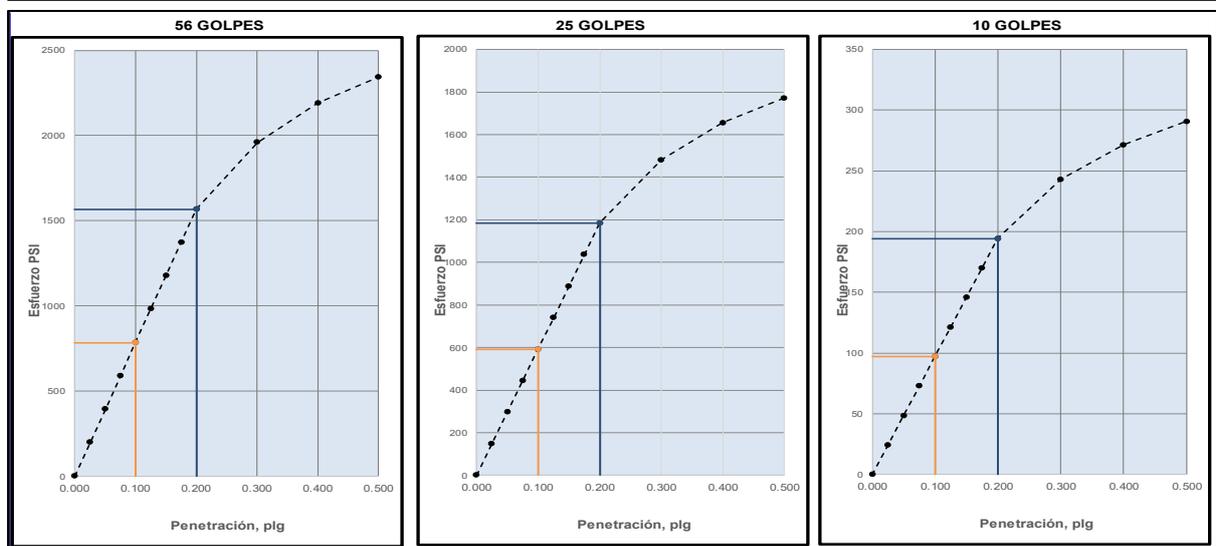
Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 43 %
 Valor de C.B.R. al 98% de la M.D.S. = 34 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 18 %

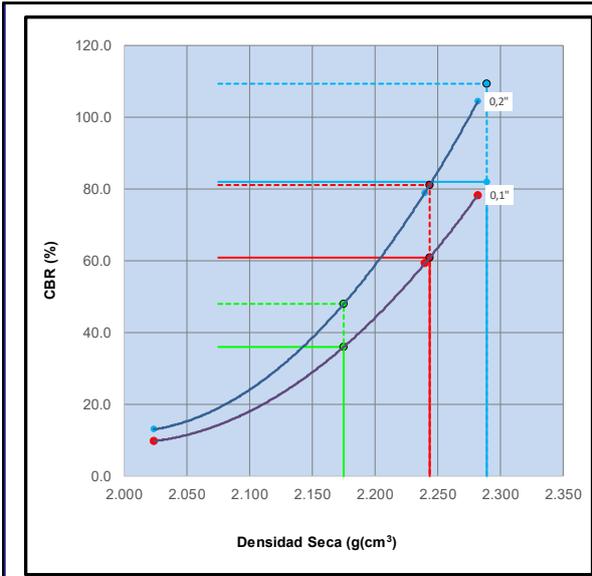
Anexo A-4.8 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 08+300

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	12179.00	12211.00	11115.00	11376.00	11324.00	11605.00
Peso de molde (g)	7140.00	7140.00	6110.00	6110.00	6842.00	6842.00
Peso del Suelo húmedo (g)	5039.00	5071.00	5005.00	5266.00	4482.00	4763.00
Volumen del molde (cm ³)	2017.36	2017.36	2047.36	2047.36	2017.36	2017.36
Densidad húmeda (g/cm³)	2.498	2.514	2.445	2.572	2.222	2.361
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	135.01	133.20	111.97	118.57	132.10	160.03
Peso suelo seco + tara (g)	128.29	124.67	106.92	110.54	125.20	145.15
Peso tara (g)	57.27	58.94	51.74	59.52	54.62	58.08
Peso de agua (g)	6.72	8.53	5.05	8.03	6.90	14.88
Peso de suelo seco (g)	71.02	65.73	55.18	51.02	70.58	87.07
Contenido de humedad (%)	9.46	12.98	9.15	15.74	9.78	17.09
Densidad seca (g/cm³)	2.282	2.225	2.240	2.222	2.024	2.016
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	2.282	2.225	2.240	2.222	2.024	2.016

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
04/07/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
05/07/24	11:20	24.00	18	0.457	0.4	24	0.610	0.5	33	0.838	0.7	
06/07/24	11:20	48.00	29	0.737	0.6	30	0.762	0.6	40	1.016	0.8	
07/07/24	11:20	72.00	32	0.813	0.7	35	0.889	0.7	42	1.067	0.9	
08/07/24	11:20	96.00	34	0.864	0.7	40	1.016	0.8	45	1.143	0.9	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm ²	MOLDE N° 3				MOLDE N° 2				MOLDE N° 1			
			lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
mm	pulg.													
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		42	30.9	195.8		16	12.1	148.1		42	30.9	24.3	
1.270	0.050		336	247.2	391.7		29	21.5	296.2		106	77.9	48.6	
1.905	0.075		656	482.3	587.5		85	62.2	444.4		217	159.4	72.9	
2.540	0.100	70.455	882	648.5	783.4	78.3	204	150.0	592.5	59.2	294	215.9	97.2	
3.175	0.125		1091	802.1	979.2		379	278.5	740.6		341	250.3	121.5	
3.810	0.150		1211	889.8	1175.1		516	378.9	888.7		379	278.5	145.8	
4.445	0.175		1382	1015.2	1370.9		567	416.5	1036.8		409	300.5	170.1	
5.080	0.200	105.680	1509	1109.3	1566.8	104.5	742	545.0	1185.0	79.0	426	313.0	194.4	
7.620	0.300		1723	1266.0	1958.5		929	682.9	1481.2		498	366.3	242.9	
10.160	0.400		1902	1397.7	2188.9		1087	798.9	1655.5		562	413.3	271.5	
12.700	0.500		2064	1516.8	2342.5		1211	889.8	1771.6		635	466.6	290.6	





MÉTODO DE COMPACTACIÓN : MTC E 115

DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.289 NO CORREGIDO

ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) : 9.22

95% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.243 98%

90% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.175 95%

C.B.R. al 100% de M.D.S (0,1") :	82	0,2" :	109
C.B.R. al 98% de M.D.S (0,1") :	61	0,2" :	81
C.B.R. al 95% de M.D.S (0,1") :	36	0,2" :	48

RESULTADOS:

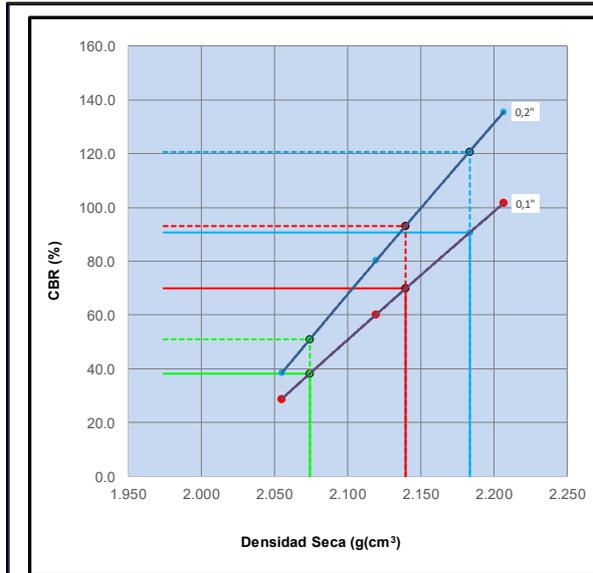
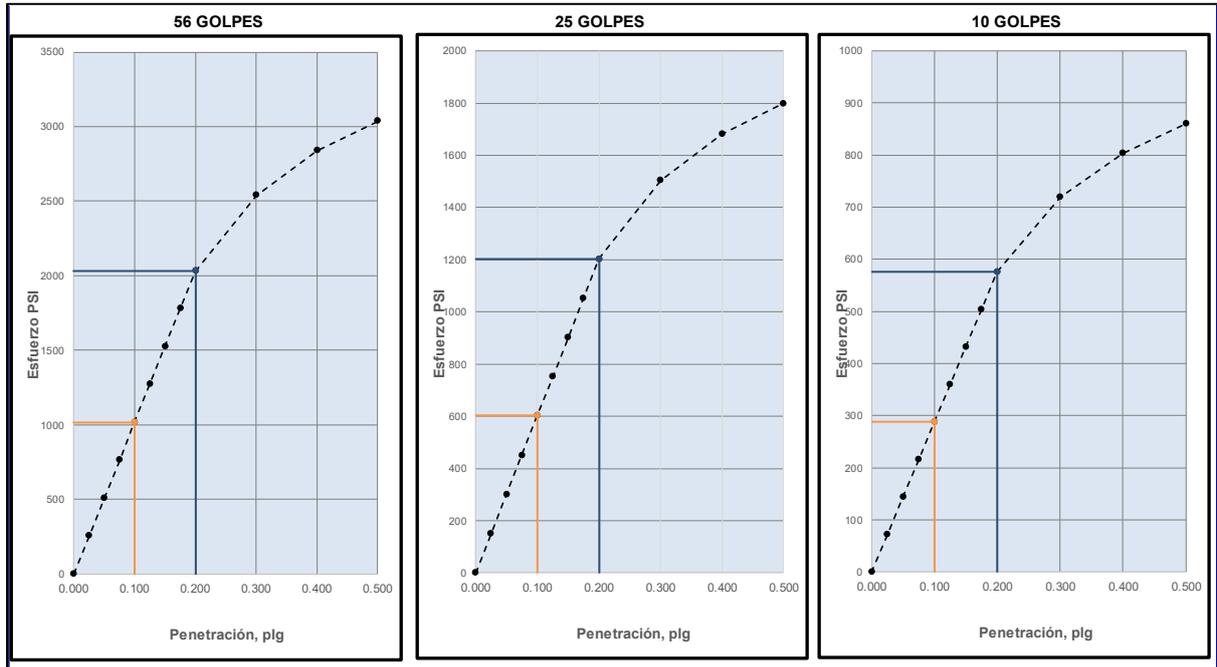
Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S.	=	82 %
Valor de C.B.R. al 98% de la M.D.S.	=	61 %
Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S.	=	36 %

Anexo A-4.9 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 09+630

COMPACTACIÓN						
	3		2		1	
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11800.00	12000.00	11800.00	11900.00	11350.00	11550.00
Peso de molde (g)	6900.00	6900.00	7100.00	7100.00	6800.00	6800.00
Peso del Suelo húmedo (g)	4900.00	5100.00	4700.00	4800.00	4550.00	4750.00
Volumen del molde (cm³)	2047.36	2047.36	2047.36	2047.36	2047.36	2047.36
Densidad húmeda (g/cm³)	2.393	2.491	2.296	2.344	2.222	2.320
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	116.96	134.68	106.23	142.32	122.85	139.88
Peso suelo seco + tara (g)	112.26	127.91	102.58	134.56	118.35	132.09
Peso tara (g)	56.74	58.41	58.68	57.61	63.17	56.42
Peso de agua (g)	4.70	6.77	3.65	7.76	4.50	7.79
Peso de suelo seco (g)	55.52	69.50	43.90	76.95	55.18	75.67
Contenido de humedad (%)	8.47	9.74	8.31	10.08	8.16	10.29
Densidad seca (g/cm³)	2.207	2.270	2.119	2.130	2.055	2.104
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	2.207	2.270	2.119	2.130	2.055	2.104

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
19/05/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
20/05/24	11:20	24.00	4	0.102	0.1	10	0.254	0.2	12	0.305	0.2	
21/05/24	11:20	48.00	10	0.254	0.2	11	0.279	0.2	14	0.356	0.3	
22/05/24	11:20	72.00	11	0.279	0.2	12	0.305	0.2	15	0.381	0.3	
23/05/24	11:20	96.00	12	0.305	0.2	13	0.330	0.3	16	0.406	0.3	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm ²	MOLDE N° 3				MOLDE N° 2				MOLDE N° 1			
mm	pulg.		lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		123	90.5	253.9		68	49.7	150.5		46	34.0	71.9	
1.270	0.050		251	184.5	507.8		170	124.9	300.9		85	62.2	143.9	
1.905	0.075		443	325.6	761.8		336	247.2	451.4		191	140.6	215.8	
2.540	0.100	70.455	784	576.4	1015.7	101.6	430	316.2	601.9	60.2	268	197.0	287.8	28.8
3.175	0.125		1083	795.8	1269.6		528	388.3	752.4		336	247.2	359.7	
3.810	0.150		1382	1015.2	1523.5		635	466.6	902.8		379	278.5	431.7	
4.445	0.175		1637	1203.3	1777.4		853	626.5	1053.3		422	309.9	503.6	
5.080	0.200	105.680	1936	1422.8	2031.4	135.4	976	717.4	1203.8	80.3	486	356.9	575.6	38.4
7.620	0.300		2811	2065.4	2539.2		1190	874.2	1504.7		592	435.3	719.4	
10.160	0.400		3344	2457.2	2837.9		1382	1015.2	1681.7		665	488.6	804.1	
12.700	0.500		3770	2770.7	3037.1		1701	1250.3	1799.8		844	620.2	860.5	



MÉTODO DE COMPACTACIÓN : MTC E 115

DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.183 NO CORREGIDO

ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%) : 8.95

95% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.140 98%

90% DENSIDAD MÁXIMA SECA (g/cm³) : 2.074 95%

C.B.R. al 100% de M.D.S (0,1") :	91	0,2" :	121
C.B.R. al 98% de M.D.S (0,1") :	70	0,2" :	93
C.B.R. al 95% de M.D.S (0,1") :	38	0,2" :	51

RESULTADOS:

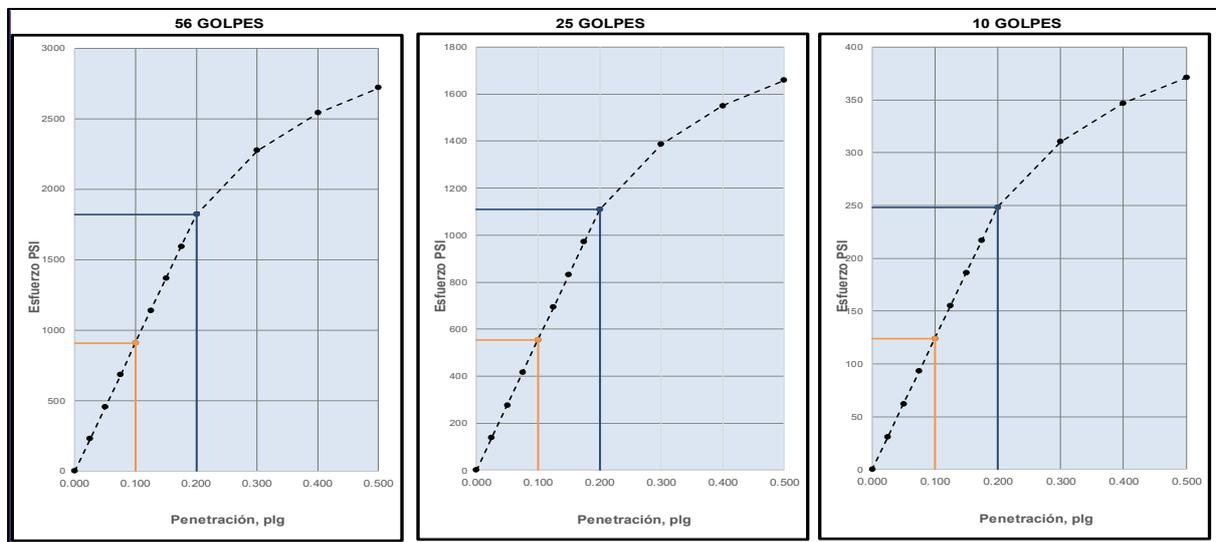
Valor de C.B.R. al 100% de la M.D.S. = 91 %
 Valor de C.B.R. al 98% de la M.D.S. = 70 %
 Valor de C.B.R. al 95% de la M.D.S. = 38 %

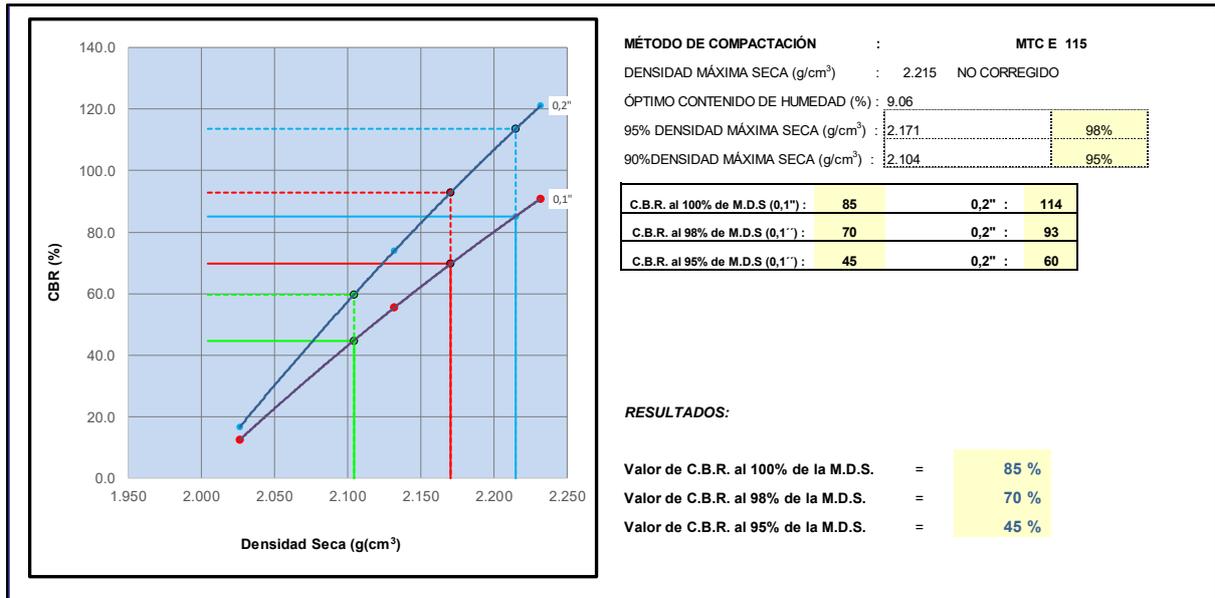
Anexo A-4.10 MTC E 132 CBR de suelos (laboratorio) km: 10+500

COMPACTACIÓN						
Molde N°	3		2		1	
Capas N°	5		5		5	
Golpes por Capa N°	55		26		12	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	11740.00	12045.00	10628.00	11300.00	11208.00	11626.00
Peso de molde (g)	6865.00	6865.00	5960.00	5960.00	6753.00	6753.00
Peso del Suelo húmedo (g)	4875.00	5180.00	4668.00	5340.00	4455.00	4873.00
Volumen del molde (cm ³)	2017.36	2017.36	2047.36	2047.36	2017.36	2017.36
Densidad húmeda (g/cm³)	2.417	2.568	2.280	2.608	2.208	2.416
Tara (N°)	0	0	0	0	0	0
Peso suelo húmedo + tara (g)	113.88	138.19	119.24	139.25	124.78	149.46
Peso suelo seco + tara (g)	109.38	129.89	115.60	130.17	119.21	137.72
Peso tara (g)	54.96	59.49	63.15	58.43	57.28	54.97
Peso de agua (g)	4.50	8.30	3.64	9.08	5.57	11.74
Peso de suelo seco (g)	54.42	70.40	52.45	71.74	61.93	82.75
Contenido de humedad (%)	8.27	11.79	6.94	12.66	8.99	14.19
Densidad seca (g/cm³)	2.232	2.297	2.132	2.315	2.026	2.115
Densidad seca (g/cm³) - No corregido	2.232	2.297	2.132	2.315	2.026	2.115

EXPANSIÓN												
FECHA	HORA	TIEMPO	DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		DIAL	EXPANSIÓN		
				mm	%		mm	%		mm	%	
27/11/24	11:20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	
28/11/24	11:20	24.00	5	0.127	0.1	7	0.178	0.1	7	0.178	0.1	
29/11/24	11:20	48.00	6	0.152	0.1	13	0.330	0.3	13	0.330	0.3	
30/11/24	11:20	72.00	10	0.254	0.2	15	0.381	0.3	20	0.508	0.4	
01/12/24	11:20	96.00	13	0.330	0.3	15	0.381	0.3	28	0.711	0.6	

PENETRACIÓN														
PENETRACIÓN		CARGA ESTAND. kg/cm ²	MOLDE N° 3				MOLDE N° 2				MOLDE N° 1			
			lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido	lecturas Kgf	Esfuerzo PSI (sin corrección)	Esfuerzo PSI (corregido)	CBR % Corregido
mm	pulg.													
0.000	0.000		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0		0	0.0	0.0	
0.635	0.025		144	106.1	227.2		38	27.8	138.7		55	40.3	31.0	
1.270	0.050		494	363.2	454.4		110	81.1	277.4		119	87.3	62.1	
1.905	0.075		1177	864.8	681.6		302	222.1	416.1		191	140.6	93.1	
2.540	0.100	70.455	1817	1335.0	908.8	90.9	533	391.4	554.9	55.5	251	184.5	124.1	12.4
3.175	0.125		2226	1635.9	1136.0		695	510.5	693.6		285	209.6	155.2	
3.810	0.150		2427	1783.3	1363.2		823	604.6	832.3		332	244.1	186.2	
4.445	0.175		2610	1918.1	1590.4		929	682.9	971.0		358	262.9	217.2	
5.080	0.200	105.680	2768	2034.0	1817.6	121.2	1036	761.3	1109.7	74.0	392	288.0	248.3	16.6
7.620	0.300		3399	2498.0	2272.0		1386	1018.4	1387.2		524	385.1	310.3	
10.160	0.400		3830	2814.6	2539.3		1646	1209.6	1550.4		622	457.2	346.9	
12.700	0.500		4090	3005.8	2717.4		1915	1407.1	1659.2		733	538.7	371.2	





ANEXO A-5. ENSAYO DE MODULO RESILIENTE AASTHO T 307-99

Anexo A-5.1.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "CL" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (12.5%)

Secuencia: 1 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 27.6 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
746	24.784	7.774	17.010	64.4000	20.2000	44.20000	0.025	0.0179	113120	0.20928571
747	24.899	7.889	17.010	64.7000	20.5000	44.20000	0.013	0.0093	220769	0.20928571
748	26.862	9.044	17.818	69.8000	23.5000	46.30000	0.025	0.0179	131600	0.20928571
749	27.362	9.544	17.818	71.1000	24.8000	46.30000	0.038	0.0271	91368	0.20928571
750	25.246	8.082	17.164	65.6000	21.0000	44.60000	0.025	0.0179	117600	0.20928571
Promedio	25.831	8.47	17.3642	67.120	22.0000	45.12000	0.0252	0.0180000	134892	0.20928571
Des. Est	1.069122	0.700799	0.375022	2.778057	1.820989	0.974474	0.007909	0.005650	44839.9	0.000000
Secuencia: 2 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 13.8 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	20.551	4.195	16.356	53.4000	10.9000	42.50000	0.013	0.0093	117385	0.20928571
97	21.551	4.888	16.664	56.0000	12.7000	43.30000	0.025	0.0179	71120	0.20928571
98	20.936	4.618	16.317	54.4000	12.0000	42.40000	0.025	0.0179	67200	0.20928571
99	20.551	4.233	16.317	53.4000	11.0000	42.40000	0.013	0.0093	118462	0.20928571
100	20.358	4.041	16.317	52.9000	10.5000	42.40000	0.013	0.0093	113077	0.20928571
Promedio	20.789	4.39	16.3944	54.020	11.4200	42.60000	0.0178	0.0127143	97449	0.20928571
Des. Est	0.424657	0.311130	0.135518	1.103449	0.808455	0.352136	0.005879	0.004199	23200.9	0.000000

Secuencia: 3 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 27.6 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	26.708	9.698	17.010	69.4000	25.2000	44.20000	0.064	0.0457	55125	0.26357143
97	25.515	8.697	16.818	66.3000	22.6000	43.70000	0.051	0.0364	62039	0.25428571
98	27.593	9.544	18.049	71.7000	24.8000	46.90000	0.051	0.0364	68078	0.25428571
99	26.285	9.506	16.779	68.3000	24.7000	43.60000	0.064	0.0457	54031	0.26357143
100	25.554	8.813	16.741	66.4000	22.9000	43.50000	0.051	0.0364	62863	0.25428571
Promedio	26.331	9.25	17.0794	68.420	24.0400	44.38000	0.0562	0.0401429	60427	0.258
Des. Est	0.775594	0.412054	0.493683	2.015341	1.070701	1.282809	0.006369	0.004549	5217.2	0.004549
Secuencia: 4 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 41.4 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	29.595	13.662	15.933	76.9000	35.5000	41.40000	0.071	0.0507	70000	0.31785714
97	29.287	13.854	15.432	76.1000	36.0000	40.10000	0.071	0.0507	70986	0.31785714
98	28.786	13.085	15.702	74.8000	34.0000	40.80000	0.134	0.0957	35522	0.31785714
99	28.863	13.354	15.509	75.0000	34.7000	40.30000	0.071	0.0507	68423	0.31785714
100	29.056	12.200	16.856	75.5000	31.7000	43.80000	0.097	0.0693	45753	0.31785714
Promedio	29.117	13.23	15.8864	75.660	34.3800	41.28000	0.0888	0.0634286	58137	0.31785714
Des. Est	0.294702	0.578754	0.514830	0.765768	1.503862	1.337759	0.024742	0.017673	14672.5	0.000000
Secuencia: 5 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 55.2 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	33.982	17.433	16.548	88.3000	45.3000	43.00000	0.101	0.0721	62792	0.345
97	33.520	17.587	15.933	87.1000	45.7000	41.40000	0.101	0.0721	63347	0.31785714
98	32.750	17.280	15.471	85.1000	44.9000	40.20000	0.152	0.1086	41355	0.31785714
99	32.173	17.087	15.086	83.6000	44.4000	39.20000	0.101	0.0721	61545	0.31785714
100	36.022	18.857	17.164	93.6000	49.0000	44.60000	0.127	0.0907	54016	0.31785714
Promedio	33.689	17.65	16.0403	87.540	45.8600	41.68000	0.1164	0.0831429	56611	0.32328571
Des. Est	1.321673	0.626530	0.744016	3.434298	1.628005	1.933287	0.020451	0.014608	8335.3	0.010857
Secuencia: 6 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 68.9 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	34.598	22.436	12.161	89.9000	58.3000	31.60000	0.152	0.1086	53697	0.31785714
97	33.943	21.898	12.046	88.2000	56.9000	31.30000	0.140	0.1000	56900	0.31785714
98	33.328	21.051	12.277	86.6000	54.7000	31.90000	0.153	0.1093	50052	0.31785714
99	32.442	20.589	11.853	84.3000	53.5000	30.80000	0.165	0.1179	45394	0.30857143
100	32.750	20.551	12.200	85.1000	53.4000	31.70000	0.153	0.1093	48863	0.30857143
Promedio	33.412	21.31	12.1072	86.820	55.3600	31.46000	0.1526	0.1090000	50981	0.31414286
Des. Est	0.783951	0.745289	0.147250	2.037057	1.936595	0.382623	0.007915	0.005653	3974.4	0.004549

Secuencia: 7 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 13.8 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	21.705	5.311	16.394	56.4000	13.8000	42.60000	0.023	0.0164	84000	0.32714286
97	20.897	4.580	16.317	54.3000	11.9000	42.40000	0.023	0.0164	72435	0.32714286
98	21.705	5.388	16.317	56.4000	14.0000	42.40000	0.023	0.0164	85217	0.32714286
99	20.666	4.349	16.317	53.7000	11.3000	42.40000	0.023	0.0164	68783	0.32714286
100	20.820	4.541	16.279	54.1000	11.8000	42.30000	0.023	0.0164	71826	0.32714286
Promedio	21.159	4.83	16.3251	54.980	12.5600	42.42000	0.023	0.0164286	76452	0.32714286
Des. Est	0.452353	0.428960	0.037707	1.175415	1.114630	0.097980	0.000000	0.000000	6784.7	0.000000
Secuencia: 8 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 27.6 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	25.284	8.582	16.702	65.7000	22.3000	43.40000	0.056	0.0400	55750	0.33571429
97	25.438	8.774	16.664	66.1000	22.8000	43.30000	0.056	0.0400	57000	0.33571429
98	27.362	10.583	16.779	71.1000	27.5000	43.60000	0.076	0.0543	50658	0.33571429
99	25.515	8.813	16.702	66.3000	22.9000	43.40000	0.044	0.0314	72864	0.345
100	27.516	10.737	16.779	71.5000	27.9000	43.60000	0.069	0.0493	56609	0.33571429
Promedio	26.223	9.50	16.7254	68.140	24.6800	43.46000	0.0602	0.0430000	58576	0.33757143
Des. Est	0.996920	0.953422	0.046181	2.590444	2.477418	0.120000	0.011179	0.007985	7499.0	0.003714
Secuencia: 9 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 41.4 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	28.786	13.893	14.894	74.8000	36.1000	38.70000	0.108	0.0771	46796	0.345
97	31.403	14.124	17.280	81.6000	36.7000	44.90000	0.094	0.0671	54660	0.33571429
98	30.634	14.047	16.587	79.6000	36.5000	43.10000	0.082	0.0586	62317	0.35428571
99	32.827	15.663	17.164	85.3000	40.7000	44.60000	0.109	0.0779	52275	0.35428571
100	30.326	14.162	16.163	78.8000	36.8000	42.00000	0.094	0.0671	54809	0.36285714
Promedio	30.795	14.38	16.4175	80.020	37.3600	42.66000	0.0974	0.0695714	54171	0.35042857
Des. Est	1.325209	0.649283	0.862122	3.443487	1.687128	2.240179	0.010072	0.007194	4999.7	0.009276
Secuencia: 10 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 55.2 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	33.597	17.741	15.856	87.3000	46.1000	41.20000	0.121	0.0864	53339	0.35428571
97	32.827	18.242	14.586	85.3000	47.4000	37.90000	0.122	0.0871	54393	0.35428571
98	35.791	17.972	17.818	93.0000	46.7000	46.30000	0.122	0.0871	53590	0.345
99	34.598	18.203	16.394	89.9000	47.3000	42.60000	0.121	0.0864	54727	0.36285714
100	33.443	17.703	15.740	86.9000	46.0000	40.90000	0.121	0.0864	53223	0.35428571
Promedio	34.051	17.97	16.0788	88.480	46.7000	41.78000	0.1214	0.0867143	53855	0.35414286
Des. Est	1.039053	0.224401	1.050676	2.699926	0.583095	2.730128	0.000490	0.000350	597.8	0.005650

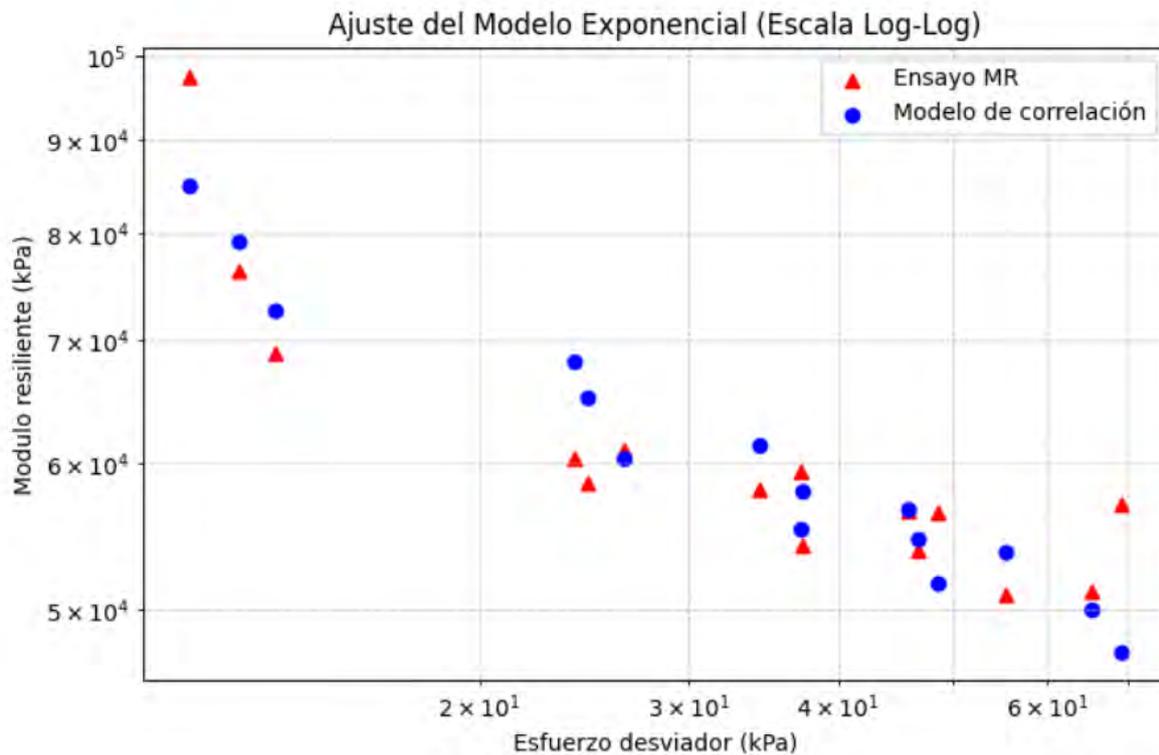
Secuencia: 11 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 68.9 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	40.178	26.246	13.931	104.4000	68.2000	36.20000	0.190	0.1357	50253	0.38142857
97	37.830	25.554	12.277	98.3000	66.4000	31.90000	0.177	0.1264	52520	0.36285714
98	35.752	25.554	10.198	92.9000	66.4000	26.50000	0.189	0.1350	49185	0.36285714
99	39.254	22.398	16.856	102.0000	58.2000	43.80000	0.151	0.1079	53960	0.35428571
100	40.024	25.746	14.278	104.0000	66.9000	37.10000	0.187	0.1336	50086	0.38142857
Promedio	38.608	25.10	13.5081	100.320	65.2200	35.10000	0.1788	0.1277143	51201	0.36857143
Des. Est	1.652129	1.374366	2.211437	4.292971	3.571218	5.746303	0.014648	0.010463	1764.1	0.010954
Secuencia: 12 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 13.8 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	21.975	5.657	16.317	57.1000	14.7000	42.40000	0.036	0.0257	57167	0.37214286
97	21.166	4.888	16.279	55.0000	12.7000	42.30000	0.023	0.0164	77304	0.37214286
98	21.090	4.772	16.317	54.8000	12.4000	42.40000	0.023	0.0164	75478	0.37214286
99	21.128	4.849	16.279	54.9000	12.6000	42.30000	0.023	0.0164	76696	0.37214286
100	22.052	5.734	16.317	57.3000	14.9000	42.40000	0.036	0.0257	57944	0.37214286
Promedio	21.482	5.18	16.3020	55.820	13.4600	42.36000	0.0282	0.0201429	68918	0.37214286
Des. Est	0.434994	0.423400	0.018853	1.130310	1.100182	0.048990	0.006369	0.004549	9299.2	0.000000
Secuencia: 13 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 27.6 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	26.285	9.583	16.702	68.3000	24.9000	43.40000	0.060	0.0429	58100	0.39
97	27.824	10.737	17.087	72.3000	27.9000	44.40000	0.061	0.0436	64033	0.38142857
98	28.094	10.853	17.241	73.0000	28.2000	44.80000	0.061	0.0436	64721	0.39
99	26.016	9.198	16.818	67.6000	23.9000	43.70000	0.060	0.0429	55767	0.39
100	27.747	10.468	17.280	72.1000	27.2000	44.90000	0.061	0.0436	62426	0.38142857
Promedio	27.193	10.17	17.0255	70.660	26.4200	44.24000	0.0606	0.0432857	61009	0.38657143
Des. Est	0.863495	0.658254	0.229104	2.243747	1.710439	0.595315	0.000490	0.000350	3489.3	0.004199
Secuencia: 14 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 41.4 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	25.977	14.855	11.122	67.5000	38.6000	28.90000	0.106	0.0757	50981	0.35428571
97	25.977	12.854	13.123	67.5000	33.4000	34.10000	0.081	0.0579	57728	0.345
98	30.518	13.739	16.779	79.3000	35.7000	43.60000	0.055	0.0393	90873	0.36285714
99	30.518	14.393	16.125	79.3000	37.4000	41.90000	0.106	0.0757	49396	0.38142857
100	29.672	15.740	13.931	77.1000	40.9000	36.20000	0.119	0.0850	48118	0.37214286
Promedio	28.532	14.32	14.2162	74.140	37.2000	36.94000	0.0934	0.0667143	59419	0.36314286
Des. Est	2.109232	0.979353	2.052433	5.480730	2.544799	5.333142	0.022809	0.016292	16072.1	0.012830

Secuencia: 15 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 55.2 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	30.711	18.473	12.238	79.8000	48.0000	31.80000	0.126	0.0900	53333	0.36285714
97	30.172	18.550	11.622	78.4000	48.2000	30.20000	0.113	0.0807	59717	0.36285714
98	30.018	18.934	11.084	78.0000	49.2000	28.80000	0.126	0.0900	54667	0.36285714
99	29.672	18.665	11.007	77.1000	48.5000	28.60000	0.113	0.0807	60088	0.36285714
100	29.441	18.896	10.545	76.5000	49.1000	27.40000	0.126	0.0900	54556	0.36285714
Promedio	30.003	18.70	11.2991	77.960	48.6000	29.36000	0.1208	0.0862857	56472	0.36285714
Des. Est	0.437168	0.183761	0.580899	1.135958	0.477493	1.509437	0.006369	0.004549	2842.2	0.000000
Secuencia: 16 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 68.9 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	45.335	26.400	18.934	117.8000	68.6000	49.20000	0.170	0.1214	56494	0.41785714
97	47.067	26.978	20.089	122.3000	70.1000	52.20000	0.169	0.1207	58071	0.42642857
98	44.103	25.592	18.511	114.6000	66.5000	48.10000	0.170	0.1214	54765	0.43571429
99	46.181	27.593	18.588	120.0000	71.7000	48.30000	0.170	0.1214	59047	0.42642857
100	42.179	26.477	15.702	109.6000	68.8000	40.80000	0.169	0.1207	56994	0.42642857
Promedio	44.973	26.61	18.3648	116.860	69.1400	47.72000	0.1696	0.1211429	57074	0.42657143
Des. Est	1.705103	0.663275	1.446403	4.430621	1.723485	3.758404	0.000490	0.000350	1453.4	0.005650

Anexo A-5.1.1.1 Tabla de secuencia de series del ensayo

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S ₃ kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	11.4200	1.1034	135.62	0.013	0.0042	97449	23200.89
2	41.40	27.60	24.0400	2.0153	148.24	0.040	0.0045	60427	5217.15
3	41.40	41.40	34.3800	0.7658	158.58	0.063	0.0177	58137	14672.51
4	41.40	55.20	45.8600	3.4343	170.06	0.083	0.0146	56611	8335.30
5	41.40	68.90	55.3600	2.0371	179.56	0.109	0.0057	50981	3974.37
6	27.60	13.80	12.5600	1.1754	95.36	0.016	0.0000	76452	6784.70
7	27.60	27.60	24.6800	2.5904	107.48	0.043	0.0080	58576	7498.98
8	27.60	41.40	37.3600	3.4435	120.16	0.070	0.0072	54171	4999.68
9	27.60	55.20	46.7000	2.6999	129.50	0.087	0.0003	53855	597.76
10	27.60	68.90	65.2200	4.2930	148.02	0.128	0.0105	51201	1764.08
11	13.80	13.80	13.4600	1.1303	54.86	0.020	0.0045	68918	9299.17
12	13.80	27.60	26.4200	2.2437	67.82	0.043	0.0003	61009	3489.34
13	13.80	41.40	37.2000	5.4807	78.60	0.067	0.0163	59419	16072.15
14	13.80	55.20	48.6000	1.1360	90.00	0.086	0.0045	56472	2842.22
15	13.80	68.90	69.1400	4.4306	110.54	0.121	0.0003	57074	1453.44

Anexo A-5.1.1.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



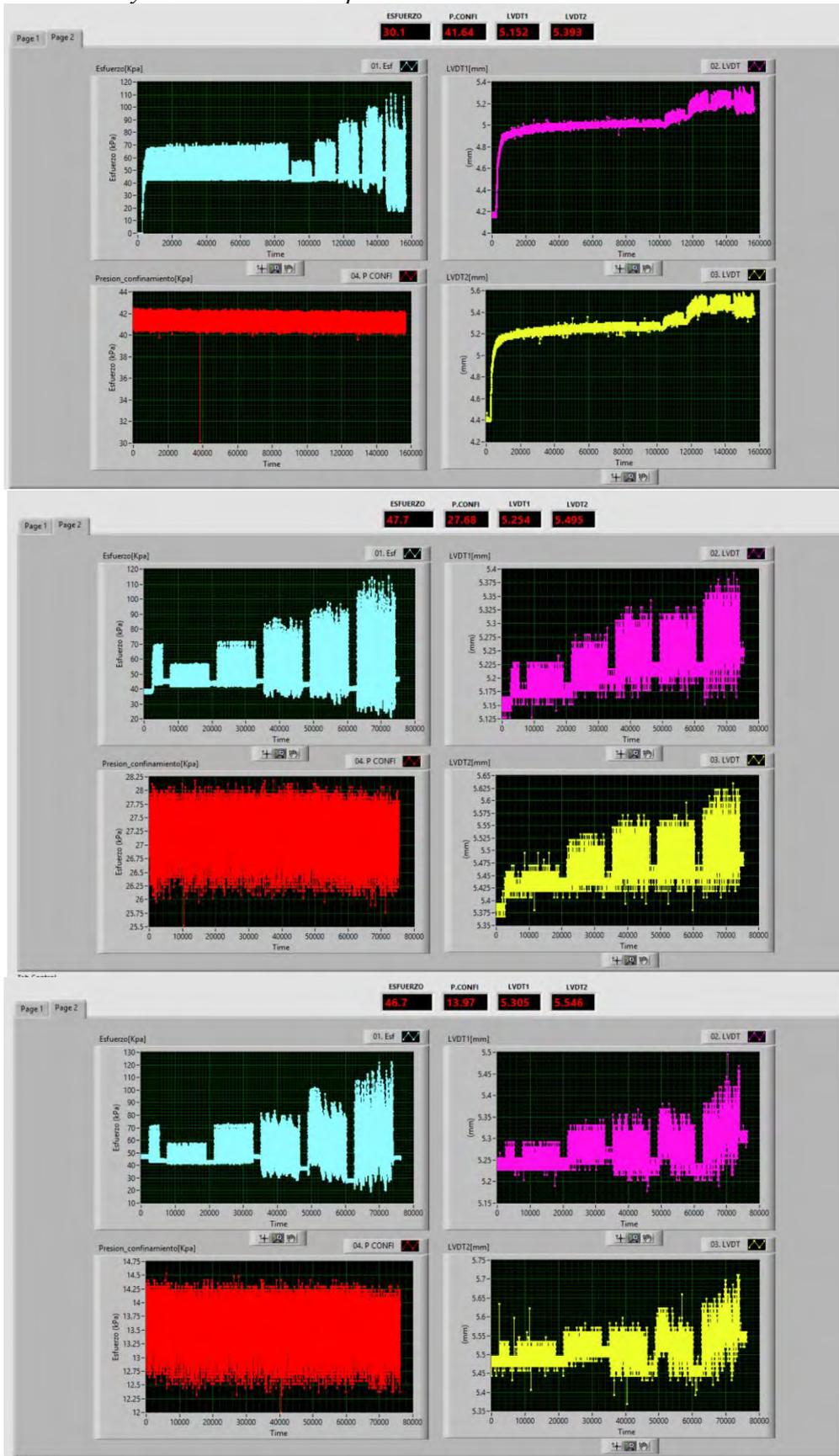
Anexo A-5.1.1.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction
1	100	100	2482	0.35	1
2	250	350	207	0.4	1
3	200	550	125	0.4	1
4	0	∞	36.2	0.45	1

Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:					
	$\sigma_1 : 41$	$\sigma_2 : 0.295$	$\sigma_3 : 0.295$		
	$Mr = 658.4125 \times Pa \times \left[\frac{41.59}{Pa} \right]^{0.116} \times \left[\frac{40.71}{Pa} \right]^{0.3107}$				
	$Mr = 36.18 \text{ Mpa}$				

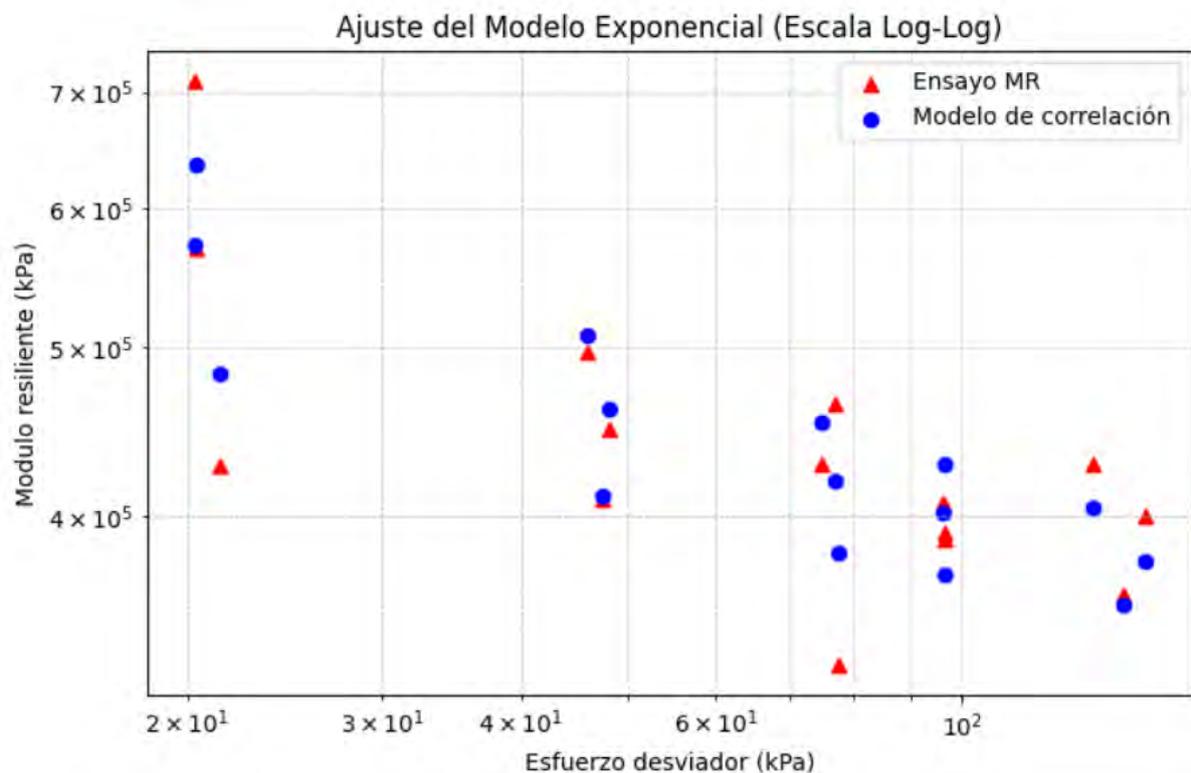
Anexo A-5.1.1.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz “Main_civil 19v” del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



Anexo A-5.1.2.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "CL" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (2.8%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	20.3600	1.1395	144.56	0.004	0.0000	570080	52221.31
2	41.40	27.60	45.8600	0.3816	170.06	0.011	0.0045	496915	177929.53
3	41.40	41.40	74.7000	1.8203	198.90	0.018	0.0017	428025	32135.15
4	41.40	55.20	96.4200	7.4688	220.62	0.025	0.0028	387806	44018.22
5	41.40	68.90	131.5292	13.1152	255.73	0.031	0.0000	428235	45393.00
6	27.60	13.80	20.3200	1.3094	103.12	0.003	0.0000	711200	25566.78
7	27.60	27.60	48.1200	0.7228	130.92	0.011	0.0000	449120	9598.37
8	27.60	41.40	76.8200	1.3667	159.62	0.018	0.0048	463455	141440.24
9	27.60	55.20	96.1800	1.9240	178.98	0.024	0.0045	407476	74100.13
10	27.60	68.90	146.3400	10.3794	229.14	0.037	0.0010	399979	9064.56
11	13.80	13.80	21.3800	0.9389	62.78	0.005	0.0000	427600	26272.42
12	13.80	27.60	47.4600	3.2034	88.86	0.013	0.0045	408692	126183.04
13	13.80	41.40	77.3600	2.8826	118.76	0.024	0.0000	328194	11822.90
14	13.80	55.20	96.5400	2.8294	137.94	0.025	0.0037	391231	64758.12
15	13.80	68.90	139.8800	6.7430	181.28	0.039	0.0042	360847	37120.64

Anexo A-5.1.2.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.1.2.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	+ -
3	200	550	125	0.4	1	+ -
4	0	∞	334.2	0.45	1	+ -

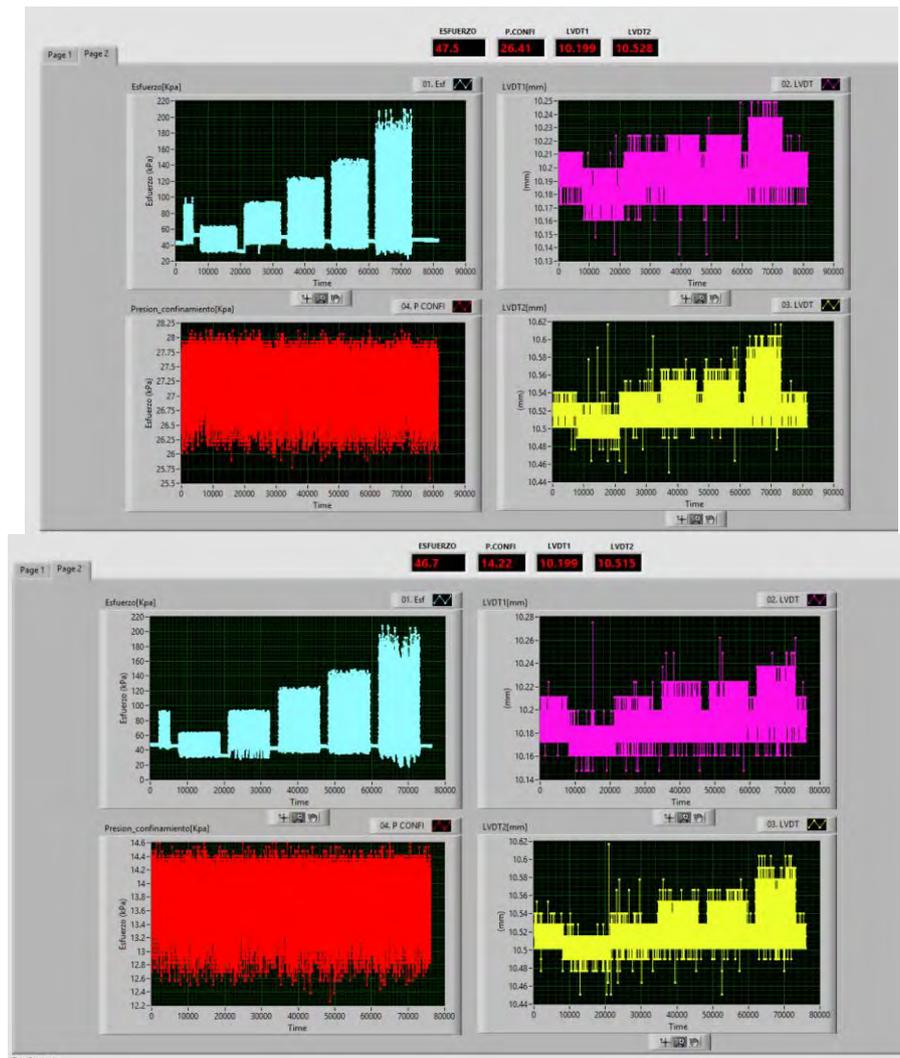
Loads						
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)	
1	0	0	40	750	130.294	+ -

2. Esfuerzos principales en kPa:

	$\sigma_1 : 155$	$\sigma_2 : 3.55$	$\sigma_3 : 3.55$	
	$Mr = 4884.5311 \times Pa \times \left[\frac{162.1}{Pa} \right]^{0.3121} \times \left[\frac{151.45}{Pa} \right]^{-0.3384}$			
	$Mr = 334.20 \text{ Mpa}$			

Anexo A-5.1.2.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz "Main_civil 19v" del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.

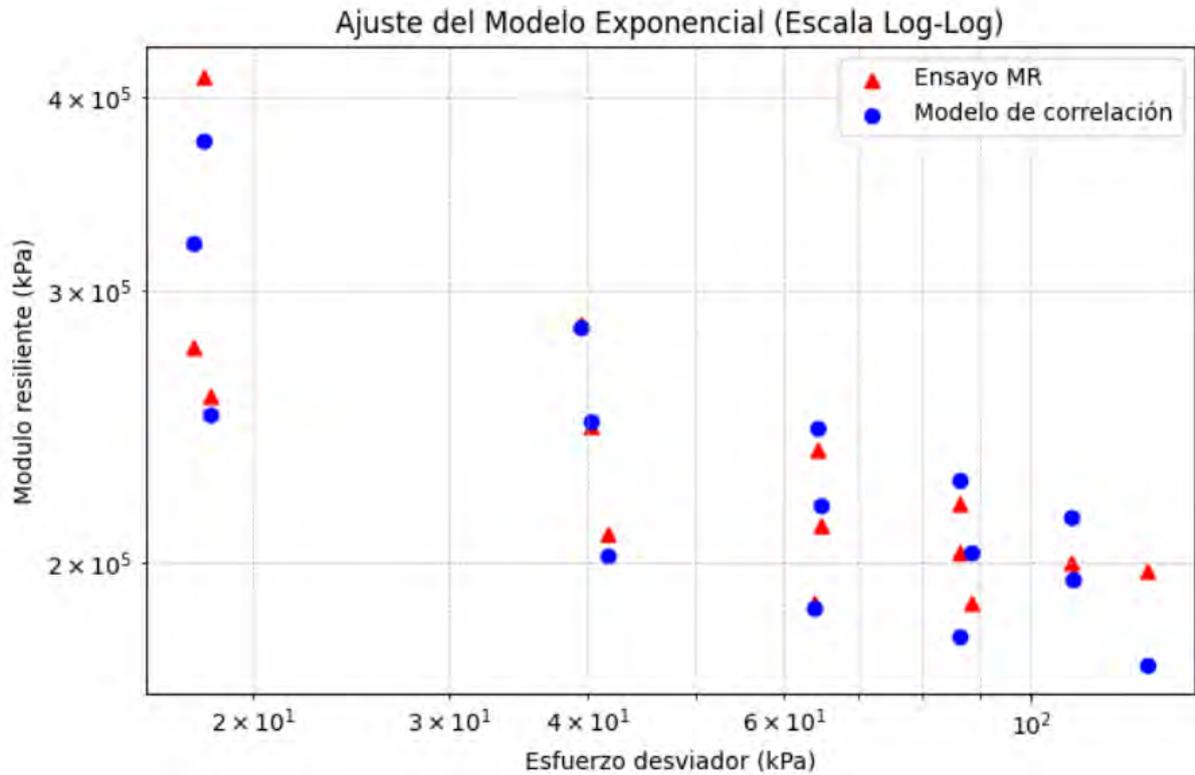




Anexo A-5.1.3.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "CL" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (4.47%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S ₃ kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	18.0800	0.7499	142.28	0.006	0.0029	412449	221824.93
2	41.40	27.60	39.3600	0.1600	163.56	0.015	0.0042	285300	72110.75
3	41.40	41.40	64.2400	1.0276	188.44	0.027	0.0000	236674	4039.88
4	41.40	55.20	86.3800	7.9628	210.58	0.040	0.0045	218297	30044.64
5	41.40	68.90	108.5800	5.4952	232.78	0.054	0.0000	200016	15548.24
6	27.60	13.80	17.7000	0.3007	100.50	0.006	0.0000	275333	19127.64
7	27.60	27.60	40.2000	0.7467	123.00	0.016	0.0000	244696	4522.41
8	27.60	41.40	64.7600	1.5600	147.56	0.031	0.0034	211158	20562.91
9	27.60	55.20	88.4400	6.3923	171.24	0.052	0.0167	188341	58938.80
10	27.60	68.90	109.2600	5.5661	192.06	0.056	0.0069	196161	14430.14
11	13.80	13.80	18.3000	0.9810	59.70	0.007	0.0000	256200	14921.66
12	13.80	27.60	41.7200	0.8976	83.12	0.020	0.0000	208600	8163.33
13	13.80	41.40	63.8600	1.7716	105.26	0.034	0.0042	188541	25248.56
14	13.80	55.20	86.2400	8.0763	127.64	0.043	0.0068	202952	25591.13
15	13.80	68.90	127.1800	15.3701	168.58	0.069	0.0197	197312	44512.51

Anexo A-5.1.3.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



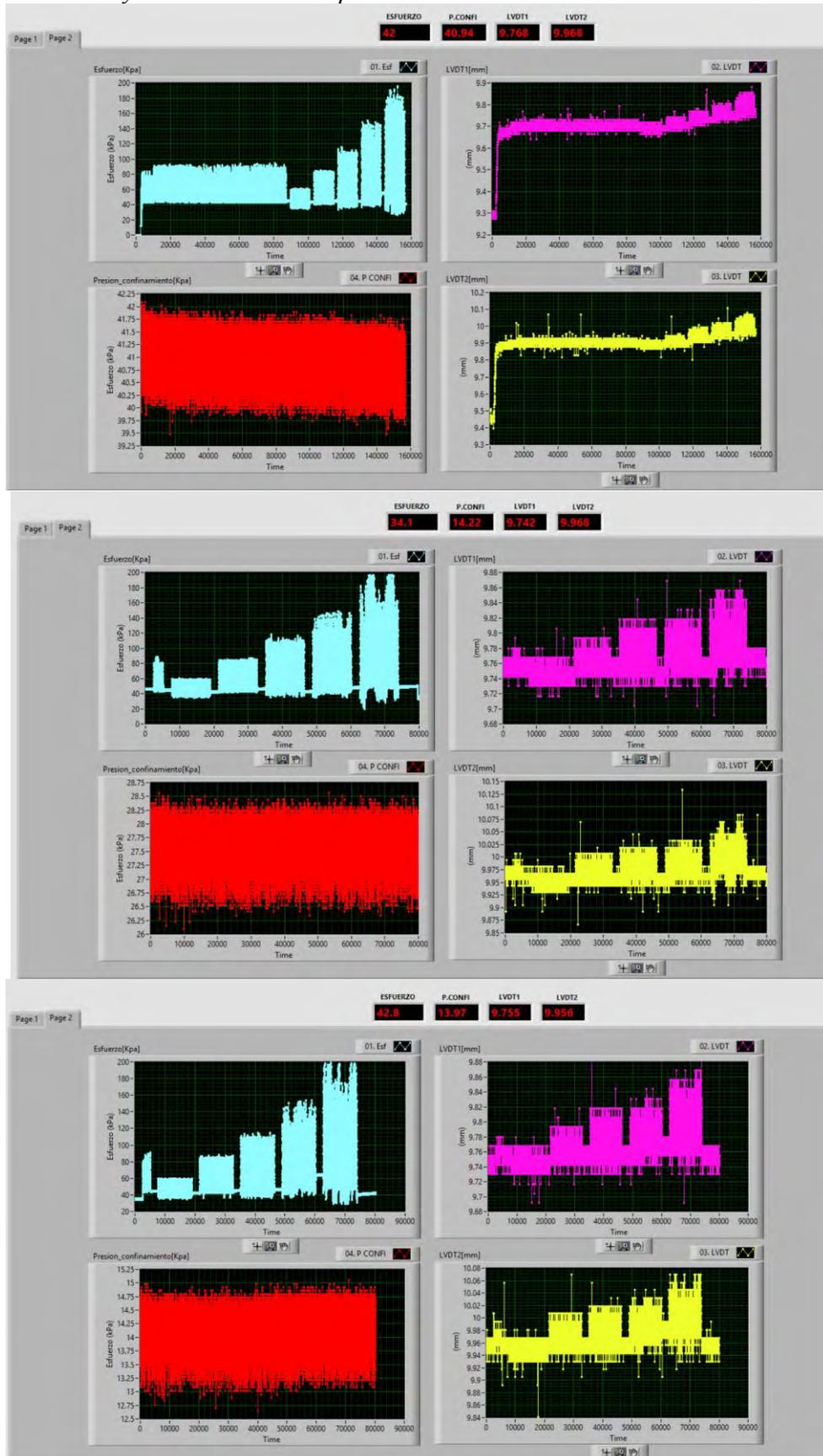
Anexo A-5.1.3.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ / -
2	250	350	207	0.4	1	+ / -
3	200	550	125	0.4	1	+ / -
4	0	∞	151.4	0.45	1	+ / -

Loads						
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)	
1	0	0	40	750	130.294	+ / -

2. Esfuerzos principales en kPa:					
	$\sigma_1 : 47.6$	$\sigma_2 : 0.267$	$\sigma_3 : 0.267$		
	$Mr = 2171.1925 \times Pa \times \left[\frac{100.35}{Pa} \right]^{0.4649} \times \left[\frac{98.18}{Pa} \right]^{-0.4401}$				
	$Mr = 151.38 \text{ Mpa}$				

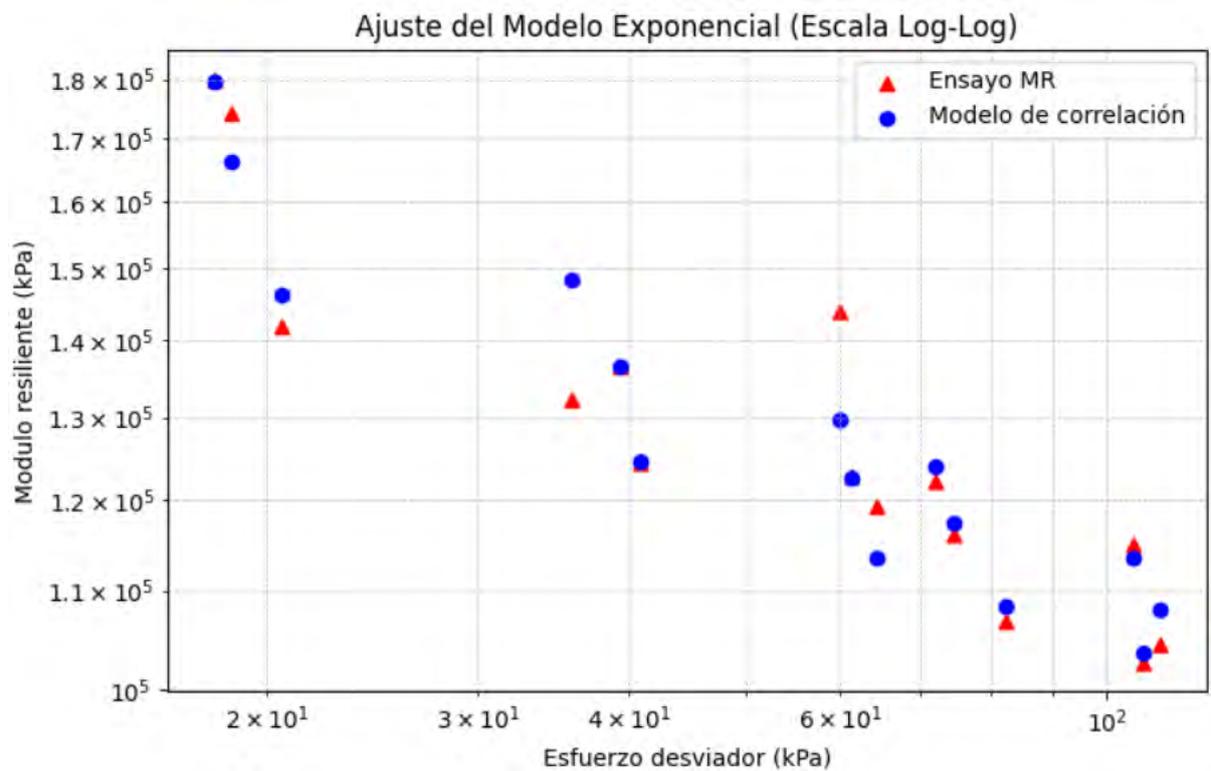
Anexo A-5.1.3.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz “Main_civil 19v” del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



Anexo A-5.1.4.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "CL" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (8.63%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento σ_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	18.1000	1.8659	142.30	0.010	0.0014	180043	18623.72
2	41.40	27.60	35.8600	2.8675	160.06	0.027	0.0000	132116	9785.31
3	41.40	41.40	60.0000	5.4496	184.20	0.042	0.0045	143941	12346.62
4	41.40	55.20	72.1000	4.9281	196.30	0.059	0.0037	122242	8906.60
5	41.40	68.90	105.2800	15.8361	229.48	0.091	0.0092	115045	5299.86
6	27.60	13.80	18.6800	0.3124	101.48	0.011	0.0000	174347	3751.95
7	27.60	27.60	39.3200	2.9709	122.12	0.029	0.0037	136543	8508.59
8	27.60	41.40	61.3600	4.3724	144.16	0.050	0.0043	122747	13110.14
9	27.60	55.20	74.5000	2.4943	157.30	0.065	0.0072	116108	6647.97
10	27.60	68.90	110.6400	7.5669	193.44	0.106	0.0057	104459	5122.50
11	13.80	13.80	20.5400	0.3441	61.94	0.015	0.0017	141884	20733.35
12	13.80	27.60	40.8800	0.7071	82.28	0.033	0.0000	124417	3582.52
13	13.80	41.40	64.4000	3.6696	105.80	0.054	0.0045	119241	11541.00
14	13.80	55.20	82.4000	7.8209	123.80	0.077	0.0071	106767	4440.72
15	13.80	68.90	107.0600	13.0897	148.46	0.104	0.0037	102698	9064.55

Anexo A-5.1.4.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.1.4.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

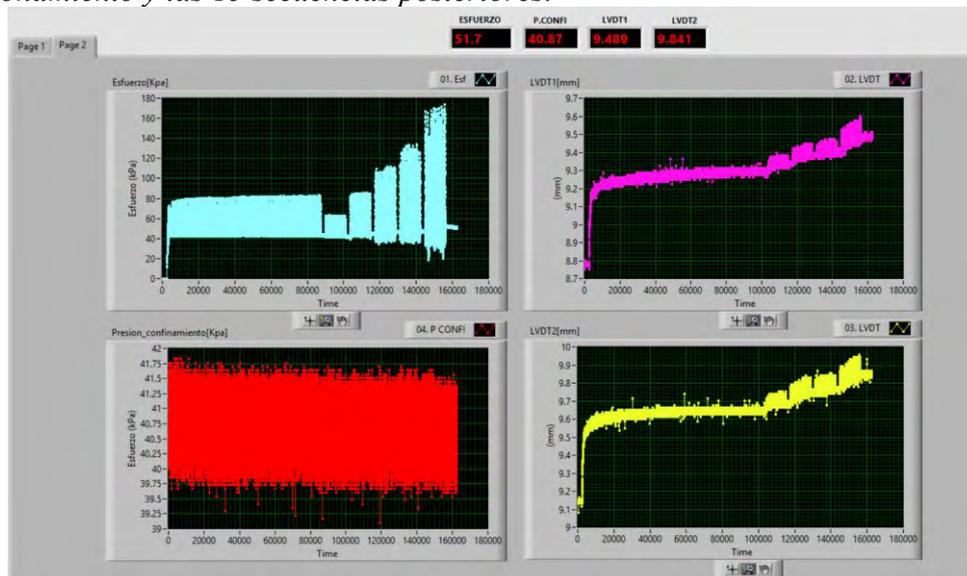
Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	+ -
3	200	550	125	0.4	1	+ -
4	0	∞	100.8	0.45	1	+ -

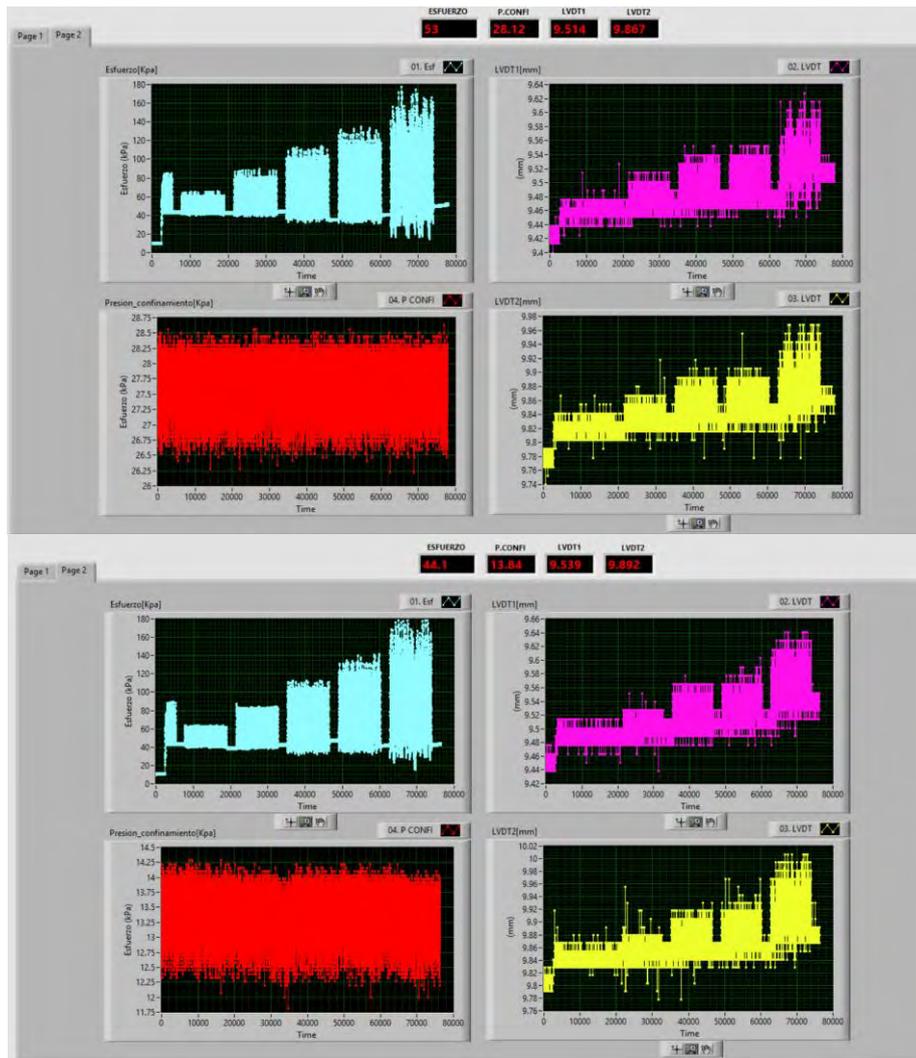
Loads					
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:

	$\sigma_1 : 77.5$	$\sigma_2 : 0.14$	$\sigma_3 : 0.14$	
	$Mr = 1493.8732 \times Pa \times \left[\frac{77.78}{Pa} \right]^{0.1991} \times \left[\frac{77.36}{Pa} \right]^{-0.3146}$			
	$Mr = 100.84 \text{ Mpa}$			

Anexo A-5.1.4.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz "Main_civil 19v" del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.

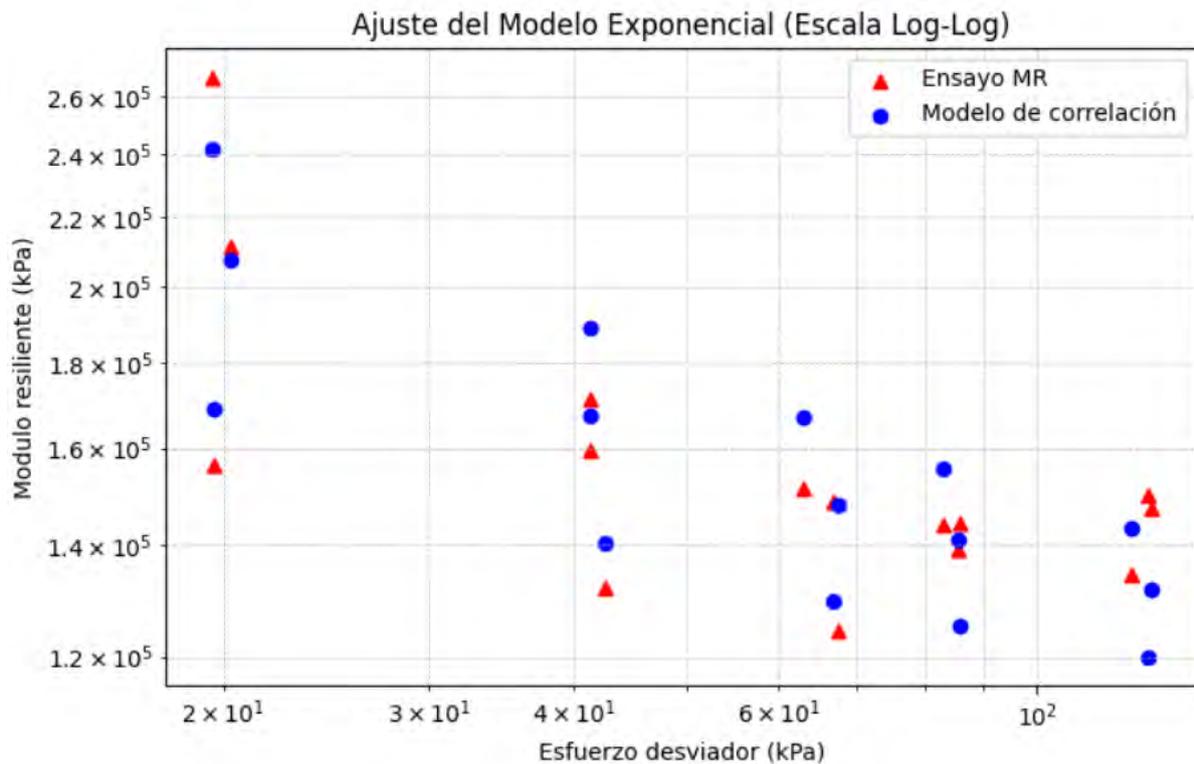




Anexo A-5.1.5.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "CL" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (9.38%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento o S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	19.5600	0.6957	143.76	0.008	0.0037	266947	69563.59
2	41.40	27.60	41.2400	0.6651	165.44	0.025	0.0034	171227	31578.39
3	41.40	41.40	62.9800	2.6181	187.18	0.042	0.0034	151165	9477.15
4	41.40	55.20	83.0200	4.2202	207.22	0.058	0.0042	144059	4442.37
5	41.40	68.90	120.4000	8.3532	244.60	0.090	0.0088	134473	13673.13
6	27.60	13.80	20.2800	0.1720	103.08	0.010	0.0037	211363	47518.73
7	27.60	27.60	41.2800	1.6206	124.08	0.027	0.0056	159326	31024.10
8	27.60	41.40	67.5800	2.3096	150.38	0.055	0.0037	124216	6435.66
9	27.60	55.20	85.6800	2.9736	168.48	0.062	0.0037	139158	6815.30
10	27.60	68.90	125.3200	6.9887	208.12	0.085	0.0045	147284	5896.34
11	13.80	13.80	19.6000	1.4207	61.00	0.013	0.0035	156302	35137.17
12	13.80	27.60	42.5200	2.4301	83.92	0.033	0.0044	131944	20325.85
13	13.80	41.40	66.7200	2.8955	108.12	0.046	0.0066	148617	15312.00
14	13.80	55.20	85.9600	3.5455	127.36	0.060	0.0045	144140	8880.15
15	13.80	68.90	124.7200	4.2212	166.12	0.083	0.0037	149982	7818.32

Anexo A-5.1.5.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.1.5.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

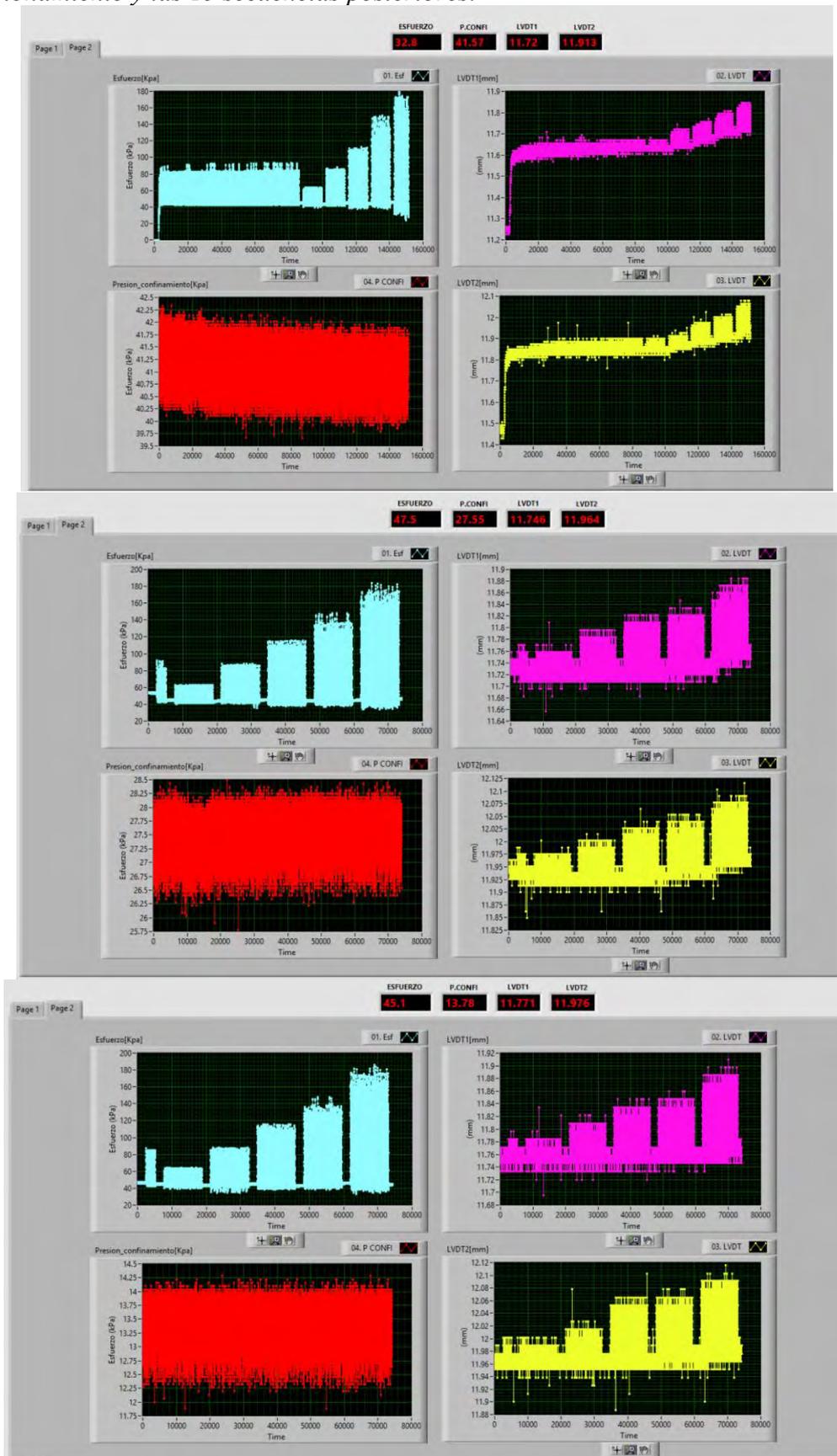
Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ / -
2	250	350	207	0.4	1	+ / -
3	200	550	125	0.4	1	+ / -
4	0	∞	106.5	0.45	1	+ / -

Loads						
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)	
1	0	0	40	750	130.294	+ / -

2. Esfuerzos principales en kPa:

σ_1 : 80.20	σ_2 : 0.198	σ_3 : 0.198
$Mr = 1549.959 \times Pa \times \left[\frac{80.60}{Pa} \right]^{0.4178} \times \left[\frac{80.0}{Pa} \right]^{-0.4108}$		
$Mr = 106.46 \text{ Mpa}$		

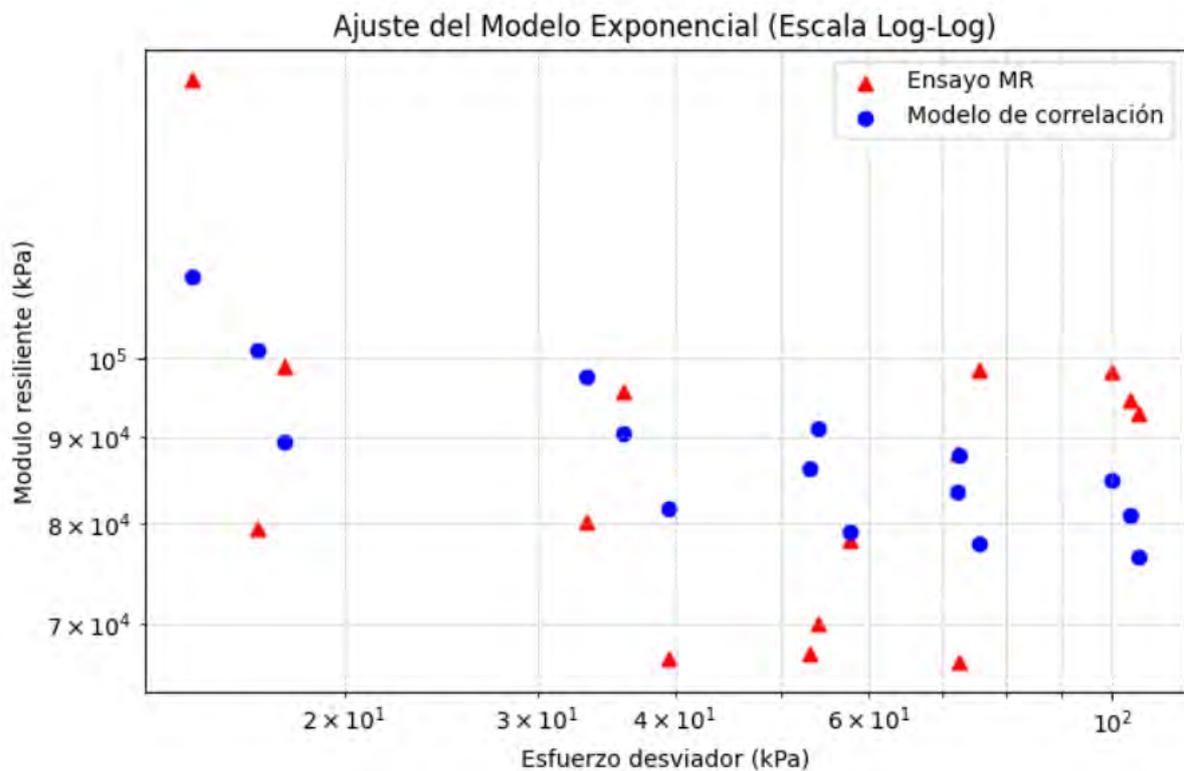
Anexo A-5.1.5.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz "Main_civil 19v" del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



Anexo A-5.1.6.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "CL" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (11.27%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	14.5600	0.7172	138.76	0.010	0.0000	145600	6711.18
2	41.40	27.60	33.2200	3.0559	157.42	0.041	0.0000	80186	4327.09
3	41.40	41.40	54.0200	5.0339	178.22	0.077	0.0000	70026	4619.18
4	41.40	55.20	72.5200	5.4815	196.72	0.109	0.0000	66358	4283.06
5	41.40	68.90	99.6800	11.7974	223.88	0.101	0.0000	98276	6486.22
6	27.60	13.80	16.6600	1.4218	99.46	0.022	0.0045	79502	11293.89
7	27.60	27.60	35.8600	3.5389	118.66	0.038	0.0042	95632	7524.47
8	27.60	41.40	53.1000	1.0685	135.90	0.079	0.0037	67226	3251.88
9	27.60	55.20	72.2000	7.0128	155.00	0.082	0.0041	87947	8679.27
10	27.60	68.90	103.8600	6.6749	186.66	0.110	0.0042	94448	5376.16
11	13.80	13.80	17.6600	1.8341	59.06	0.018	0.0000	98896	7584.64
12	13.80	27.60	39.5000	2.4508	80.90	0.059	0.0045	66708	4062.39
13	13.80	41.40	57.6400	4.8752	99.04	0.074	0.0000	78346	3909.84
14	13.80	55.20	75.6800	7.2626	117.08	0.077	0.0096	98396	5879.76
15	13.80	68.90	105.5400	9.5826	146.94	0.114	0.0042	92883	4995.34

Anexo A-5.1.6.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.1.6.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction
1	100	100	2482	0.35	1
2	250	350	207	0.4	1
3	200	550	125	0.4	1
4	0	∞	70.7	0.45	1

Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:

$$\sigma_1 : 62.4$$

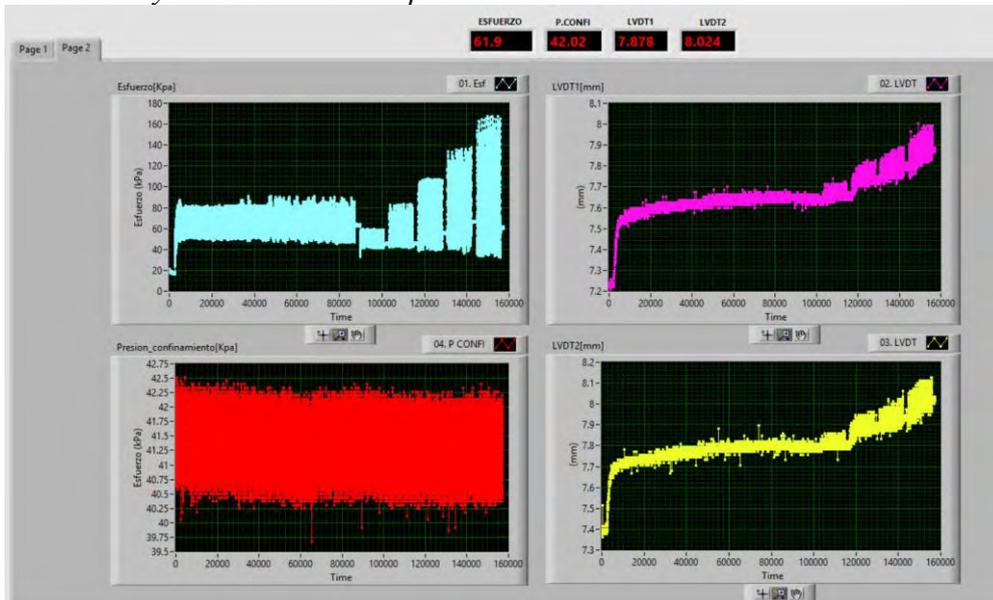
$$\sigma_2 : 0.124$$

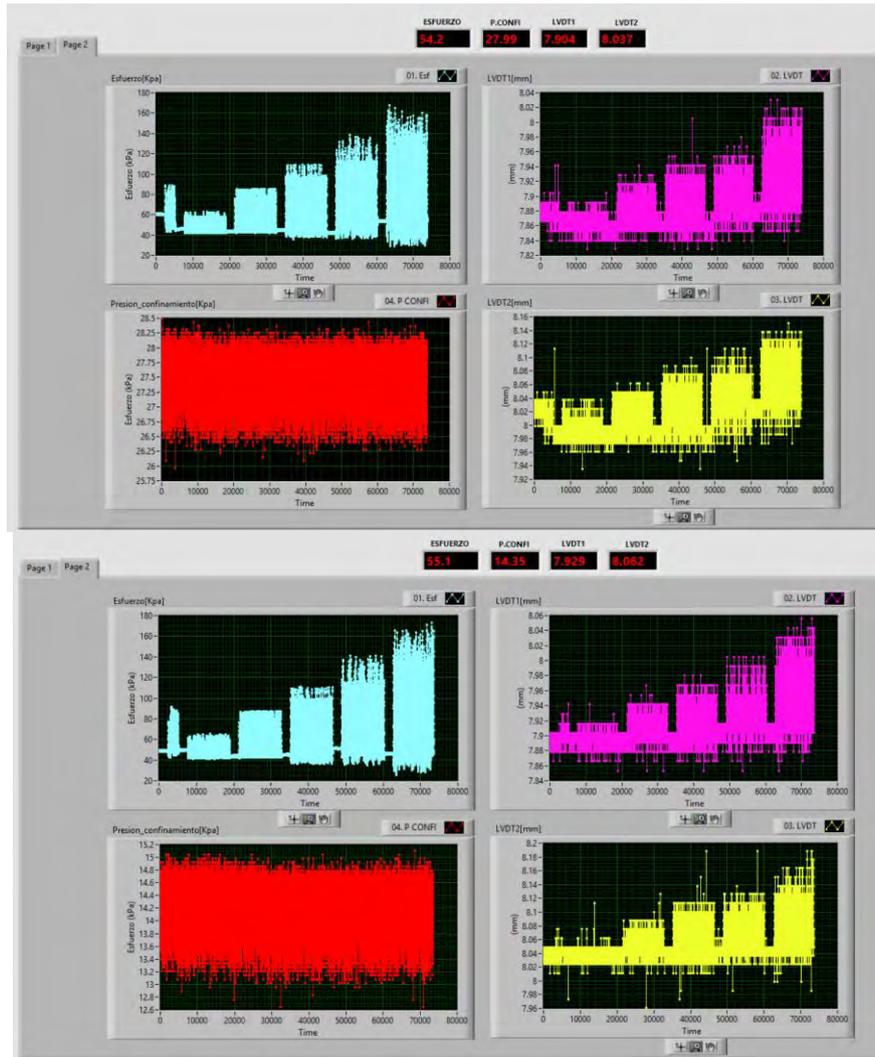
$$\sigma_3 : 0.124$$

$$Mr = 1034.0827 \times Pa \times \left[\frac{62.65}{Pa} \right]^{0.2154} \times \left[\frac{62.28}{Pa} \right]^{-0.1957}$$

$$Mr = 70.69 \text{ Mpa}$$

Anexo A-5.1.6.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz "Main_civil 19v" del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



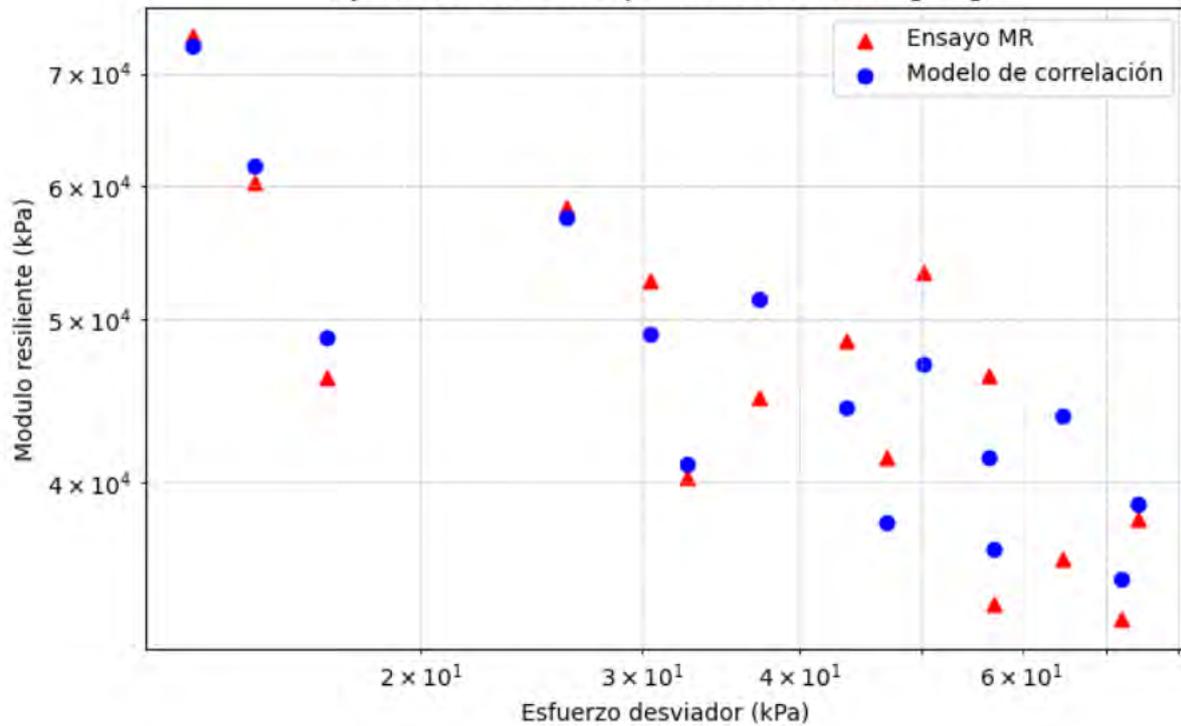


Anexo A-5.1.7.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "CL" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (14.5%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S ₃ kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	13.1800	1.3242	137.38	0.018	0.0042	73612	9210.81
2	41.40	27.60	26.0600	2.6008	150.26	0.046	0.0087	58280	6946.09
3	41.40	41.40	37.1000	2.2879	161.30	0.083	0.0073	44912	3320.65
4	41.40	55.20	50.0800	3.8881	174.28	0.094	0.0037	53265	2575.07
5	41.40	68.90	64.6200	4.3393	188.82	0.180	0.0092	36010	2156.34
6	27.60	13.80	14.7400	0.5060	97.54	0.025	0.0042	60230	9661.86
7	27.60	27.60	30.4600	0.3382	113.26	0.058	0.0000	52647	531.04
8	27.60	41.40	43.5200	2.0798	126.32	0.090	0.0044	48508	3308.75
9	27.60	55.20	56.5200	3.7807	139.32	0.122	0.0044	46290	1573.05
10	27.60	68.90	74.1800	4.9532	156.98	0.196	0.0105	38052	3126.61
11	13.80	13.80	16.8200	0.7392	58.22	0.036	0.0000	46173	2027.66
12	13.80	27.60	32.5200	0.5367	73.92	0.081	0.0045	40300	1634.45
13	13.80	41.40	46.8400	2.5081	88.24	0.113	0.0057	41419	1130.68
14	13.80	55.20	57.1000	4.8274	98.50	0.169	0.0069	33873	1523.82
15	13.80	68.90	72.0200	5.3190	113.42	0.217	0.0066	33126	917.30

Anexo A-5.1.7.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo

Ajuste del Modelo Exponencial (Escala Log-Log)



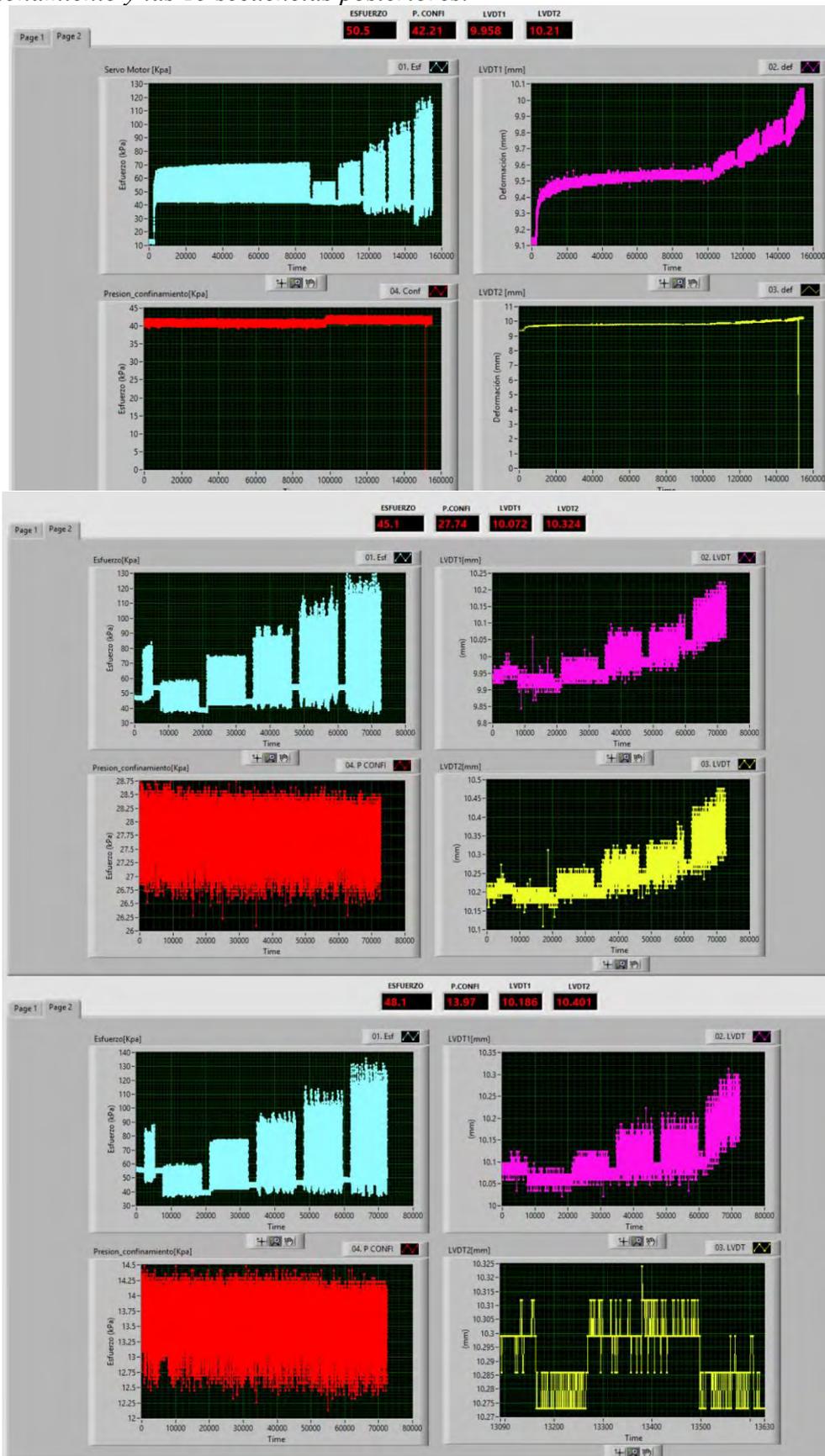
Anexo A-5.1.7.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction
1	100	100	2482	0.35	1
2	250	350	207	0.4	1
3	300	650	125	0.4	1
4	0	∞	65.99	0.45	1

Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:					
	$\sigma_1 : 37$	$\sigma_2 : 0.301$	$\sigma_3 : 0.301$		
	$Mr = 436.6177 \times Pa \times \left[\frac{37.6}{Pa} \right]^{0.355} \times \left[\frac{36.7}{Pa} \right]^{-0.3898}$				
	$Mr = 65.99 \text{ Mpa}$				

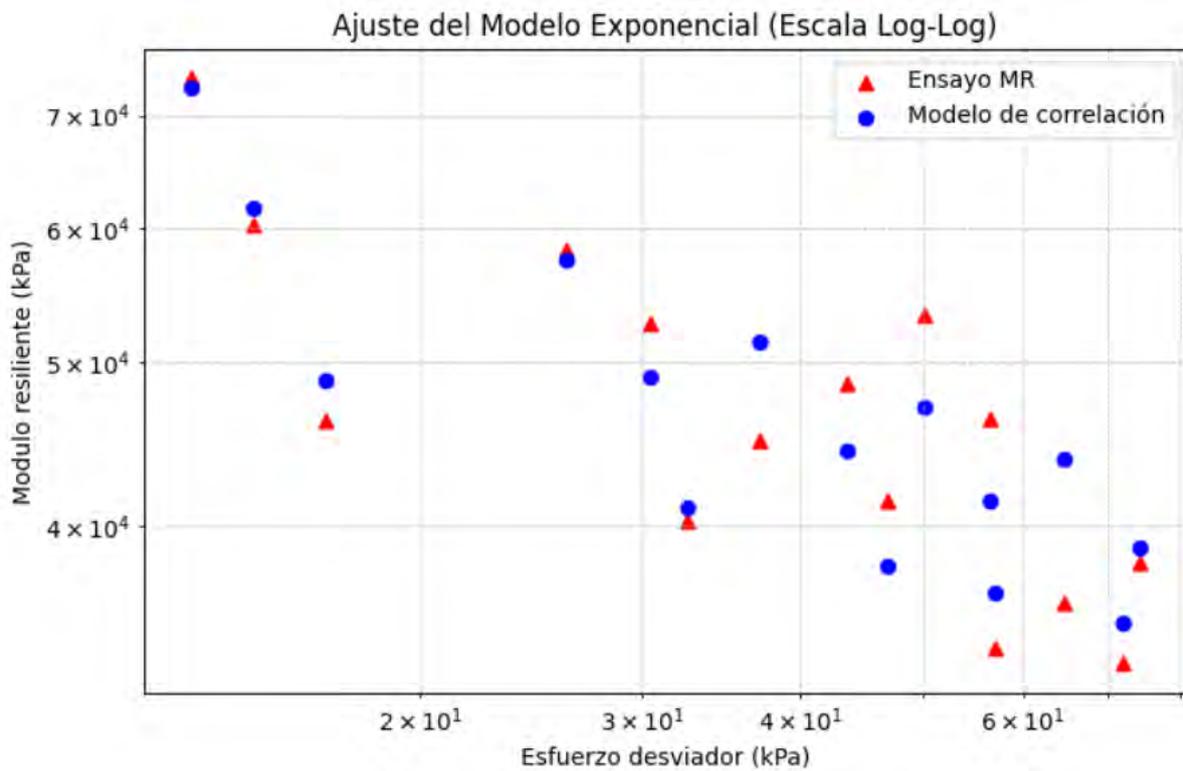
Anexo A-5.1.7.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz “Main_civil 19v” del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



Anexo A-5.1.8.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "CL" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (18.5%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	17.6800	1.0929	141.88	0.038	0.0044	47124	4139.73
2	41.40	27.60	30.2200	0.3868	154.42	0.068	0.0045	44330	2586.82
3	41.40	41.40	41.6600	1.9380	165.86	0.103	0.0094	40934	4434.04
4	41.40	55.20	83.3400	3.6658	207.54	0.236	0.0045	35329	1537.75
5	41.40	68.90	106.3800	19.3973	230.58	0.331	0.0080	32241	6015.50
6	27.60	13.80	20.5000	0.4030	103.30	0.047	0.0000	43485	848.48
7	27.60	27.60	41.6400	0.7761	124.44	0.104	0.0006	40040	817.71
8	27.60	41.40	70.6600	5.0436	153.46	0.190	0.0066	37326	2459.37
9	27.60	55.20	106.7800	13.1554	189.58	0.295	0.0042	36121	4137.98
10	27.60	68.90	106.0200	9.4564	188.82	0.337	0.0136	31642	3685.44
11	13.80	13.80	19.7400	1.9354	61.14	0.054	0.0003	36545	2766.42
12	13.80	27.60	43.4200	0.2800	84.82	0.127	0.0029	34170	868.20
13	13.80	41.40	72.6000	2.5617	114.00	0.257	0.0034	28199	1099.16
14	13.80	55.20	101.7200	9.4150	143.12	0.304	0.0066	33421	1722.28
15	13.80	68.90	135.4400	6.9006	176.84	0.511	0.0036	26487	1295.67

Anexo A-5.1.8.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.1.8.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	+ -
3	200	550	125	0.4	1	+ -
4	0	∞	28.1	0.45	1	+ -

Loads					
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:

$$\sigma_1 : 34.9$$

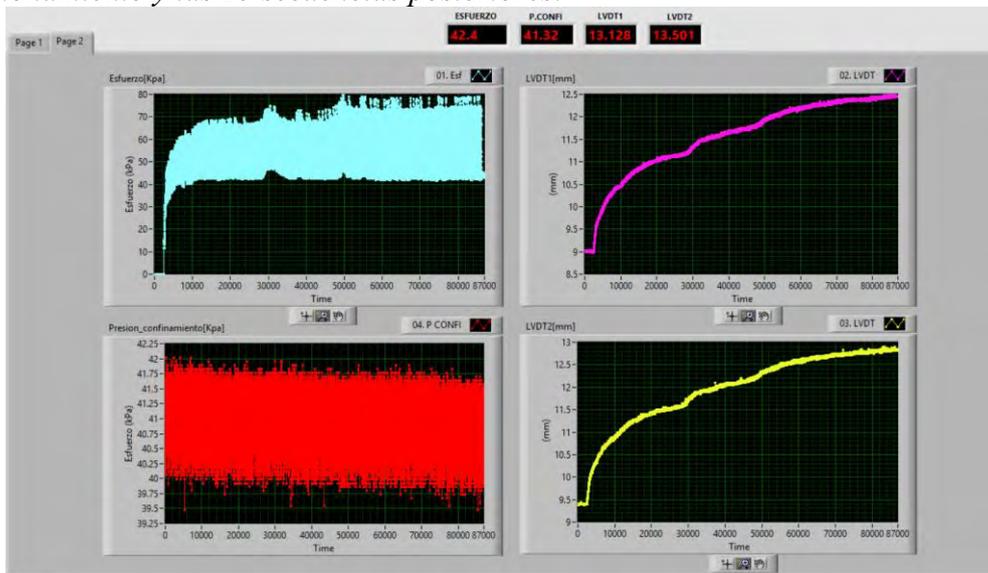
$$\sigma_2 : 0.302$$

$$\sigma_3 : 0.302$$

$$Mr = 409.1785 \times Pa \times \left[\frac{35.5}{Pa} \right]^{0.2698} \times \left[\frac{34.6}{Pa} \right]^{-0.266}$$

$$Mr = 28.11 \text{ Mpa}$$

Anexo A-5.1.7.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz "Main_civil 19v" del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.





Anexo A-5.2.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "SC-SM" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (9.46%)

Secuencia: 1 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 27.6 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
746	43.747	19.478	24.269	55.7000	24.8000	30.90000	0.025	0.0125	198400	0.0955
747	40.684	16.101	24.583	51.8000	20.5000	31.30000	0.025	0.0125	164000	0.0955
748	44.689	17.436	27.253	56.9000	22.2000	34.70000	0.025	0.0125	177600	0.0955
749	40.605	16.336	24.269	51.7000	20.8000	30.90000	0.025	0.0125	166400	0.0955
750	44.139	19.949	24.190	56.2000	25.4000	30.80000	0.025	0.0125	203200	0.0955
Promedio	42.773	17.86	24.9128	54.460	22.7400	31.72000	0.025	0.0125000	181920	0.0955
Des. Est	1.763634	1.586115	1.177993	2.245529	2.019505	1.499867	0.000000	0.000000	16156.0	0.000000
Secuencia: 2 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 13.8 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	36.600	8.796	27.803	46.6000	11.2000	35.40000	0.025	0.0125	89600	0.0955
97	35.893	8.011	27.882	45.7000	10.2000	35.50000	0.025	0.0125	81600	0.0955
98	36.207	7.775	28.431	46.1000	9.9000	36.20000	0.025	0.0125	79200	0.0955
99	36.207	8.011	28.196	46.1000	10.2000	35.90000	0.025	0.0125	81600	0.0955
100	36.364	8.639	27.725	46.3000	11.0000	35.30000	0.025	0.0125	88000	0.0955
Promedio	36.254	8.25	28.0073	46.160	10.5000	35.66000	0.025	0.0125000	84000	0.0955
Des. Est	0.230859	0.397384	0.265646	0.293939	0.505964	0.338231	0.000000	0.000000	4047.7	0.000000
Secuencia: 3 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 27.6 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	57.962	26.232	31.730	73.8000	33.4000	40.40000	0.053	0.0265	126038	0.2415
97	61.654	30.395	31.259	78.5000	38.7000	39.80000	0.041	0.0205	188780	0.2415
98	57.570	25.683	31.887	73.3000	32.7000	40.60000	0.041	0.0205	159512	0.2415
99	61.811	30.473	31.337	78.7000	38.8000	39.90000	0.041	0.0205	189268	0.2415
100	56.549	24.662	31.887	72.0000	31.4000	40.60000	0.041	0.0205	153171	0.2415
Promedio	59.109	27.49	31.6201	75.260	35.0000	40.26000	0.0434	0.0217000	163354	0.2415
Des. Est	2.191585	2.457179	0.270250	2.790412	3.128578	0.344093	0.004800	0.002400	23786.6	0.000000
Secuencia: 4 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 41.4 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	78.304	43.275	35.029	99.7000	55.1000	44.60000	0.067	0.0335	164478	0.318
97	79.639	44.375	35.264	101.4000	56.5000	44.90000	0.067	0.0335	168657	0.318
98	77.205	42.804	34.400	98.3000	54.5000	43.80000	0.067	0.0335	162687	0.318
99	73.435	39.898	33.537	93.5000	50.8000	42.70000	0.067	0.0335	151642	0.318
100	71.550	39.113	32.437	91.1000	49.8000	41.30000	0.080	0.0400	124500	0.3115
Promedio	76.027	41.89	34.1334	96.800	53.3400	43.46000	0.0696	0.0348000	154393	0.3167
Des. Est	3.045887	2.030281	1.037915	3.878144	2.585034	1.321514	0.005200	0.002600	15969.3	0.002600

Secuencia: 5 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 55.2 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	99.981	64.952	35.029	127.3000	82.7000	44.60000	0.066	0.0330	250606	0.375
97	103.830	67.230	36.600	132.2000	85.6000	46.60000	0.078	0.0390	219487	0.375
98	92.598	56.549	36.050	117.9000	72.0000	45.90000	0.053	0.0265	271698	0.375
99	99.667	63.931	35.736	126.9000	81.4000	45.50000	0.066	0.0330	246667	0.375
100	103.515	66.916	36.600	131.8000	85.2000	46.60000	0.066	0.0330	258182	0.375
Promedio	99.918	63.92	36.0027	127.220	81.3800	45.84000	0.0658	0.0329000	249328	0.375
Des. Est	4.046866	3.881615	0.588996	5.152630	4.942226	0.749933	0.007909	0.003955	17193.0	0.000000
Secuencia: 6 de 16										
Presión de Confinamiento: 41.1 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 68.9 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	103.044	67.309	35.736	131.2000	85.7000	45.50000	0.054	0.0270	317407	0.426
97	119.616	83.645	35.971	152.3000	106.5000	45.80000	0.067	0.0335	317910	0.426
98	127.784	89.692	38.092	162.7000	114.2000	48.50000	0.067	0.0335	340896	0.426
99	130.612	91.420	39.191	166.3000	116.4000	49.90000	0.079	0.0395	294684	0.4325
100	114.197	75.948	38.249	145.4000	96.7000	48.70000	0.054	0.0270	358148	0.4325
Promedio	119.051	81.60	37.4478	151.580	103.9000	47.68000	0.0642	0.0321000	325809	0.4286
Des. Est	9.899681	8.969921	1.357081	12.604666	11.420858	1.727889	0.009411	0.004705	21795.4	0.003184
Secuencia: 7 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 13.8 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	45.396	12.095	33.301	57.8000	15.4000	42.40000	0.025	0.0125	123200	0.07
97	41.940	8.639	33.301	53.4000	11.0000	42.40000	0.025	0.0125	88000	0.07
98	41.076	7.854	33.222	52.3000	10.0000	42.30000	0.038	0.0190	52632	0.07
99	45.003	11.781	33.222	57.3000	15.0000	42.30000	0.025	0.0125	120000	0.07
100	41.783	8.561	33.222	53.2000	10.9000	42.30000	0.025	0.0125	87200	0.07
Promedio	43.040	9.79	33.2538	54.800	12.4600	42.34000	0.0276	0.0138000	94206	0.07
Des. Est	1.791672	1.781036	0.038476	2.281228	2.267686	0.048990	0.005200	0.002600	25776.0	0.000000
Secuencia: 8 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 27.6 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	67.309	33.144	34.165	85.7000	42.2000	43.50000	0.037	0.0185	228108	0.0765
97	60.554	26.075	34.479	77.1000	33.2000	43.90000	0.037	0.0185	179459	0.0765
98	67.152	32.908	34.243	85.5000	41.9000	43.60000	0.037	0.0185	226486	0.0765
99	59.298	25.054	34.243	75.5000	31.9000	43.60000	0.050	0.0250	127600	0.0765
100	66.288	31.966	34.322	84.4000	40.7000	43.70000	0.050	0.0250	162800	0.0765
Promedio	64.120	29.83	34.2905	81.640	37.9800	43.66000	0.0422	0.0211000	184891	0.0765
Des. Est	3.464879	3.519215	0.106537	4.411621	4.480803	0.135647	0.006369	0.003184	38464.7	0.000000

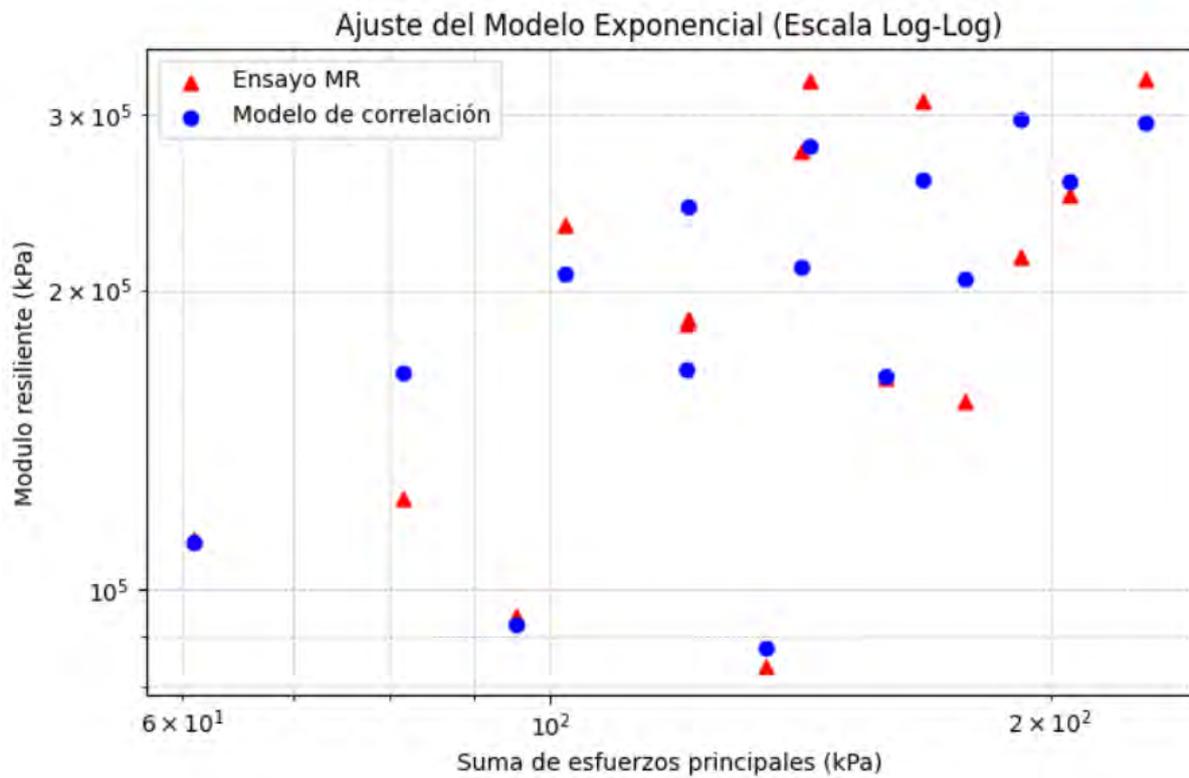
Secuencia: 9 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 41.4 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	86.080	51.601	34.479	109.6000	65.7000	43.90000	0.043	0.0215	305581	0.0825
97	88.122	52.936	35.186	112.2000	67.4000	44.80000	0.043	0.0215	313488	0.0825
98	80.111	47.045	33.065	102.0000	59.9000	42.10000	0.043	0.0215	278605	0.0825
99	72.806	39.506	33.301	92.7000	50.3000	42.40000	0.042	0.0210	239524	0.0825
100	71.942	39.741	32.201	91.6000	50.6000	41.00000	0.042	0.0210	240952	0.0765
Promedio	79.812	46.17	33.6465	101.620	58.7800	42.84000	0.0426	0.0213000	275630	0.0813
Des. Est	6.624665	5.688235	1.059094	8.434785	7.242486	1.348481	0.000490	0.000245	31130.0	0.002400
Secuencia: 10 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 55.2 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	106.029	68.565	37.463	135.0000	87.3000	47.70000	0.063	0.0315	277143	0.0825
97	106.736	69.508	37.228	135.9000	88.5000	47.40000	0.051	0.0255	347059	0.0825
98	94.326	57.491	36.835	120.1000	73.2000	46.90000	0.051	0.0255	287059	0.0825
99	102.259	67.073	35.186	130.2000	85.4000	44.80000	0.051	0.0255	334902	0.0825
100	106.736	70.136	36.600	135.9000	89.3000	46.60000	0.060	0.0300	297667	0.0825
Promedio	103.217	66.55	36.6624	131.420	84.7400	46.68000	0.0552	0.0276000	308766	0.0825
Des. Est	4.746145	4.647699	0.796937	6.042979	5.917635	1.014692	0.005231	0.002615	27363.7	0.000000
Secuencia: 11 de 16										
Presión de Confinamiento: 27.6 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 68.9 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	131.947	92.127	39.820	168.0000	117.3000	50.70000	0.063	0.0315	372381	0.1335
97	130.769	90.871	39.898	166.5000	115.7000	50.80000	0.063	0.0315	367302	0.1335
98	132.104	91.970	40.134	168.2000	117.1000	51.10000	0.063	0.0315	371746	0.1335
99	118.517	78.933	39.584	150.9000	100.5000	50.40000	-0.049	-0.0245	-410204	0.1335
100	113.019	75.241	37.778	143.9000	95.8000	48.10000	0.051	0.0255	375686	0.1335
Promedio	125.271	85.83	39.4427	159.500	109.2800	50.22000	0.0382	0.0191000	215382	0.1335
Des. Est	7.965192	7.245169	0.850844	10.141598	9.224836	1.083328	0.043847	0.021924	312804.5	0.000000
Secuencia: 12 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 13.8 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	47.595	14.294	33.301	60.6000	18.2000	42.40000	0.043	0.0215	84651	-0.0315
97	47.517	16.179	31.337	60.5000	20.6000	39.90000	0.043	0.0215	95814	-0.0315
98	47.360	16.179	31.180	60.3000	20.6000	39.70000	0.031	0.0155	132903	-0.0315
99	46.810	14.373	32.437	59.6000	18.3000	41.30000	0.031	0.0155	118065	-0.0315
100	48.381	15.944	32.437	61.6000	20.3000	41.30000	0.031	0.0155	130968	-0.0315
Promedio	47.532	15.39	32.1385	60.520	19.6000	40.92000	0.0358	0.0179000	112480	-0.0315
Des. Est	0.505103	0.870340	0.786026	0.643117	1.108152	1.000800	0.005879	0.002939	19195.3	0.000000

Secuencia: 13 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 27.6 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	66.131	35.186	30.945	84.2000	44.8000	39.40000	0.068	0.0340	131765	0.0195
97	65.424	31.494	33.929	83.3000	40.1000	43.20000	0.068	0.0340	117941	0.0195
98	65.188	31.102	34.086	83.0000	39.6000	43.40000	0.068	0.0340	116471	0.0195
99	63.146	29.688	33.458	80.4000	37.8000	42.60000	0.068	0.0340	111176	0.0195
100	61.104	30.316	30.788	77.8000	38.6000	39.20000	0.055	0.0275	140364	0.0195
Promedio	64.198	31.56	32.6411	81.740	40.1800	41.56000	0.0654	0.0327000	123543	0.0195
Des. Est	1.838302	1.918945	1.464804	2.340598	2.443276	1.865047	0.005200	0.002600	10815.4	0.000000
Secuencia: 14 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 41.4 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	80.032	47.281	32.751	101.9000	60.2000	41.70000	0.061	0.0305	197377	0.0635
97	75.948	46.181	29.767	96.7000	58.8000	37.90000	0.060	0.0300	196000	0.0635
98	74.534	45.475	29.060	94.9000	57.9000	37.00000	0.048	0.0240	241250	0.0575
99	81.289	52.386	28.903	103.5000	66.7000	36.80000	0.048	0.0240	277917	0.0575
100	81.760	46.731	35.029	104.1000	59.5000	44.60000	0.048	0.0240	247917	0.07
Promedio	78.713	47.61	31.1018	100.220	60.6200	39.60000	0.053	0.0265000	232092	0.0624
Des. Est	2.924551	2.461393	2.405422	3.723654	3.133943	3.062679	0.006132	0.003066	31438.7	0.004652
Secuencia: 15 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 55.2 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	91.892	60.711	31.180	117.0000	77.3000	39.70000	0.075	0.0375	206133	0.089
97	89.692	60.004	29.688	114.2000	76.4000	37.80000	0.088	0.0440	173636	0.089
98	99.588	70.450	29.138	126.8000	89.7000	37.10000	0.088	0.0440	203864	0.089
99	97.939	60.868	37.071	124.7000	77.5000	47.20000	0.088	0.0440	176136	0.089
100	96.604	60.790	35.814	123.0000	77.4000	45.60000	0.088	0.0440	175909	0.089
Promedio	95.143	62.56	32.5783	121.140	79.6600	41.48000	0.0854	0.0427000	187136	0.089
Des. Est	3.741530	3.954727	3.249461	4.763864	5.035315	4.137342	0.005200	0.002600	14628.7	0.000000
Secuencia: 16 de 16										
Presión de Confinamiento: 13.8 kPa										
Maximo esfuerzo desviador : 68.9 kPa										
Ciclo	Carga máxima desviadora aplicada Kn	Carga cíclica desviadora aplicada Kn	Carga desviadora de contacto aplicada kN	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Esfuerzo desviador cíclico aplicado kPa	Esfuerzo desviador de contacto aplicado kPa	Deformacion Recuperable mm	Deformación resiliente %	Modulo resiliente kPa	Tension permanente %
96	115.218	77.597	37.621	146.7000	98.8000	47.90000	0.064	0.0320	308750	0.146
97	122.444	89.928	32.515	155.9000	114.5000	41.40000	0.076	0.0380	301316	0.146
98	115.768	77.833	37.935	147.4000	99.1000	48.30000	0.051	0.0255	388627	0.1525
99	115.296	77.440	37.856	146.8000	98.6000	48.20000	0.063	0.0315	313016	0.1525
100	109.956	77.519	32.437	140.0000	98.7000	41.30000	0.064	0.0320	308438	0.1525
Promedio	115.736	80.06	35.6728	147.360	101.9400	45.42000	0.0636	0.0318000	324029	0.1499
Des. Est	3.971537	4.934051	2.612154	5.056718	6.282229	3.325898	0.007915	0.003957	32516.7	0.003184

Anexo A-5.2.1.1 *Tabla de secuencia de series del ensayo*

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S ₃ kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	10.5000	0.2939	134.70	0.012	0.0000	84000	4047.72
2	41.40	27.60	35.0000	2.7904	159.20	0.022	0.0024	163354	23786.63
3	41.40	41.40	53.3400	3.8781	177.54	0.035	0.0026	154393	15969.33
4	41.40	55.20	81.3800	5.1526	205.58	0.033	0.0040	249328	17193.04
5	41.40	68.90	103.9000	12.6047	228.10	0.032	0.0047	325809	21795.37
6	27.60	13.80	12.4600	2.2812	95.26	0.014	0.0026	94206	25776.01
7	27.60	27.60	37.9800	4.4116	120.78	0.021	0.0032	184891	38464.73
8	27.60	41.40	58.7800	8.4348	141.58	0.021	0.0002	275630	31130.00
9	27.60	55.20	84.7400	6.0430	167.54	0.028	0.0026	308766	27363.66
10	27.60	68.90	109.2800	10.1416	192.08	0.019	0.0219	215382	312804.52
11	13.80	13.80	19.6000	0.6431	61.00	0.018	0.0029	112480	19195.27
12	13.80	27.60	40.1800	2.3406	81.58	0.033	0.0026	123543	10815.37
13	13.80	41.40	60.6200	3.7237	102.02	0.027	0.0031	232092	31438.67
14	13.80	55.20	79.6600	4.7639	121.06	0.043	0.0026	187136	14628.66
15	13.80	68.90	101.9400	5.0567	143.34	0.032	0.0040	324029	32516.71

Anexo A-5.2.1.2 *Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo*



Anexo A-5.2.1.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

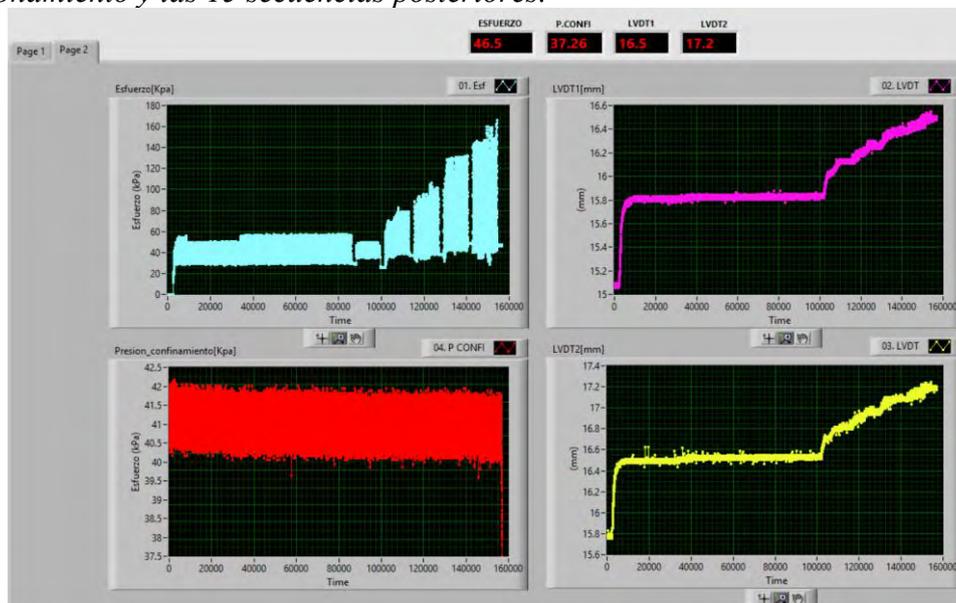
Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	+ -
3	200	550	125	0.4	1	+ -
4	0	∞	344.4	0.45	1	+ -

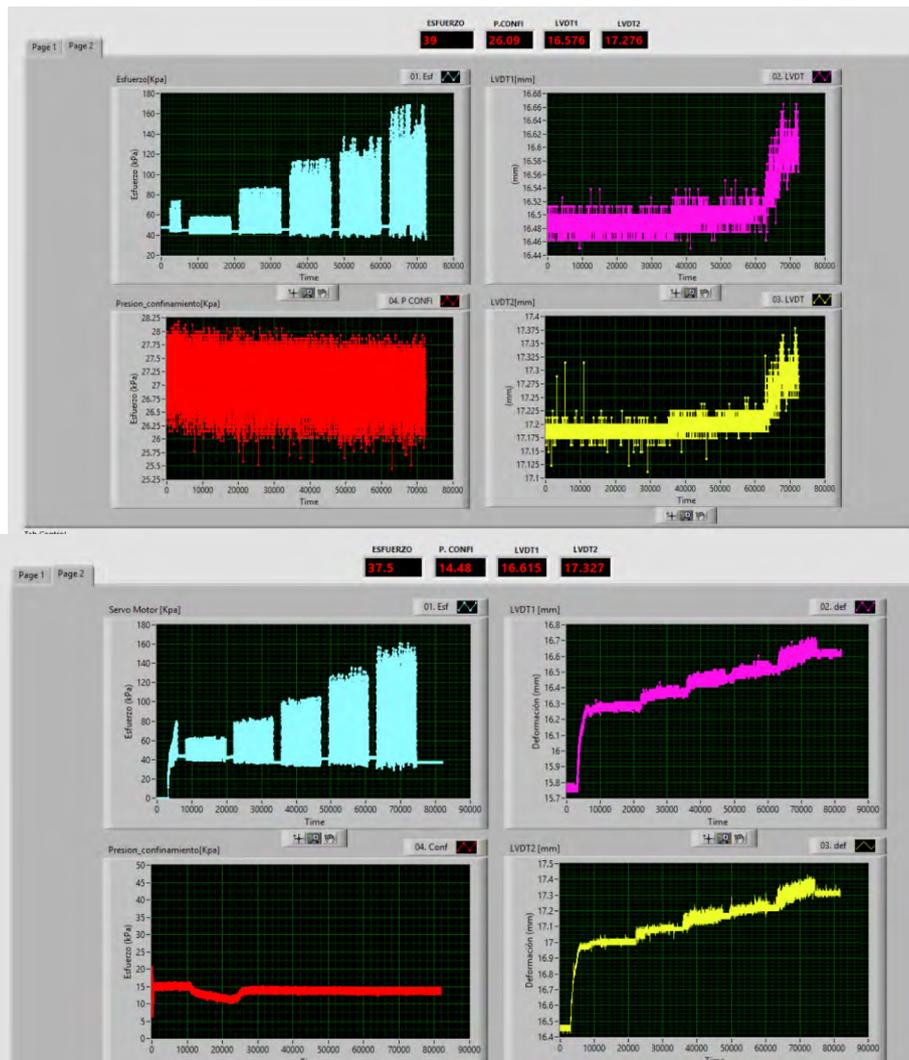
Loads					
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:

	$\sigma_1 : 155$	$\sigma_2 : 3.56$	$\sigma_3 : 3.56$
$Mr = 3113.613 \times Pa \times \left[\frac{162.12}{Pa} \right]^{0.0912} \times \left[\frac{3.56}{Pa} \right]^{0.5077}$			
$Mr = 334.95 \text{ Mpa}$			

Anexo A-5.2.1.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz "Main_civil 19v" del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



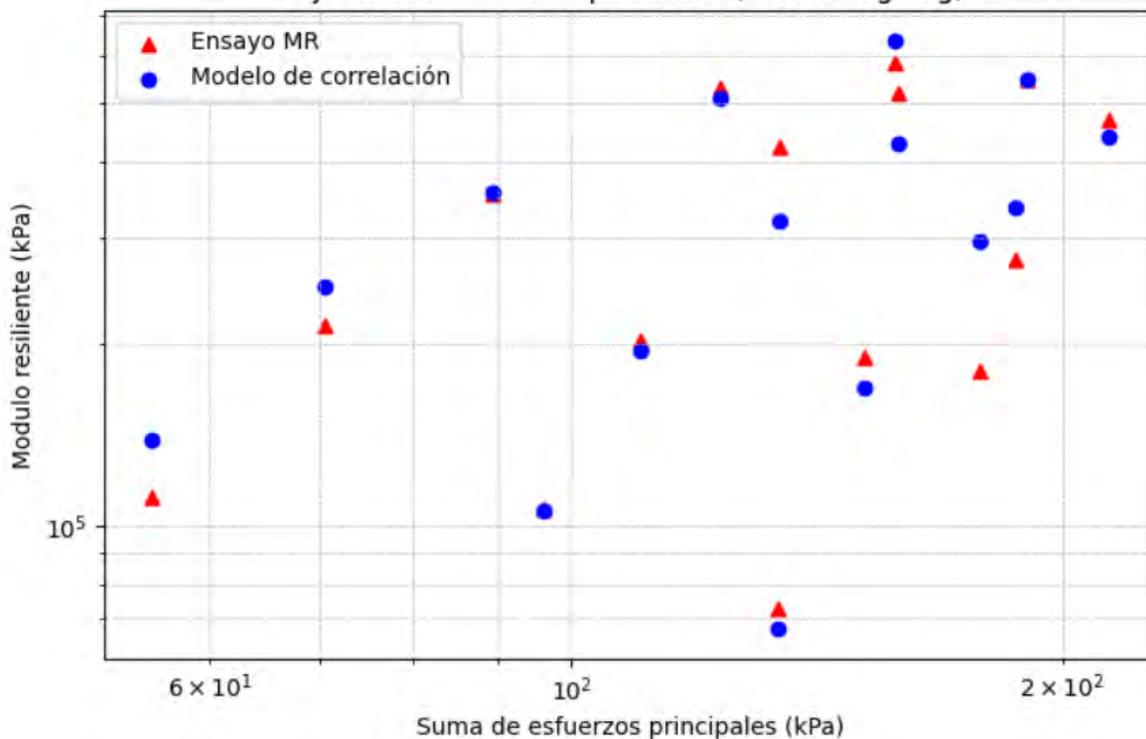


Anexo A-5.2.2.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "SC-SM" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (1.5%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento o S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	9.4600	0.4317	133.66	0.013	0.0000	72769	3175.35
2	41.40	27.60	27.1400	3.0768	151.34	0.015	0.0032	190025	53020.74
3	41.40	41.40	53.5800	1.0602	177.78	0.030	0.0047	179869	25181.27
4	41.40	55.20	62.7600	5.9842	186.96	0.023	0.0032	276062	18367.65
5	41.40	68.90	89.2600	6.9967	213.46	0.019	0.0000	469789	39323.36
6	27.60	13.80	13.3000	0.1625	96.10	0.012	0.0000	106400	1338.66
7	27.60	27.60	27.5000	4.0504	110.30	0.014	0.0026	202046	28676.73
8	27.60	41.40	51.1800	10.6942	133.98	0.014	0.0049	423973	162983.84
9	27.60	55.20	75.9200	6.3047	158.72	0.015	0.0032	520766	94264.52
10	27.60	68.90	107.6600	9.0758	190.46	0.020	0.0047	547079	91945.50
11	13.80	13.80	13.8800	0.2498	55.28	0.013	0.0000	111040	1631.69
12	13.80	27.60	29.1200	4.8303	70.52	0.014	0.0026	213638	27028.79
13	13.80	41.40	48.0000	5.0764	89.40	0.014	0.0026	352691	31690.41
14	13.80	55.20	81.9200	7.8091	123.32	0.015	0.0000	528516	48517.50
15	13.80	68.90	116.5000	2.4585	157.90	0.020	0.0026	581496	60178.60

Anexo A-5.2.2.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo

Ajuste del Modelo Exponencial (Escala Log-Log)



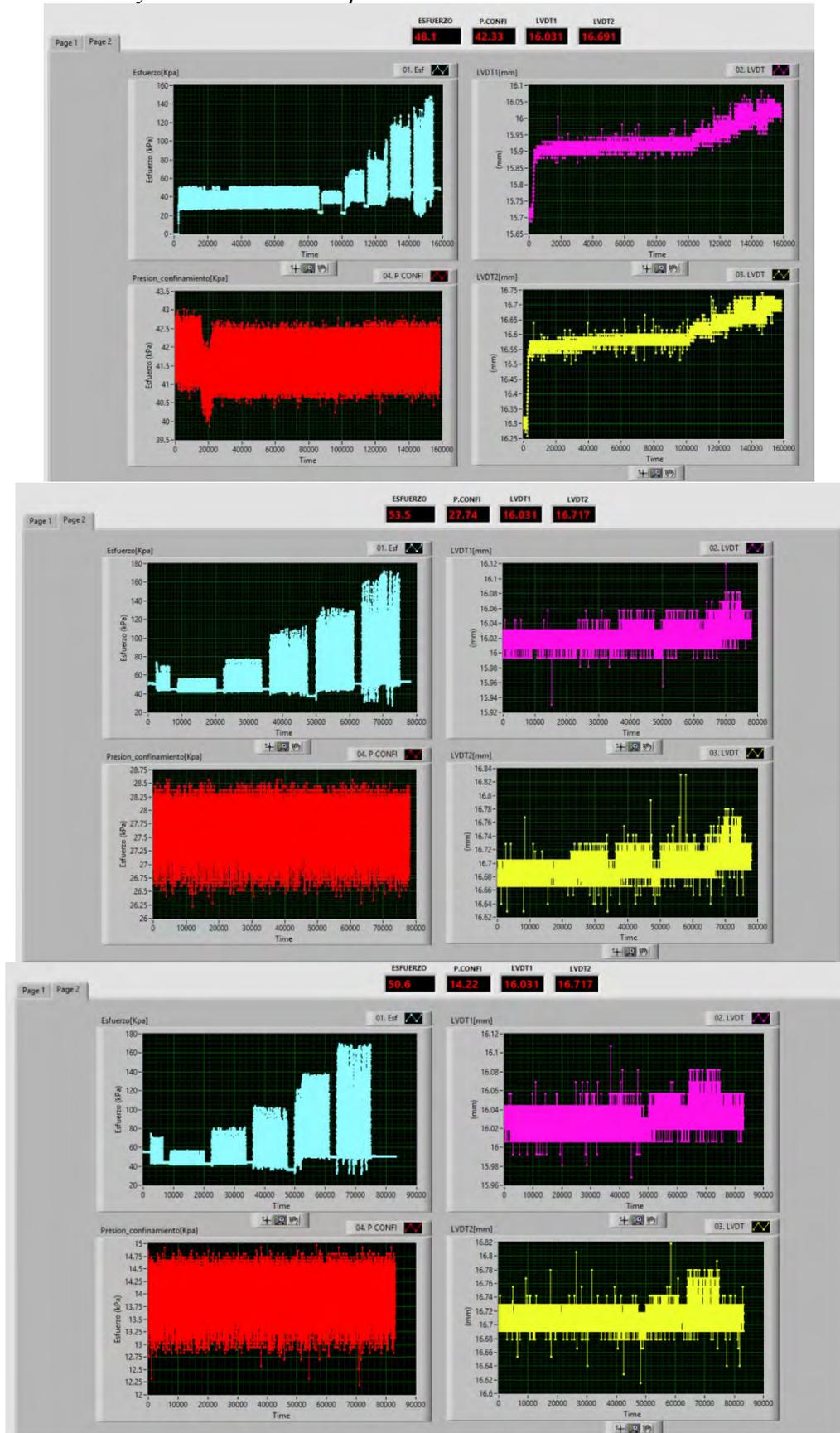
Anexo A-5.2.2.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	+ -
3	200	550	125	0.4	1	+ -
4	0	∞	988.8	0.45	1	+ -

Loads					
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:					
	$\sigma_1 : 267$	$\sigma_2 : 15.9$	$\sigma_3 : 15.9$		
	$Mr = 8074.6554 \times Pa \times \left[\frac{298.80}{Pa} \right]^{-0.4185} \times \left[\frac{251.1}{Pa} \right]^{0.9223}$				
	$Mr = 988.81 \text{ Mpa}$				

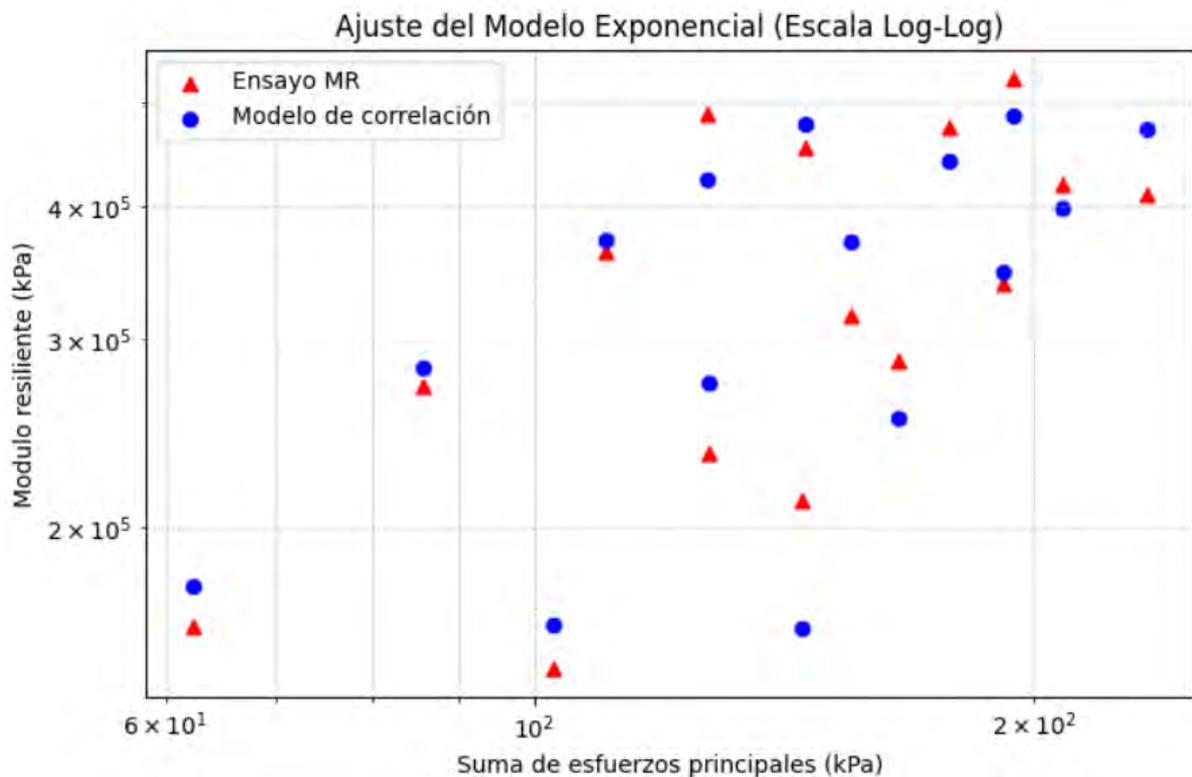
Anexo A-5.2.2.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz “Main_civil 19v” del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



Anexo A-5.2.3.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "SC-SM" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (2.41%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	20.8000	0.7266	145.00	0.010	0.0024	212000	36123.25
2	41.40	27.60	41.5800	1.6930	165.78	0.015	0.0032	286771	54133.73
3	41.40	41.40	67.6000	5.6404	191.80	0.020	0.0000	338000	30595.75
4	41.40	55.20	83.6800	4.0864	207.88	0.020	0.0026	418875	58597.06
5	41.40	68.90	109.5600	8.0808	233.76	0.027	0.0026	409972	14419.38
6	27.60	13.80	19.9600	1.6363	102.76	0.014	0.0026	147747	24947.46
7	27.60	27.60	44.5800	3.6436	127.38	0.019	0.0000	234632	20671.28
8	27.60	41.40	72.2400	4.4025	155.04	0.023	0.0029	316308	34977.22
9	27.60	55.20	95.0800	8.0633	177.88	0.020	0.0026	474153	49698.26
10	27.60	68.90	111.6200	12.8835	194.42	0.022	0.0032	525626	80764.91
11	13.80	13.80	20.9800	0.6675	62.38	0.013	0.0000	161385	7790.15
12	13.80	27.60	44.2800	2.0576	85.68	0.017	0.0032	270923	48596.23
13	13.80	41.40	68.9600	4.3683	110.36	0.019	0.0000	362947	27763.54
14	13.80	55.20	85.6000	5.6205	127.00	0.018	0.0024	487935	60919.29
15	13.80	68.90	104.2400	3.7293	145.64	0.023	0.0000	453217	7881.93

Anexo A-5.2.3.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.2.3.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

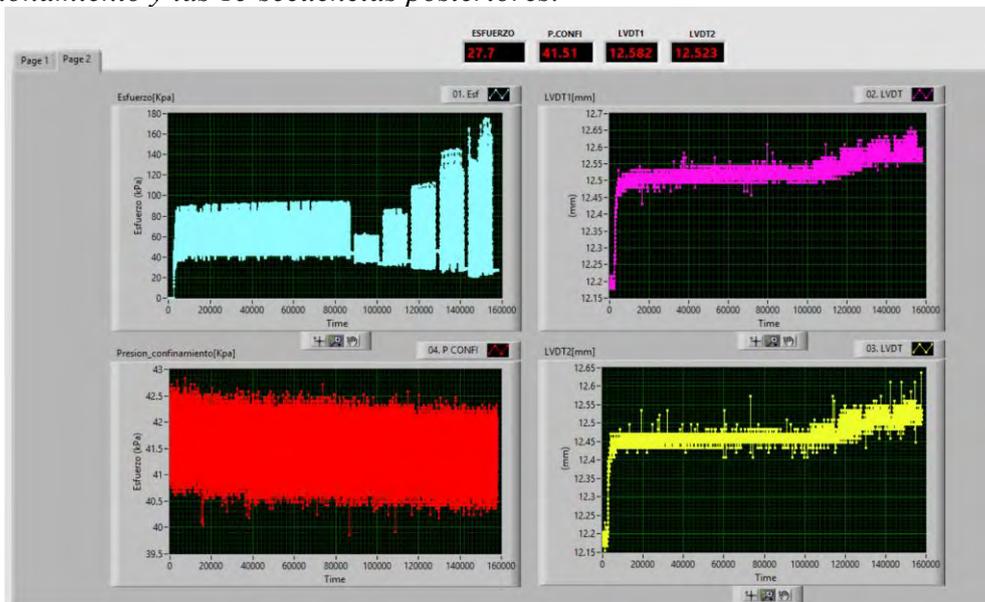
Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	+ -
3	200	550	125	0.4	1	+ -
4	0	∞	756.4	0.45	1	+ -

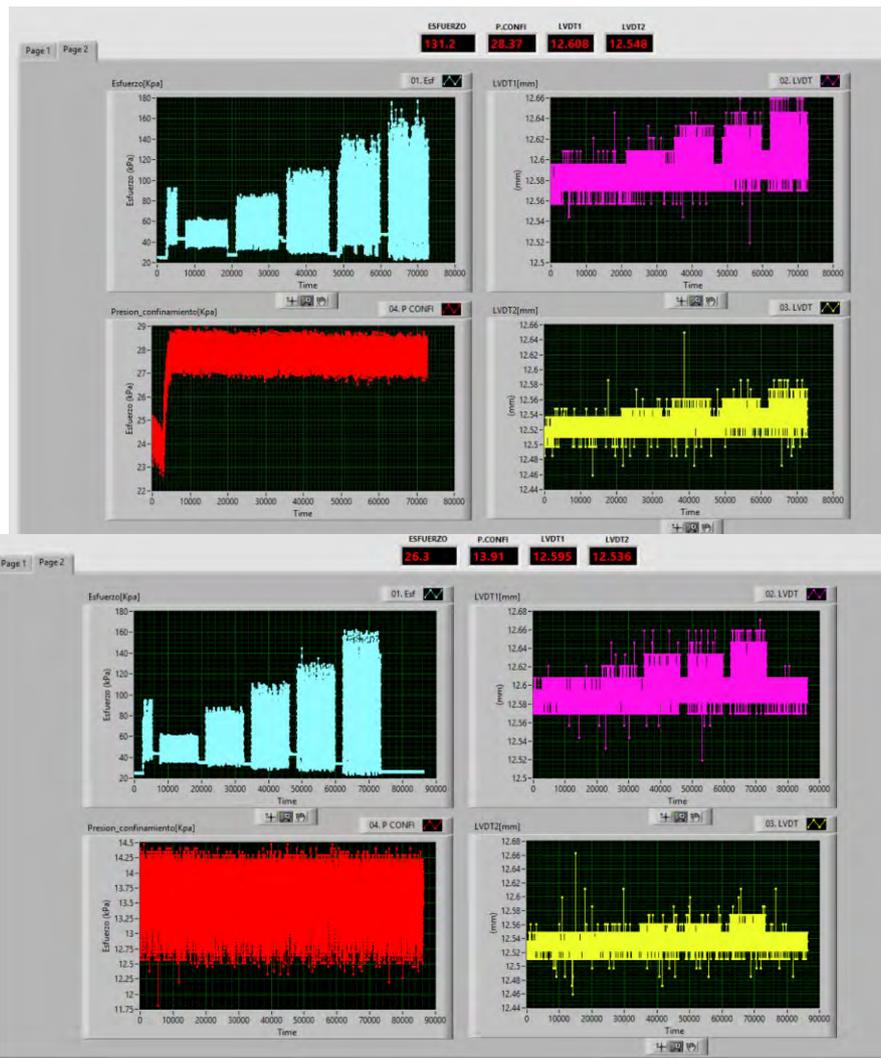
Loads						
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)	
1	0	0	40	750	130.294	+ -

2. Esfuerzos principales en kPa:

	$\sigma_1 : 235$	$\sigma_2 : 11.4$	$\sigma_3 : 11.4$
$Mr = 5669.1593 \times Pa \times \left[\frac{257.8}{Pa} \right]^{-0.1} \times \left[\frac{223.6}{Pa} \right]^{0.6761}$			
$Mr = 756.394 \text{ Mpa}$			

Anexo A-5.2.3.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz "Main_civil 19v" del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.

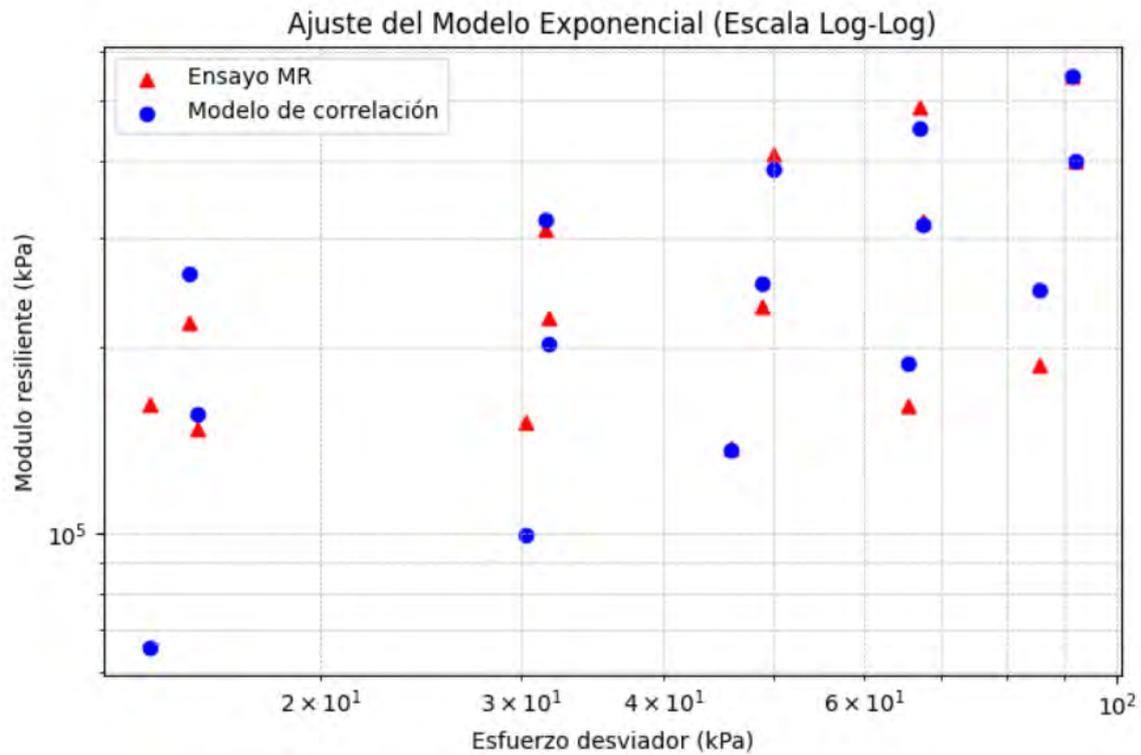




Anexo A-5.2.4.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "SC-SM" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (4.04%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento o S ₃ kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	15.3400	1.0443	139.54	0.007	0.0012	219148	37262.83
2	41.40	27.60	31.5100	0.5221	155.71	0.011	0.0020	308594	44539.23
3	41.40	41.40	49.9220	1.8086	174.12	0.014	0.0037	409051	145209.90
4	41.40	55.20	67.0840	3.0461	191.28	0.015	0.0045	487380	137376.87
5	41.40	68.90	91.5260	3.6321	215.73	0.017	0.0024	548643	71672.04
6	27.60	13.80	15.5500	0.5889	98.35	0.011	0.0000	148095	3608.51
7	27.60	27.60	31.6980	1.9249	114.50	0.015	0.0037	223654	51137.55
8	27.60	41.40	48.8040	1.3359	131.60	0.022	0.0037	232692	34082.06
9	27.60	55.20	67.5380	1.2532	150.34	0.022	0.0051	319774	57129.05
10	27.60	68.90	91.9620	2.7582	174.76	0.024	0.0037	400421	57610.08
11	13.80	13.80	14.1540	0.4248	55.55	0.009	0.0012	162057	22141.37
12	13.80	27.60	30.2780	0.3781	71.68	0.020	0.0000	151390	3010.55
13	13.80	41.40	45.8260	0.9925	87.23	0.034	0.0020	137307	9756.68
14	13.80	55.20	65.6280	2.3648	107.03	0.041	0.0020	160347	6159.77
15	13.80	68.90	85.6280	2.6279	127.03	0.046	0.0037	187192	13401.51

Anexo A-5.2.4.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.2.4.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	+ -
3	200	550	125	0.4	1	+ -
4	0	∞	729.5	0.45	1	+ -

Loads						
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)	
1	0	0	40	750	130.294	+ -

2. Esfuerzos principales en kPa:

$$\sigma_1 : 232$$

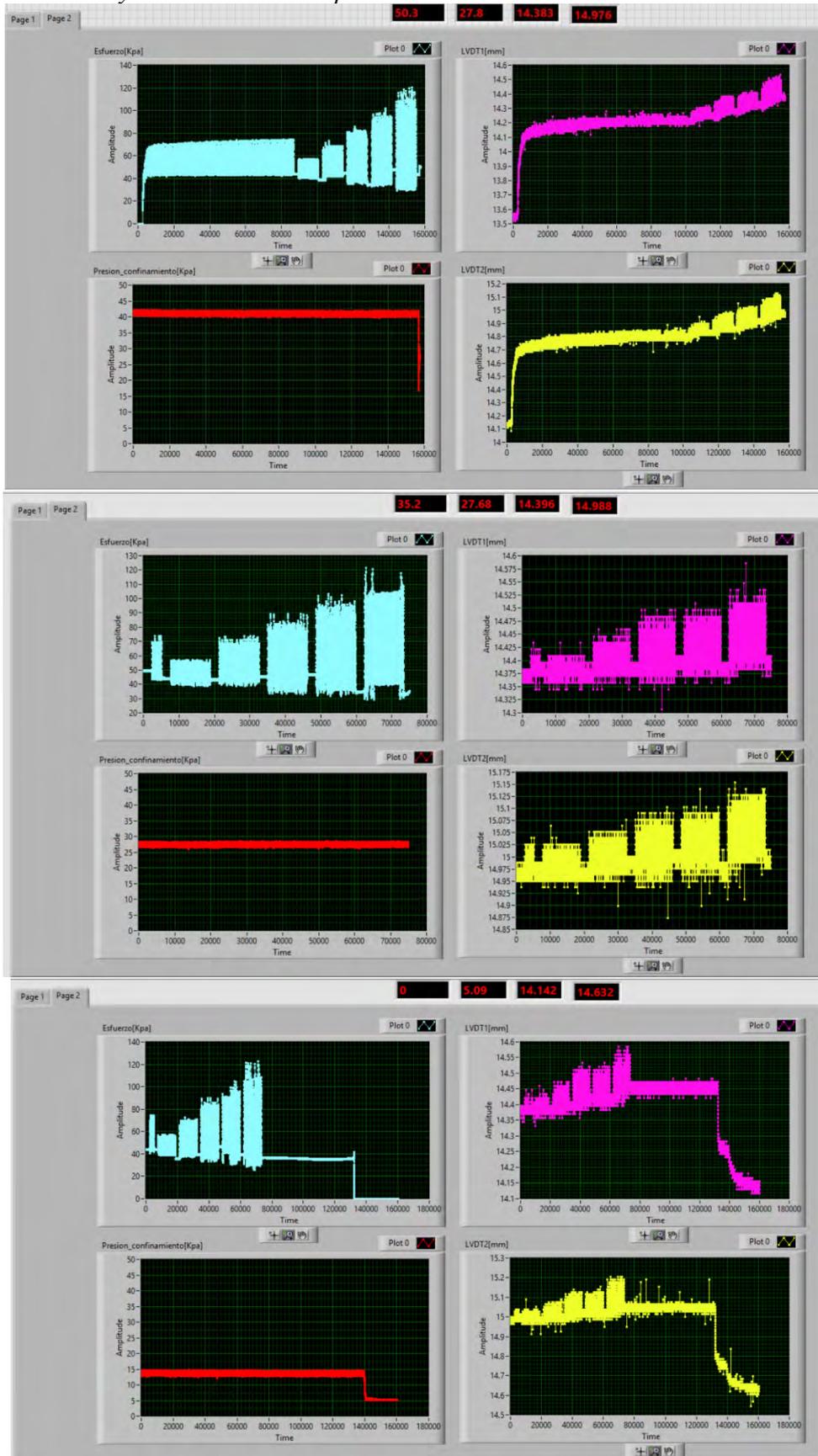
$$\sigma_2 : 10.9$$

$$\sigma_3 : 10.9$$

$$Mr = 1412.3684 \times Pa \times \left[\frac{\theta}{Pa} \right]^{1.5008} \times \left[\frac{\sigma_d}{Pa} \right]^{0.046}$$

$$Mr = 729.54 \text{ Mpa}$$

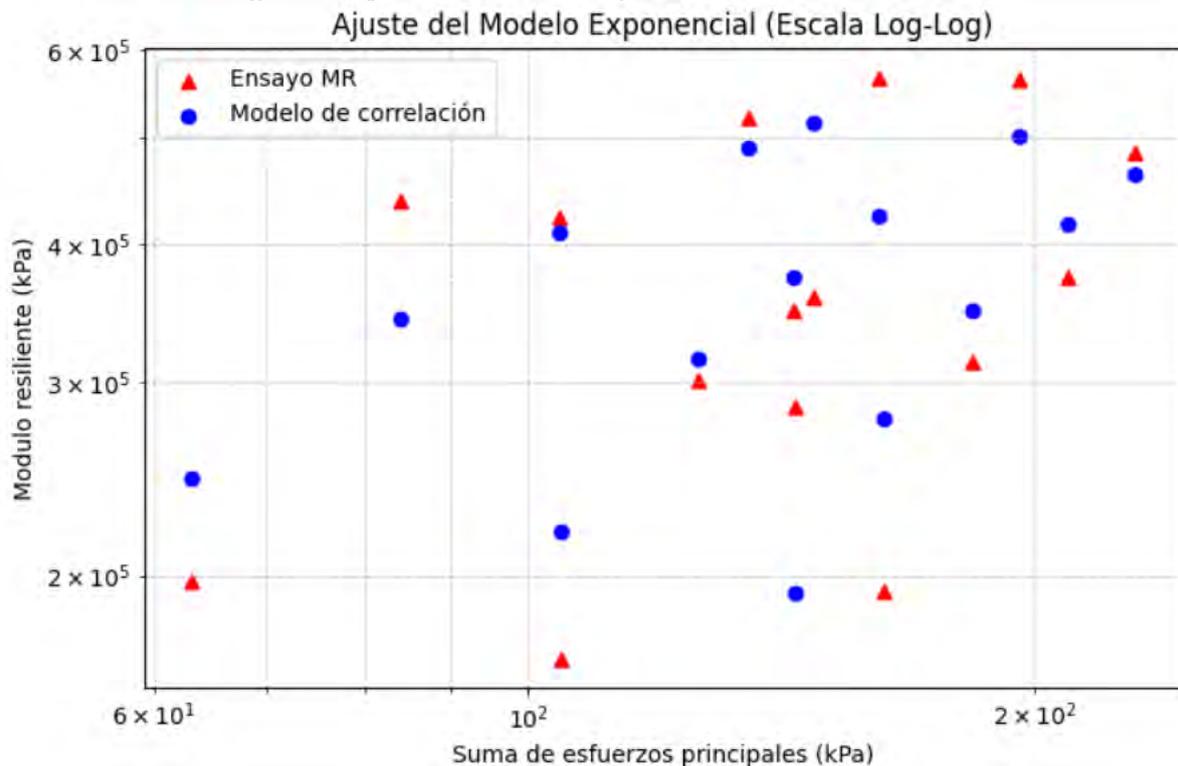
Anexo A-5.2.4.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz “Main_civil 19v” del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



Anexo A-5.2.5.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "SC-SM" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (5.93%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento σ_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	19.9200	1.8104	144.12	0.007	0.0000	284571	12235.78
2	41.40	27.60	38.6200	1.6895	162.82	0.022	0.0052	193399	61209.40
3	41.40	41.40	59.3800	3.8427	183.58	0.019	0.0000	312526	18837.11
4	41.40	55.20	84.9400	8.1266	209.14	0.023	0.0031	373327	32332.93
5	41.40	68.90	104.9000	7.1662	229.10	0.023	0.0050	485017	109094.15
6	27.60	13.80	21.8600	2.5206	104.66	0.013	0.0000	168154	4313.18
7	27.60	27.60	43.4400	3.4806	126.24	0.015	0.0032	300884	66497.18
8	27.60	41.40	60.8400	5.0953	143.64	0.018	0.0000	347657	5663.78
9	27.60	55.20	78.9000	4.2657	161.70	0.014	0.0024	567377	69745.28
10	27.60	68.90	113.0200	10.6097	195.82	0.020	0.0024	564223	53558.04
11	13.80	13.80	21.7400	1.3565	63.14	0.011	0.0000	197636	8143.34
12	13.80	27.60	42.6800	2.5740	84.08	0.011	0.0032	438129	118650.48
13	13.80	41.40	63.0000	2.6781	104.40	0.015	0.0029	422866	72354.24
14	13.80	55.20	93.8800	6.4235	135.28	0.019	0.0041	520645	128840.62
15	13.80	68.90	106.3200	6.9457	147.72	0.030	0.0048	357522	44762.56

Anexo A-5.2.5.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.2.5.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

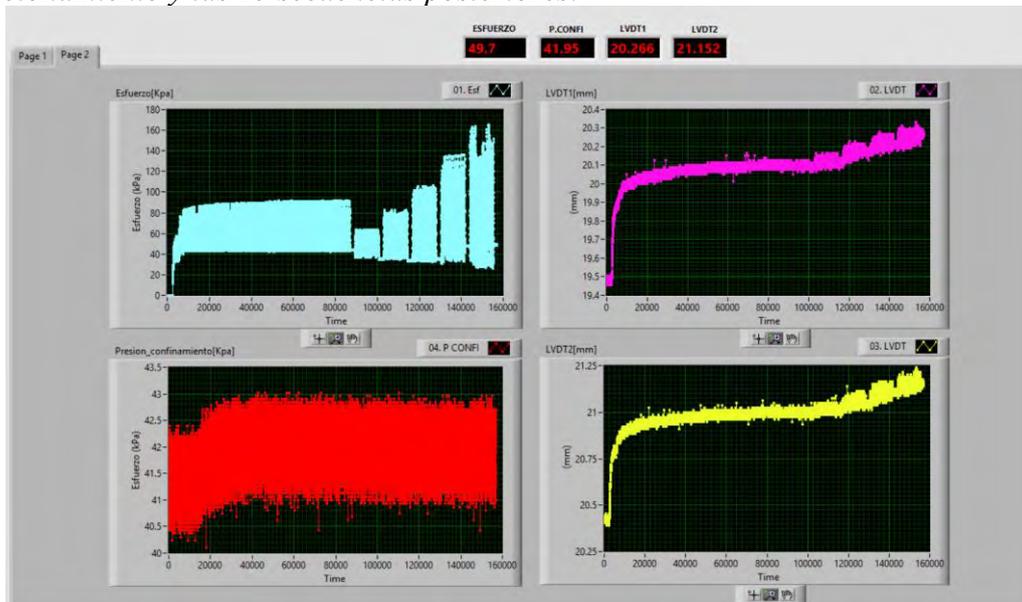
Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	- +
3	200	550	125	0.4	1	- +
4	0	∞	699.2	0.45	1	- +

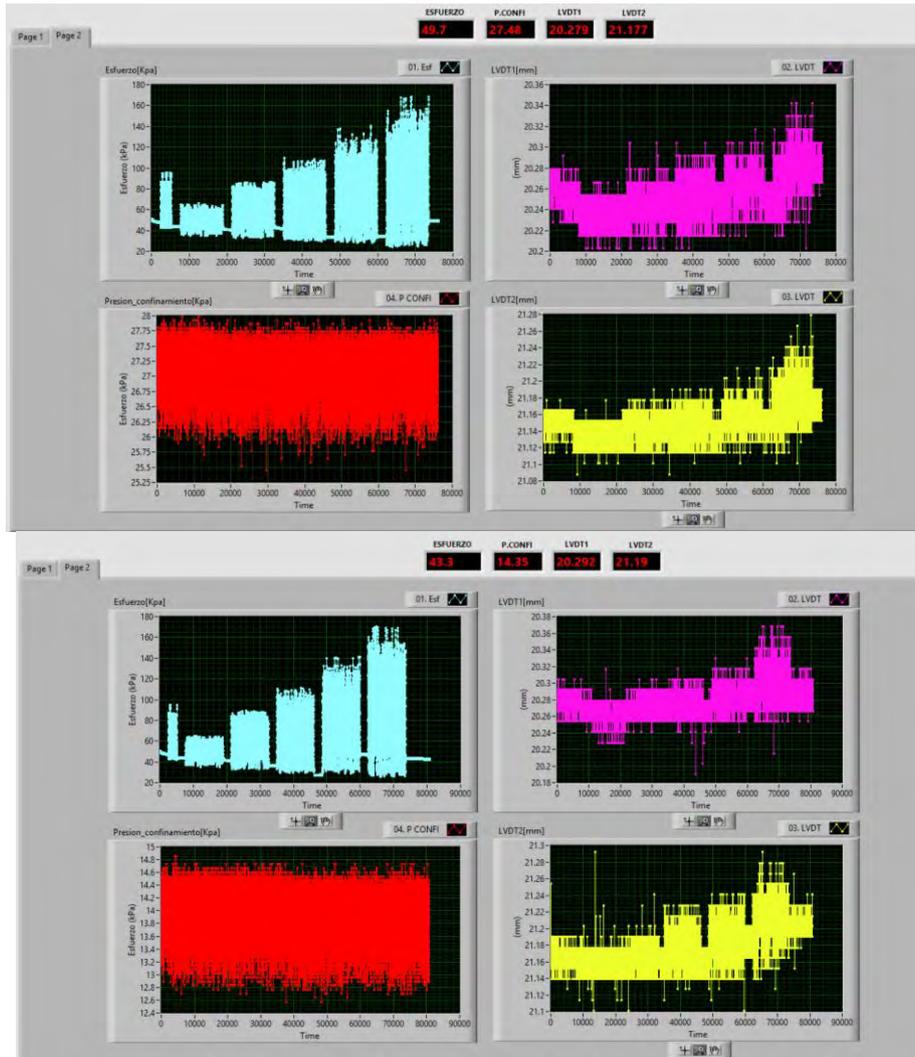
Loads					
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:

	$\sigma_1 : 227$	$\sigma_2 : 10.3$	$\sigma_3 : 10.3$
$Mr = 6933.678 \times Pa \times \left[\frac{247.6}{Pa} \right]^{-0.2285} \times \left[\frac{216.7}{Pa} \right]^{0.5915}$			
$Mr = 699.17 \text{ Mpa}$			

Anexo A-5.2.5.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz “Main_civil 19v” del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.

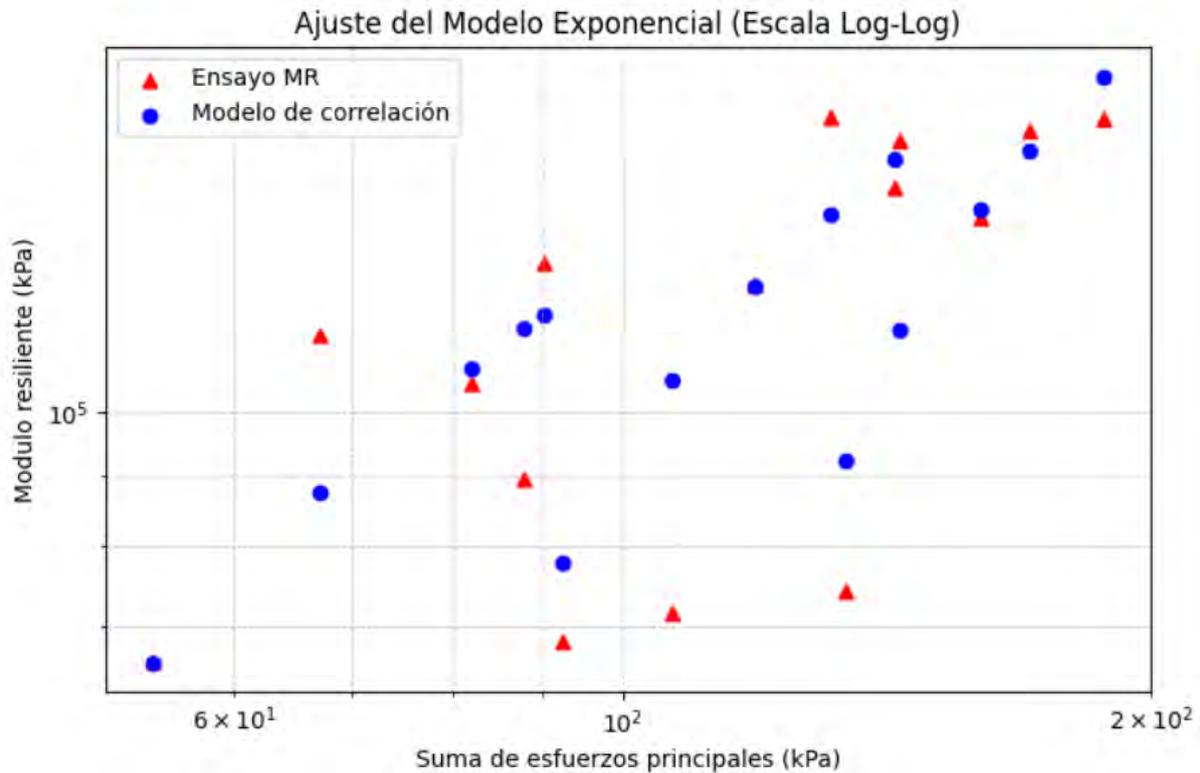




Anexo A-5.2.6.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "SC-SM" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (9.97%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento o S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	9.6400	0.1327	133.84	0.013	0.0000	74154	923.08
2	41.40	27.60	19.6200	0.1020	143.82	0.013	0.0000	156960	1985.55
3	41.40	41.40	35.7600	2.6377	159.96	0.026	0.0026	137774	22208.69
4	41.40	55.20	46.4000	3.2829	170.60	0.029	0.0030	159379	9277.98
5	41.40	68.90	63.7200	5.2460	187.92	0.039	0.0002	162506	13137.69
6	27.60	13.80	9.4800	0.2315	92.28	0.014	0.0024	68211	8680.09
7	27.60	27.60	23.8000	1.2257	106.60	0.027	0.1939	71583	123834.38
8	27.60	41.40	36.2000	2.5287	119.00	0.029	0.0026	123566	960.30
9	27.60	55.20	48.4400	3.2019	131.24	0.030	0.0032	162815	10229.97
10	27.60	68.90	60.1000	5.1738	142.90	0.042	0.0031	144867	17185.60
11	13.80	13.80	12.5600	0.5004	53.96	0.019	0.0000	66105	2459.65
12	13.80	27.60	25.8000	0.8207	67.20	0.023	0.0029	113629	15416.73
13	13.80	41.40	40.5000	2.4339	81.90	0.039	0.0062	104919	11627.86
14	13.80	55.20	48.6600	2.4935	90.06	0.038	0.0000	128053	6524.19
15	13.80	68.90	46.4800	3.8220	87.88	0.052	0.0048	89453	7131.89

Anexo A-5.2.6.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.2.6.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

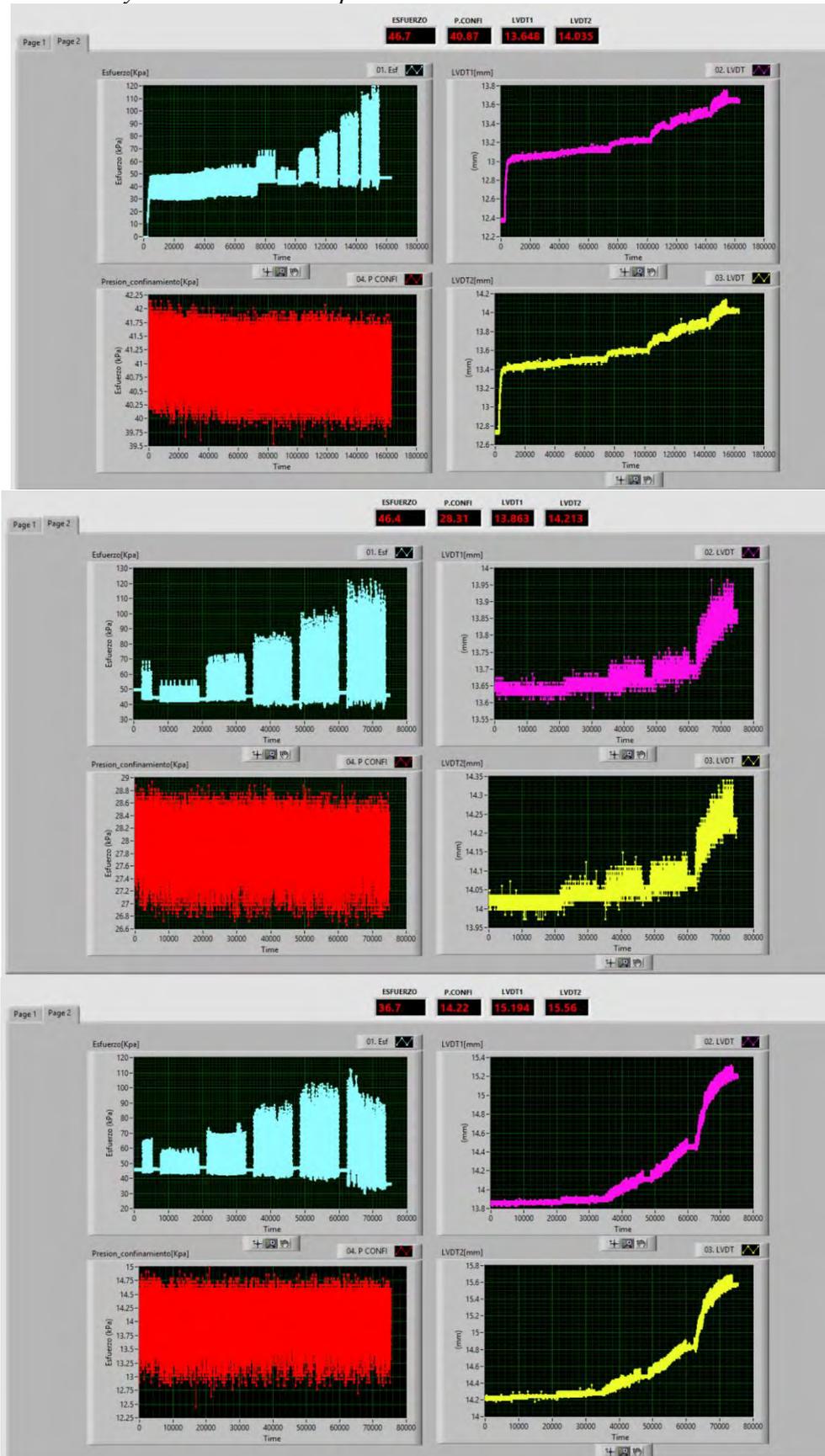
Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ / -
2	250	350	207	0.4	1	+ / -
3	200	550	125	0.4	1	+ / -
4	0	∞	171.3	0.45	1	+ / -

Loads						
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)	
1	0	0	40	750	130.294	+ / -

2. Esfuerzos principales en kPa:

σ_1 : 106	σ_2 : 0.988	σ_3 : 0.988
$Mr = 1839.3194 \times Pa \times \left[\frac{107.98}{Pa} \right]^{0.3284} \times \left[\frac{105.01}{Pa} \right]^{0.3702}$		
$Mr = 171.29 \text{ Mpa}$		

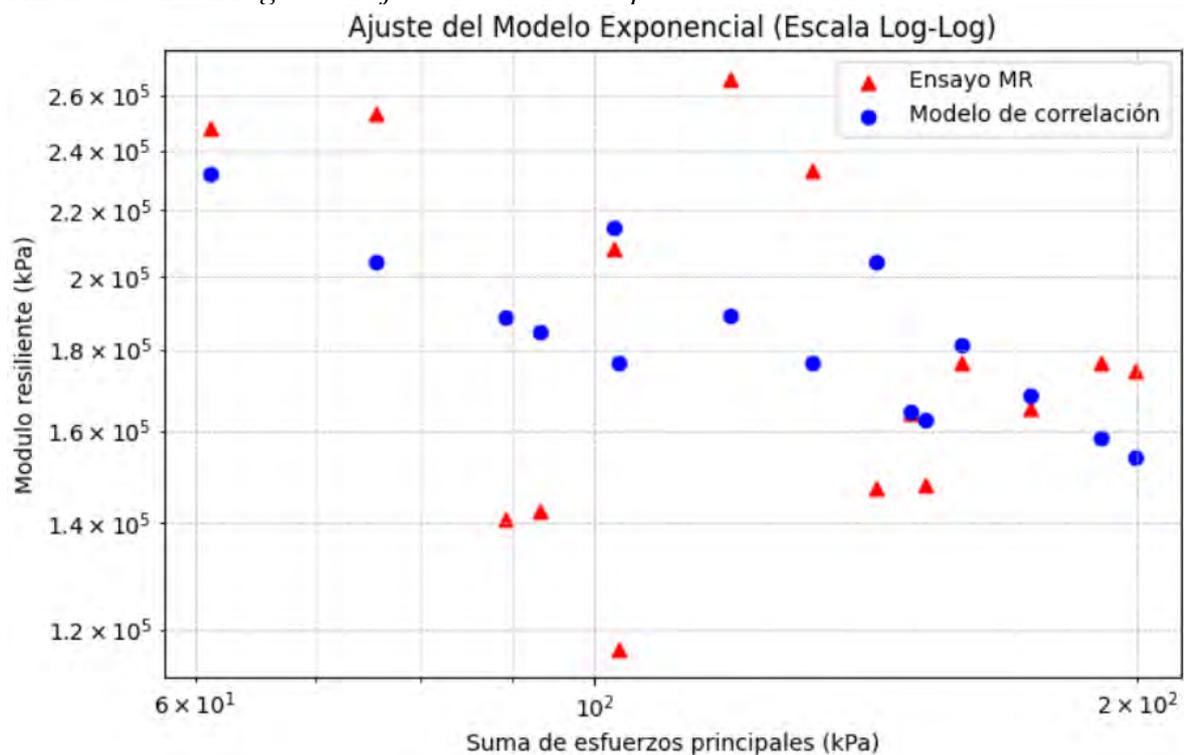
Anexo A-5.2.6.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz “Main_civil 19v” del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



Anexo A-5.2.7.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "SC-SM" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (12.35%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	19.1200	0.8075	143.32	0.013	0.0000	147077	6938.44
2	41.40	27.60	35.3400	0.1625	159.54	0.020	0.0026	176394	18017.57
3	41.40	41.40	50.2600	2.0252	174.46	0.031	0.0026	165040	12619.10
4	41.40	55.20	66.4200	4.1456	190.62	0.038	0.0041	176360	17558.97
5	41.40	68.90	75.1200	0.6554	199.32	0.043	0.0026	174598	11964.93
6	27.60	13.80	19.5800	2.4752	102.38	0.011	0.0031	207941	74297.11
7	27.60	27.60	36.0600	2.1232	118.86	0.014	0.0026	266225	37291.46
8	27.60	41.40	49.3000	1.3145	132.10	0.022	0.0032	232776	30796.81
9	27.60	55.20	66.7800	0.3162	149.58	0.041	0.0029	164111	11640.02
10	27.60	68.90	69.8400	6.9573	152.64	0.048	0.0065	147907	22893.89
11	13.80	13.80	19.8200	0.2926	61.22	0.008	0.0000	247750	1837.12
12	13.80	27.60	34.2800	2.3346	75.68	0.014	0.0026	252947	24376.54
13	13.80	41.40	47.7800	3.5539	89.18	0.034	0.0031	140811	15085.53
14	13.80	55.20	51.9200	0.3323	93.32	0.037	0.0026	142246	11011.41
15	13.80	68.90	61.7400	0.7167	103.14	0.053	0.0032	116693	7218.92

Anexo A-5.2.7.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo



Anexo A-5.2.7.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

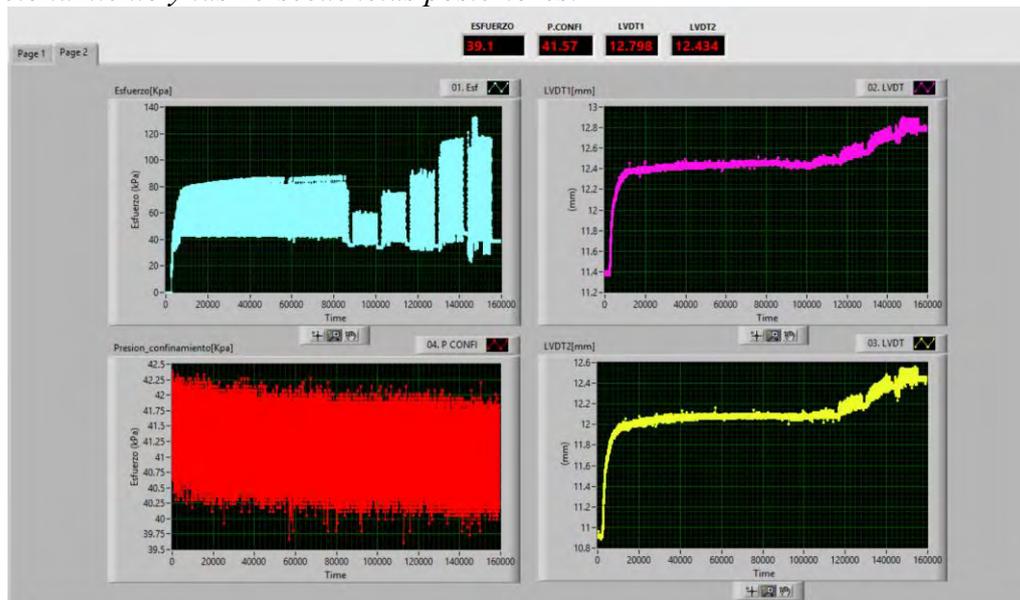
Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+ -
2	250	350	207	0.4	1	+ -
3	200	550	125	0.4	1	+ -
4	0	∞	161.5	0.45	1	+ -

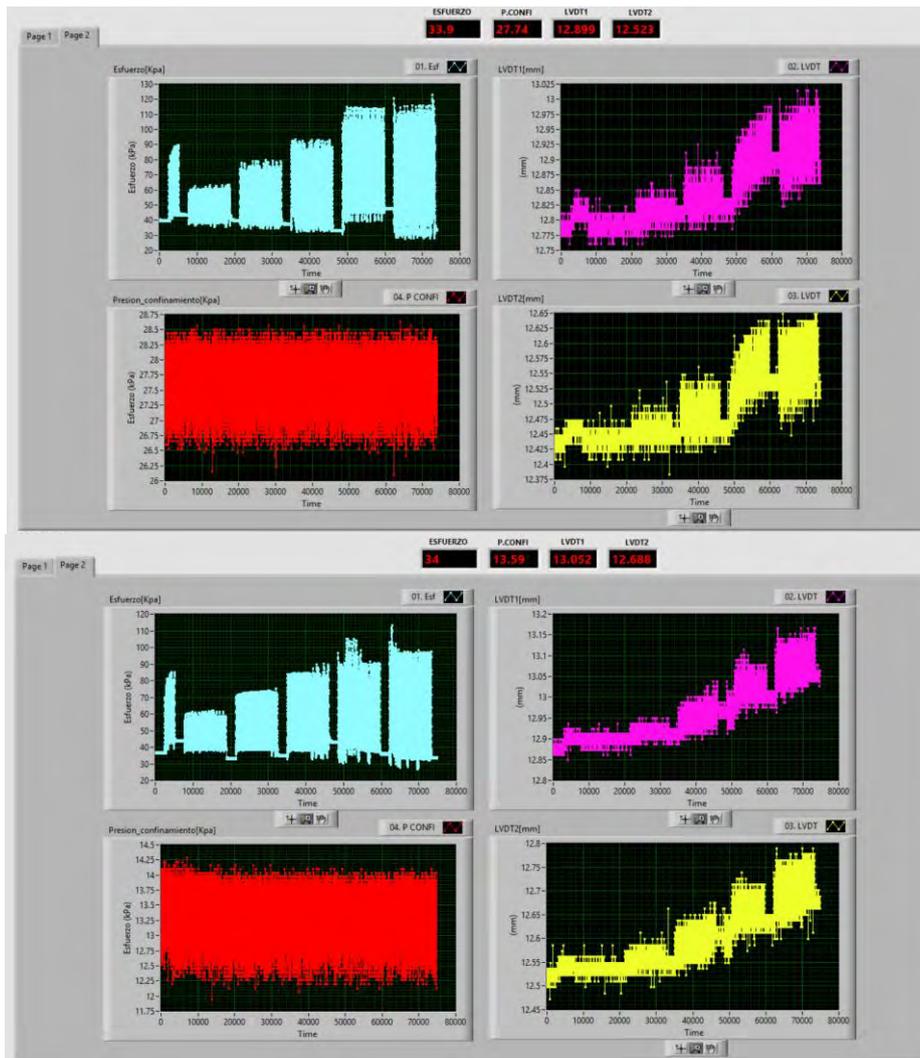
Loads						
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)	
1	0	0	40	750	130.294	+ -

2. Esfuerzos principales en kPa:

	$\sigma_1 : 103$	$\sigma_2 : 0.856$	$\sigma_3 : 0.856$				
	$Mr = 2699.957 \times Pa \times \left[\frac{104.71}{Pa} \right]^{-0.1549} \times \left[\frac{102.14}{Pa} \right]^{-0.1696}$						
	$Mr = 171.55 \text{ Mpa}$						

Anexo A-5.2.7.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz "Main_civil 19v" del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



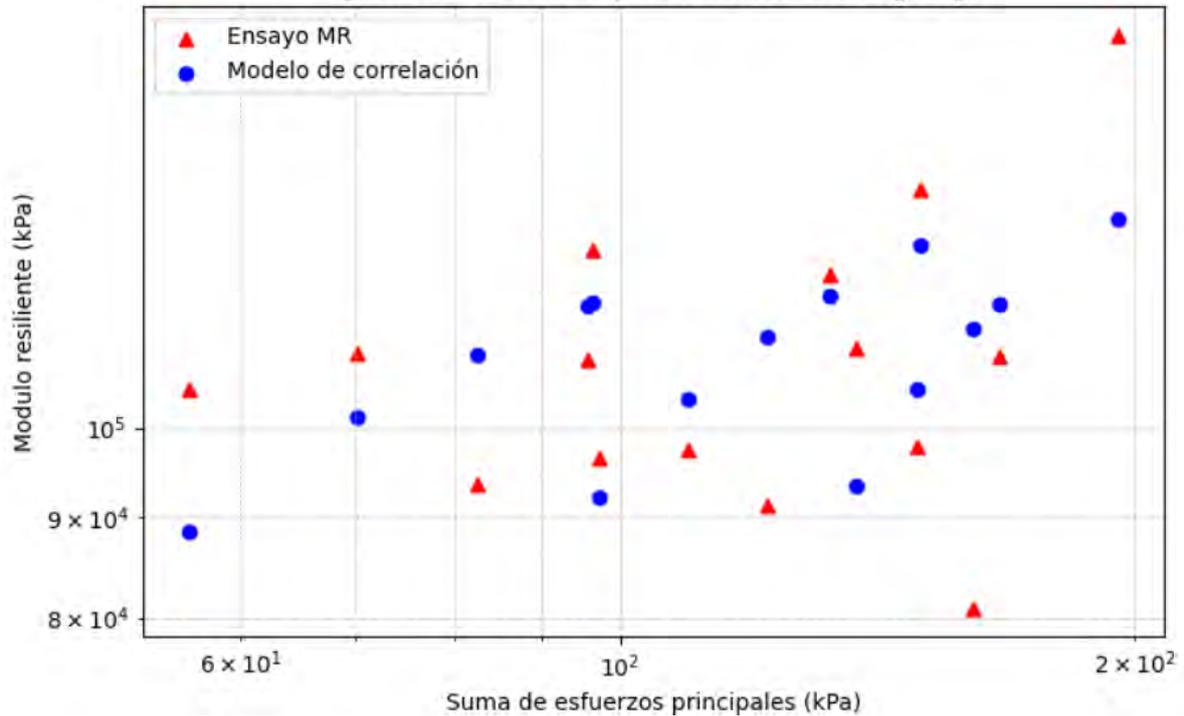


Anexo A-5.2.8.1 AASTHO T 307-99 (2012) Ensayo de módulo de resiliencia Tipo de suelo "SC-SM" compactador al 95% de MDS, con el óptimo contenido de humedad (14.05%)

Numero de Secuencia	Presion de Confinamiento o S_3 kPa	Esfuerzo desviador máximo Teorico kPa	Esfuerzo desviador máximo aplicado kPa	Des. Estándar Esfuerzo desviador	Suma de esfuerzos principales kPa	Deformación resiliente media %	Des. Estándar de Tensión resiliente	Módulo resiliente medio kPa	Des. Estándar de Módulo resiliente
1	41.40	13.80	13.3400	0.5418	137.54	0.013	0.0024	109750	29706.82
2	41.40	27.60	24.9200	0.2939	149.12	0.026	0.0000	97725	941.18
3	41.40	41.40	36.5600	1.3644	160.76	0.045	0.0026	80938	4071.54
4	41.40	55.20	42.4600	1.9376	166.66	0.039	0.0024	108694	7558.58
5	41.40	68.90	71.1600	0.7414	195.36	0.047	0.0110	158646	33551.29
6	27.60	13.80	14.5000	1.0008	97.30	0.015	0.0029	96429	12903.68
7	27.60	27.60	26.8600	1.6952	109.66	0.028	0.0050	97490	8999.47
8	27.60	41.40	39.1000	5.1859	121.90	0.043	0.0047	91325	6917.54
9	27.60	55.20	49.8400	4.2682	132.64	0.042	0.0026	119742	8282.64
10	27.60	68.90	67.1000	3.7849	149.90	0.051	0.0026	132338	11149.38
11	13.80	13.80	14.6400	0.7310	56.04	0.014	0.0000	104571	8434.62
12	13.80	27.60	28.8600	0.9839	70.26	0.027	0.0026	109226	12109.25
13	13.80	41.40	41.1800	3.6822	82.58	0.045	0.0061	93621	8777.87
14	13.80	55.20	54.9200	2.3760	96.32	0.045	0.0024	123099	7714.74
15	13.80	68.90	54.2800	2.3025	95.68	0.051	0.0040	108247	12638.51

Anexo A-5.2.8.2 Figura de ajuste del modelo exponencial del Modulo

Ajuste del Modelo Exponencial (Escala Log-Log)



Anexo A-5.2.8.3 Aplicación de la teoría multicapa elástica para el cálculo del módulo

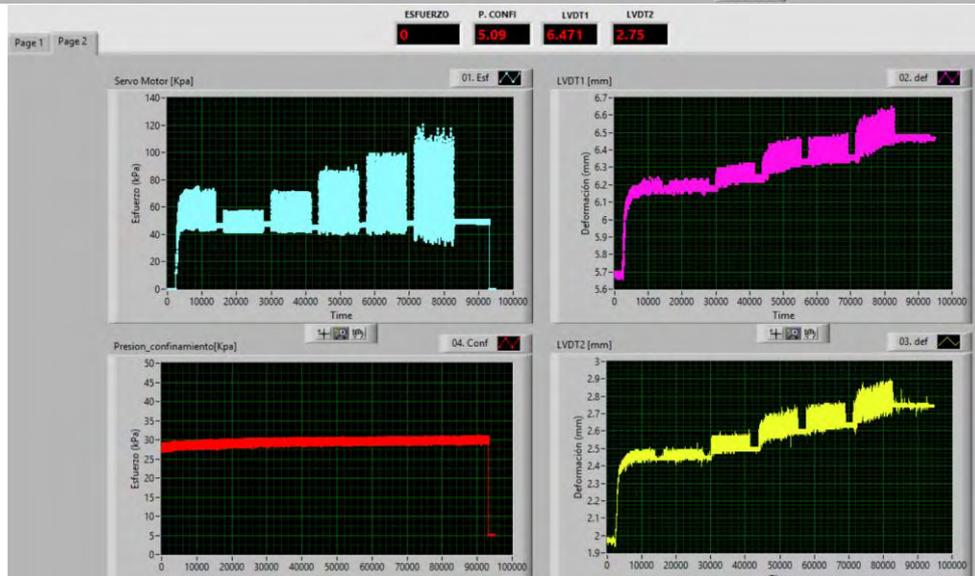
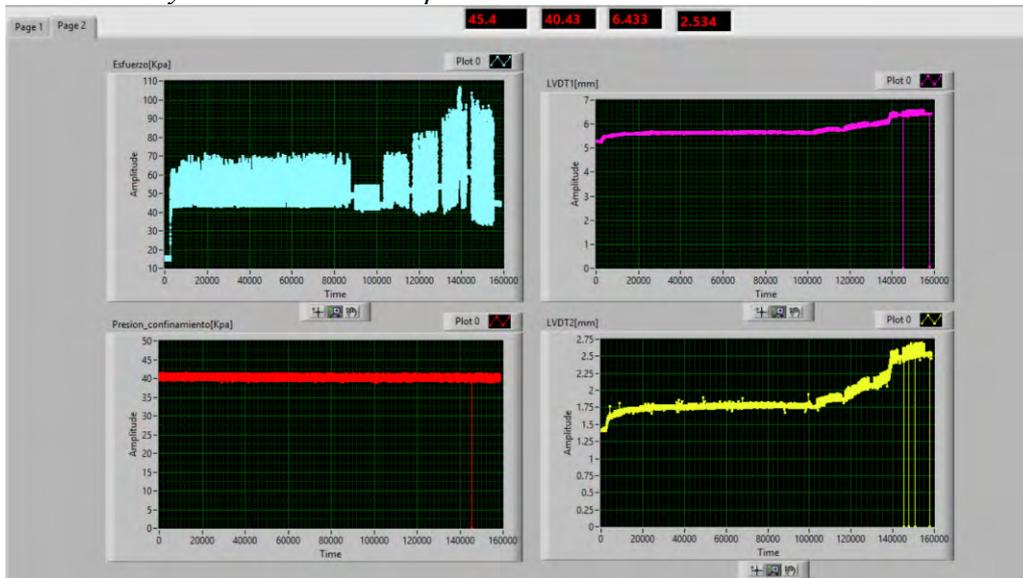
Layers						
Layer	Thickness (mm)	Depth (mm)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction	
1	100	100	2482	0.35	1	+
2	250	350	207	0.4	1	+
3	200	550	125	0.4	1	+
4	0	∞	119.4	0.45	1	+

Loads					
Load	X (mm)	Y (mm)	Load (kN)	Pressure (kPa)	Radius (mm)
1	0	0	40	750	130.294

2. Esfuerzos principales en kPa:

$\sigma_1 : 85.9$	$\sigma_2 : 0.338$	$\sigma_3 : 0.338$			
$Mr = 1711.113 \times Pa \times \left[\frac{86.58}{Pa} \right]^{-0.077} \times \left[\frac{85.56}{Pa} \right]^{0.1711}$					
$Mr = 119.42 \text{ Mpa}$					

Anexo A-5.2.8.4 Datos del ensayo de modulo resiliente realizado en laboratorio, desde la interfaz “Main_civil 19v” del software LabVIEW correspondientes al periodo de acondicionamiento y las 15 secuencias posteriores.



ANEXO B. PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO B-1. ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Anexo B-1.1 Fotografías del procedimiento del ensayo de granulometría por tamizado



Anexo B-1.2 Fotografía del Análisis Granulométrico del primer Subtramo



Anexo B-1.3 Fotografía del Análisis Granulométrico del segundo Subtramo



Anexo B-1.4 Fotografía del Análisis Granulométrico del segundo Subtramo



ANEXO B-2. DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA

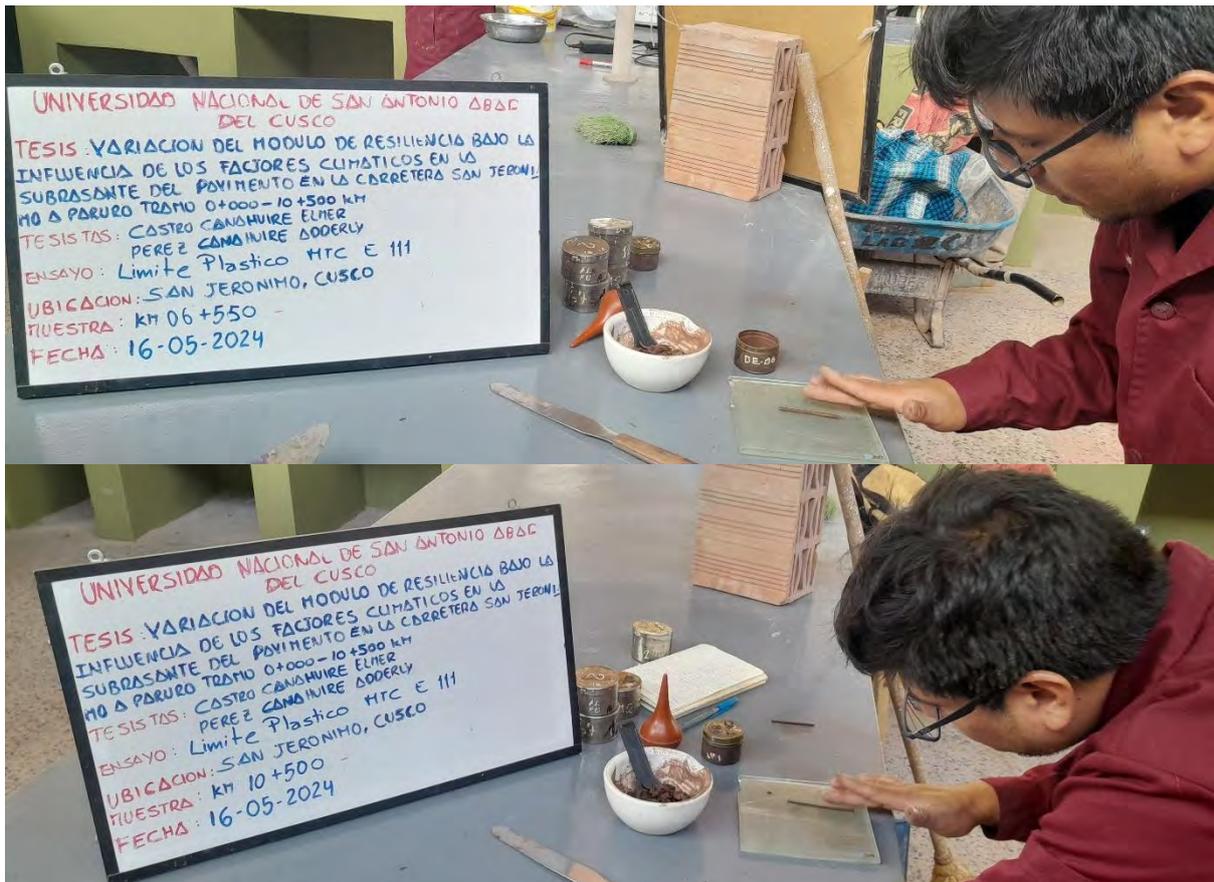
Anexo B-2.1 Fotografías del proceso del ensayo de limite liquido



Anexo B-2.2 Fotografías del Ensayo de limite liquido del primer, segundo y tercer subtramo



Anexo B-2.3 Fotografías del Ensayo de limite de plasticidad del primer, segundo y tercer subtramo



ANEXO B-3. ENSAYO DE COMPACTACIÓN DE SUELOS – PROCTOR MODIFICADO

Anexo B-3.1 Fotografías del Procedimiento del ensayo de Proctor modificado



Anexo B-3.2 Fotografía del Ensayo de Proctor modificado del primer subtramo



Anexo B-3.3 Fotografía del Ensayo de Proctor modificado del segundo subtramo



Anexo B-3.4 Fotografía del Ensayo de Proctor modificado del tercer subtramo



ANEXO B-4. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA MEDIANTE PICNÓMETRO DE AGUA

Anexo B-4.1 Fotografías del Procedimiento del ensayo de Gravedad Especifica



Anexo B-4.2 *Fotografía Ensayo de gravedad específica del primer subtramo*



Anexo B-4.3 *Fotografía del Ensayo de gravedad específica del segundo subtramo*



Anexo B-4.4 *Fotografía Ensayo de gravedad específica del tercer subtramo*



ANEXO B-5. ENSAYO DE CBR DE SUELOS (LABORATORIO)

Anexo B-5.1 Fotografías del Procedimiento del ensayo de CBR en suelos



Anexo B-5.2 Fotografías del Ensayo CBR en el equipo de penetración



Anexo B-5.3 Fotografías Ensayo CBR del primer subtramo



Anexo B-5.4 Fotografías Ensayo CBR del segundo subtramo



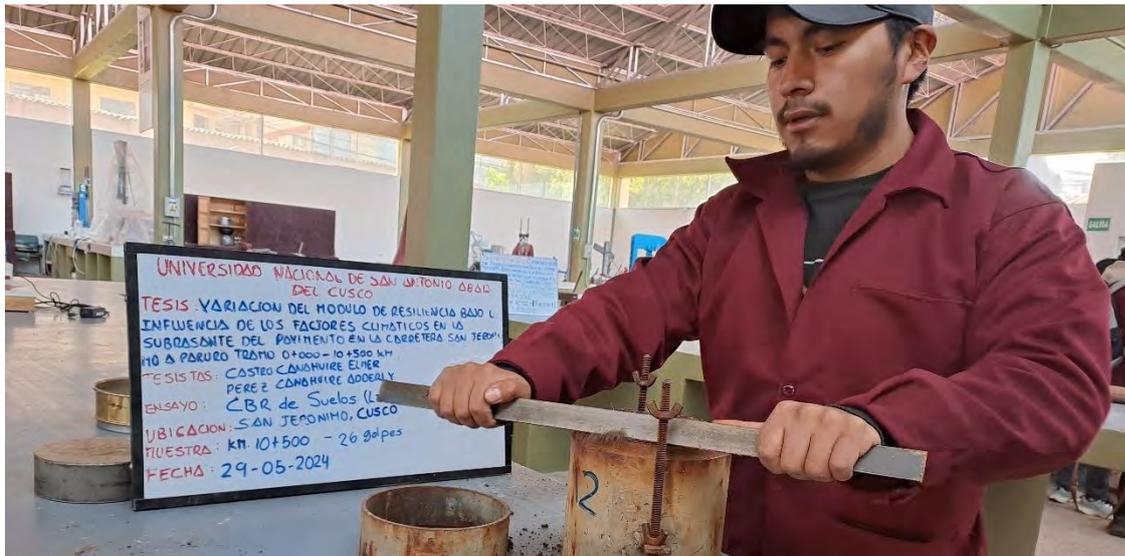
Anexo B-5.5 Fotografías Ensayo CBR del segundo y tercer subtramo



Anexo B-5.6 Fotografías Ensayo CBR del tercer subtramo



Anexo B-5.7 Fotografías Ensayo CBR del segundo y tercer subtramo

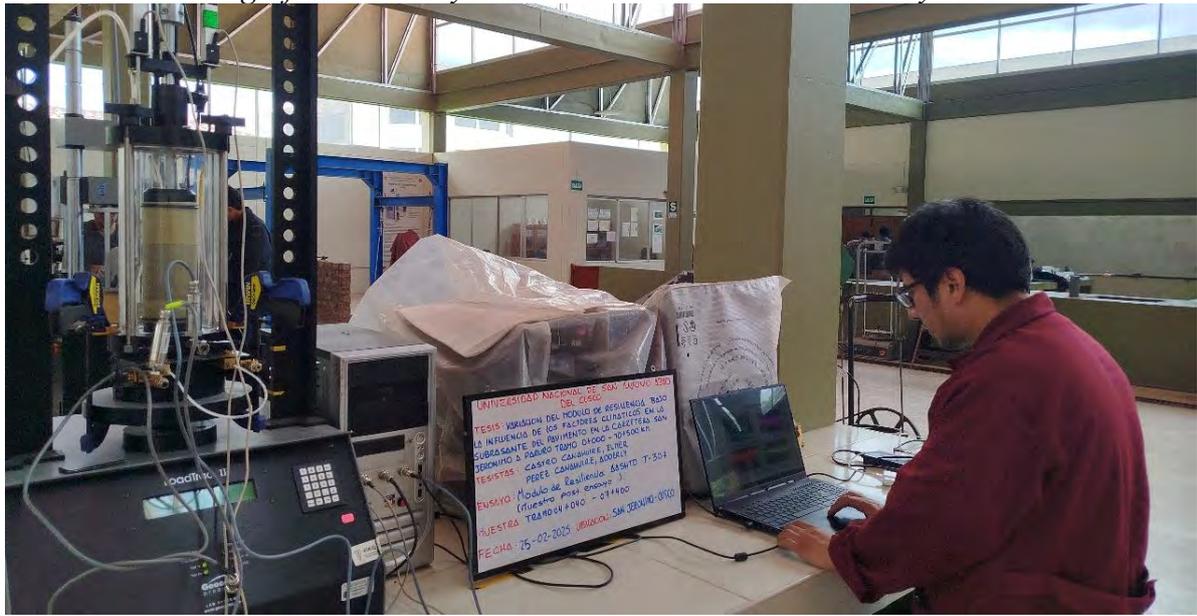


ANEXO B-6. ENSAYO DE MODULO DE RESILIENCIA DE SUBRASANTE (AASHTO T 307)

Anexo B-6.1 Fotografías Ensayo de Modulo de resiliencia para muestras de diámetro: 7 cm



Anexo B-6.2 Fotografías del Ensayo de Modulo de resiliencia control y monitoreo



Anexo B-6.3 Fotografías Ensayo de Modulo de resiliencia en muestras de diámetro: 10 cm



ANEXO C. MANUAL PARA PRUEBA DE MÓDULO RESILIENTE PARA SUELOS DE SUBRASANTE

El procedimiento descrito en este manual se utiliza para muestras de suelos inalterados o especímenes reconstituidos en laboratorio para subrasante sin ningún mejoramiento. Esto puede incluir muestras de 100 mm de diámetro o muestras de 70 mm de diámetro, las alturas están en relación 2:1 al diámetro de la muestra

Montaje de la cámara triaxial

En la siguiente figura se muestra los materiales necesarios para el montaje de la muestra en la celda triaxial:



Primeramente, coloque una piedra porosa y un papel filtro en la parte superior de la base de la muestra de la cámara triaxial como se muestra en la Figura, posteriormente sobre ella con mucho cuidado se colocará la muestra cilíndrica.



La membrana ya puesta en el expansor de membrana, se procederá a cubrir la muestra. Para ello aplique vacío al expansor de membrana, luego coloque con cuidado la membrana sobre la muestra y retire el vacío y el expansor de membrana. (Véase las imágenes como referencia)



Antes de retirar el expansor coloque un filtro de papel sobre la muestra en la parte superior y la piedra porosa, suelte la membrana del expansor y selle la membrana a la placa inferior con dos juntas tóricas (Orring).



Coloque la placa superior sobre la muestra, doble la membrana y s ello a la placa superior con dos juntas t oricas (Orring), utilice la figura como referencia.



Coloque la cámara en la placa base y la placa de cubierta en la cámara. Inserte el pistón de carga y obtenga una conexión firme con la celda de carga y la muestra.



Asegura la celda triaxial fuertemente con las perillas de poste, posterior a ello coloque los LVDT's sobre la celda triaxial, tome como referencia la figura.



Imagen 7

Deslice el aparato de montaje a su posición debajo del dispositivo de carga axial.



Imagen 8

Para iniciar el proceso de unión con el dispositivo de carga, en un inicio conectaremos la tarjeta de control a equipo portátil (laptop), para ello conectar el cable USB, una vez realizado este paso encenderemos la unidad de control RM.

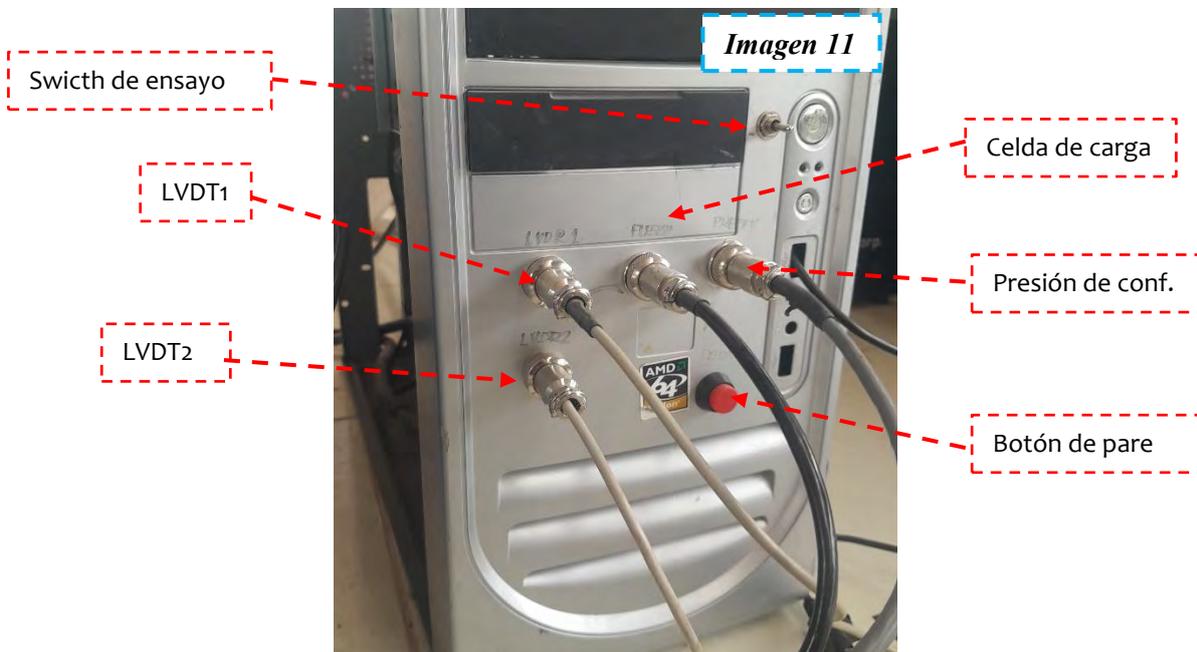


Imagen 9

Acoplar el dispositivo de carga al vástago del pistón de la cámara triaxial, el proceso de control del servo motor se hace por medio del ejecutable **Main_Civil 19v**

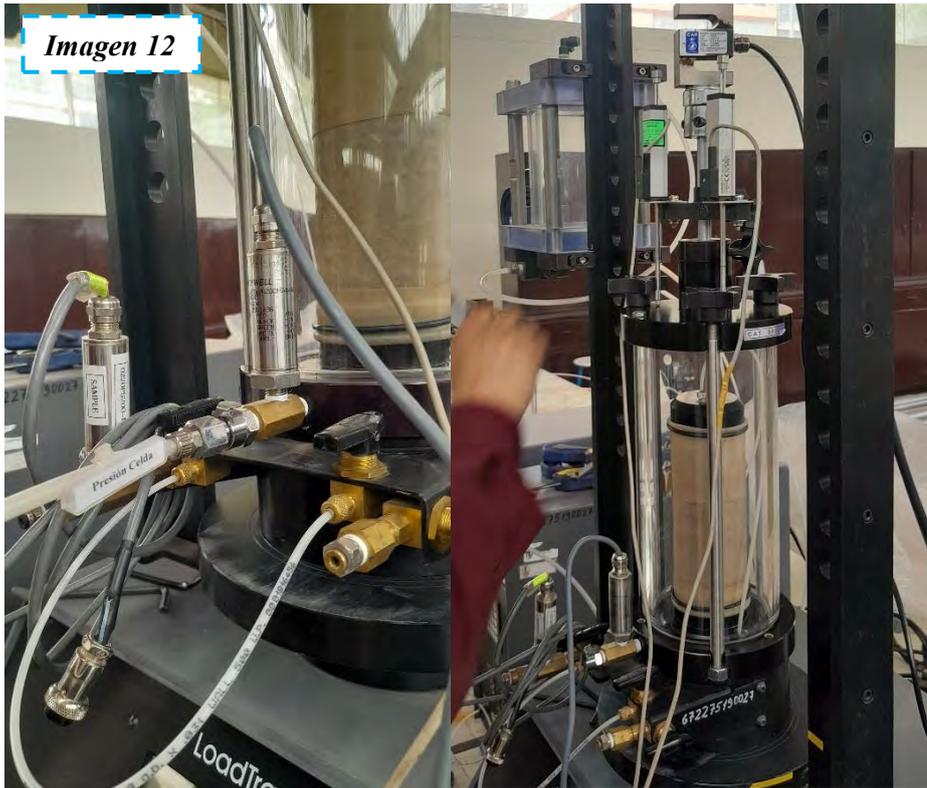


Todos los sensores serán conectados a la unidad de control RM

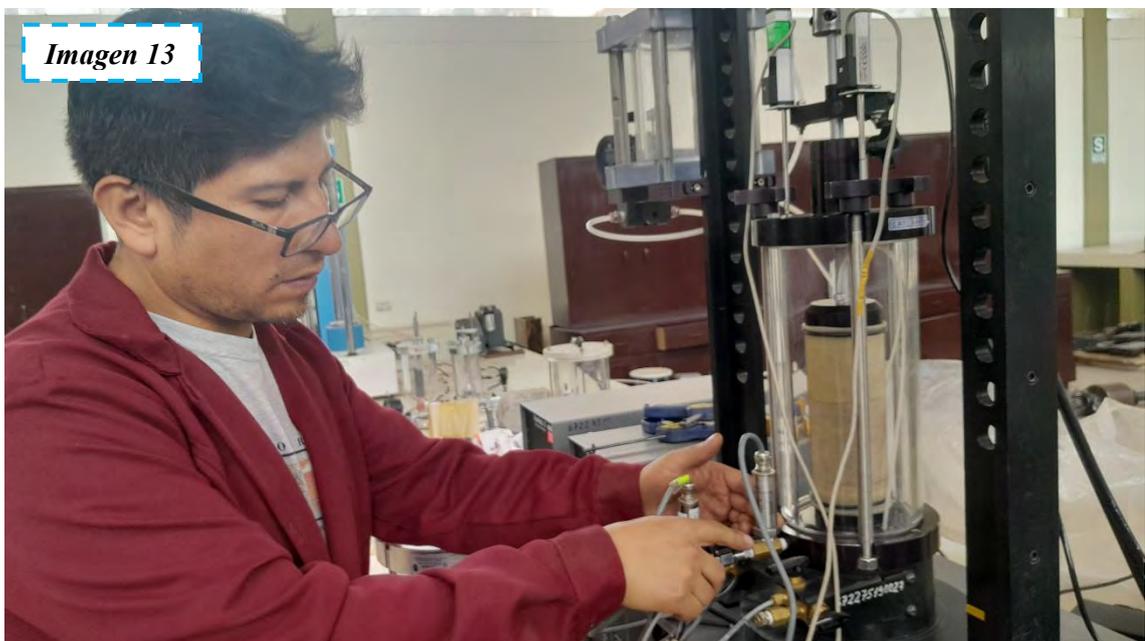


Realice la prueba del módulo de resiliencia:

Se requieren los siguientes pasos para realizar la prueba del módulo de resiliencia en una muestra de subrasante que se instaló en la cámara triaxial y se colocó debajo del marco de carga. Abra todas las válvulas de drenaje que conducen a la muestra a presión atmosférica.



Conecte la línea de suministro de presión de aire a la cámara triaxial



Aplice la presión de confinamiento de pre acondicionamiento especificada de 41,4 kPa a la muestra de prueba. Coloque ganchos de presión para fijar la cámara triaxial con la base sólida.

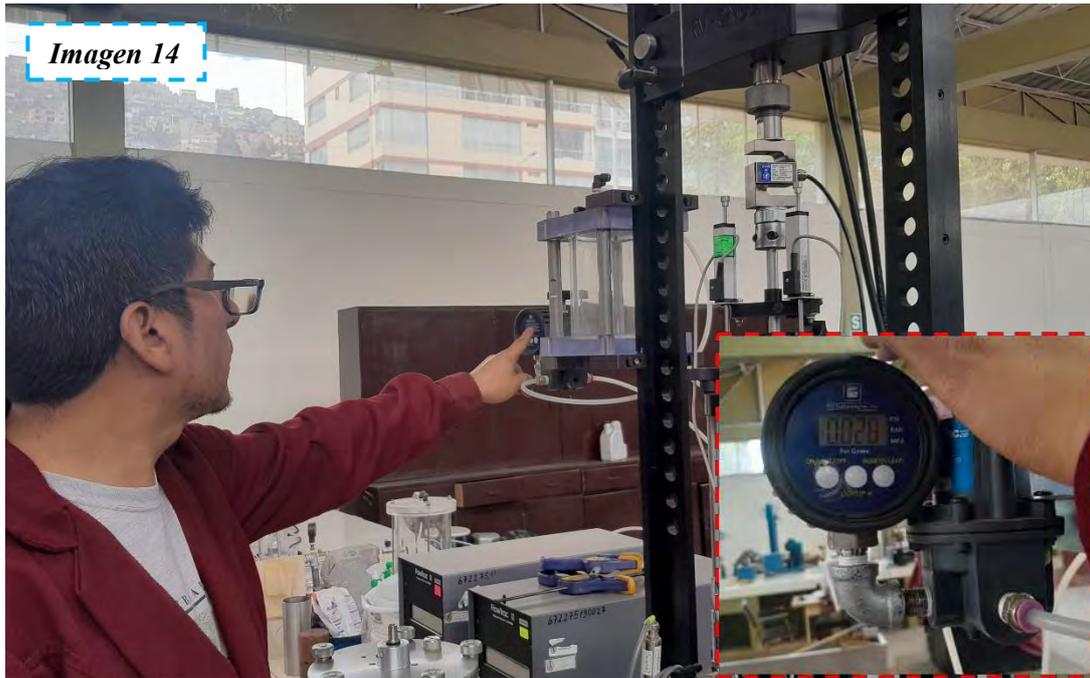


Imagen 14

Nivele y asegure los LVDT's antes de iniciar la prueba, verifique que todos los dispositivos, sensores y accesorios estén correctamente instalados



Imagen 15

Como paso siguiente la unidad de control fijar el switch para encontrarse en posición neutra para iniciar el ensayo de la subrasante (véase la siguiente figura).



Ejecute el software en la computadora, configure los valores correspondientes para subrasante e inicie la prueba.



En el ejecutable le introduciremos, los parámetros necesarios para el ensayo, como son el diámetro de la muestra, la cantidad de ciclos de acondicionamiento.



Con la prueba iniciada verifique en el software que los sensores estén funcionando correctamente



Imagen 19



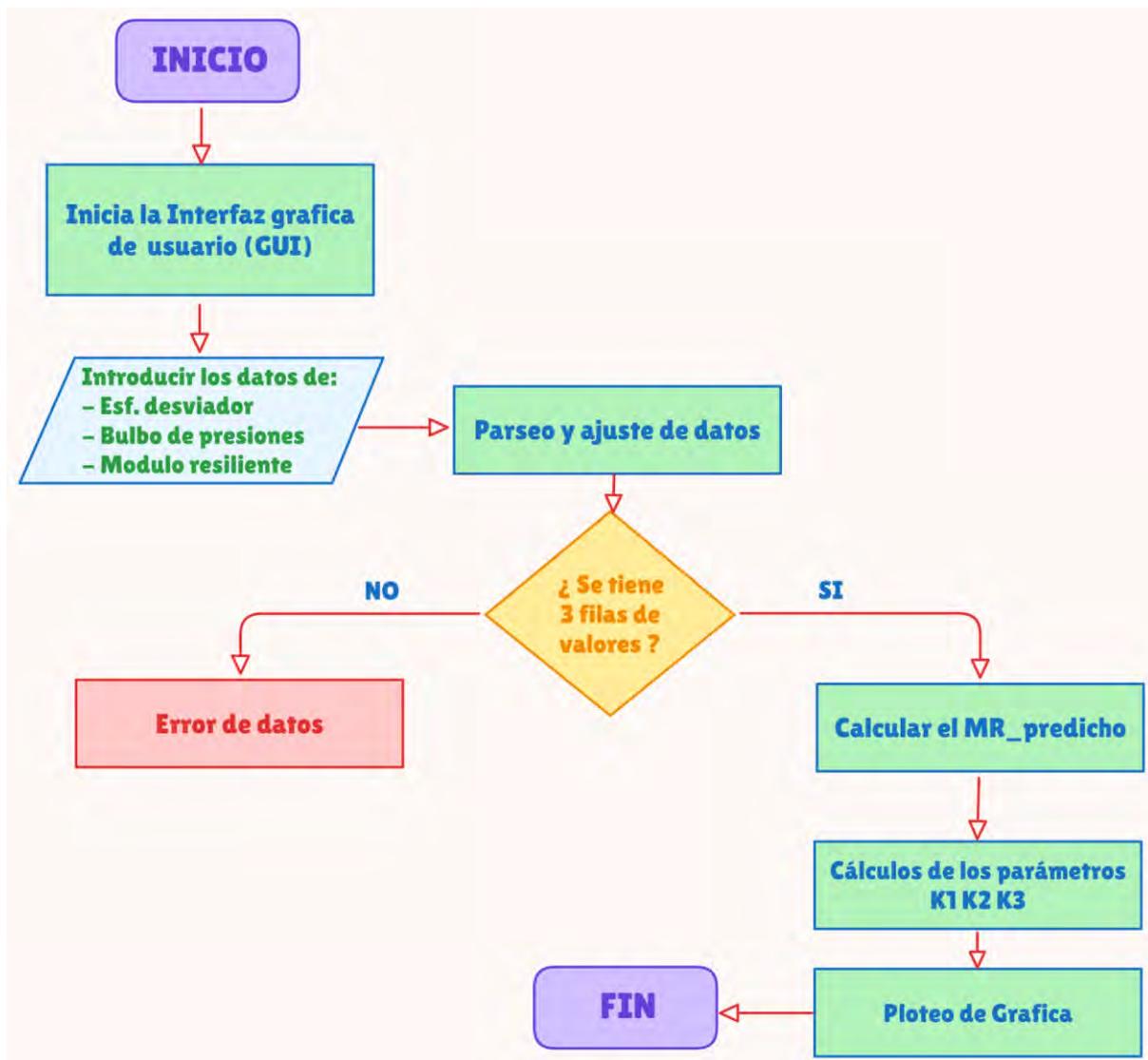
Al finalizar la prueba del módulo resiliente, reduzca la presión de confinamiento a cero y retire la muestra de la cámara triaxial. Deje el equipo listo para un próximo ensayo.



ANEXO D. CODIGOS PYTHON

Código de programación Python para el cálculo de los modelos de correlación basado en el folleto para la determinación del módulo resiliente de diseño de la subrasante, AASTHO 93 (1997)

Anexo D-1.1 Diagrama de flujo del código para el calculo del modelo de correlación



Anexo D-1.2 Diagrama de algoritmo del código para el cálculo del modelo de correlación

```
Inicio
|
1.-- Mostrar ventana Tkinter con campo de texto y botón
|
2.-- Esperar entrada del usuario (datos en 3 columnas: x, y, E)
|
3.-- Cuando se presiona el botón:
|
3.1-- Leer texto desde la interfaz
|
3.2-- Dividir texto en líneas → filas
|
3.3-- Para cada fila:
|
3.3.1-- Separar en 3 valores → x, y, E
3.3.2-- Convertir a número y guardar en listas
|
3.4-- Verificar que todas las filas tengan 3 columnas
|
3.4.1-- Si no: mostrar mensaje de error
3.4.2-- Si sí:
|
|-- Convertir listas a arrays numpy
|-- Ajustar modelo exponencial:
    E = k1 * Patm * (x/Patm)^k2 * (y/Patm)^k3
|
|-- Calcular E_predicho con el modelo ajustado
|-- Calcular el coeficiente de correlación r
|-- Mostrar en pantalla los parámetros: k1, k2, k3 y r
|-- Crear gráfico:
    • Eje X: E real (log base 10)
    • Eje Y: E predicho (log base 10)
|
|-- Mostrar gráfico con matplotlib
|
Fin
```

Anexo D-1.3 Código en el lenguaje de python del modelo de correlación

```
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit
from scipy.stats import pearsonr
import matplotlib.pyplot as plt
```

```

# Modelo
def modelo(data, k1, k2, k3):
    x, y = data
    Patm = 68.4
    return k1 * Patm * ((x / Patm) ** k2) * ((y / Patm) ** k3)

# Procesar datos pegados desde Excel
def procesar_datos():
    entrada = texto_entrada.get("1.0", tk.END).strip()

    try:
        # Parsear datos columna por columna
        filas = entrada.split('\n')
        x_data, y_data, E_data = [], [], []
        for fila in filas:
            partes = fila.strip().split()
            if len(partes) != 3:
                raise ValueError("Cada fila debe tener exactamente 3 valores (x, y, E)")
            x, y, E = map(float, partes)
            x_data.append(x)
            y_data.append(y)
            E_data.append(E)

        x_data = np.array(x_data)
        y_data = np.array(y_data)
        E_data = np.array(E_data)

        # Ajustar modelo
        popt, _ = curve_fit(modelo, (x_data, y_data), E_data)
        k1, k2, k3 = popt

        # Predicción y correlación
        E_pred = modelo((x_data, y_data), *popt)
        r_value, _ = pearsonr(E_data, E_pred)

        resultado = f"Parámetros obtenidos:\n"
        resultado += f"k1 = {k1:.4f}\nk2 = {k2:.4f}\nk3 = {k3:.4f}\n"
        resultado += f"Coeficiente de correlación r = {r_value:.4f}"
        etiqueta_resultado.config(text=resultado)

        # Gráfico log-log
        plt.figure(figsize=(8,5))
        plt.scatter(x_data, E_data, color='red', marker = "^",label='Ensayo MR')
        plt.scatter(x_data, E_pred, color='blue', label='Modelo de correlación')
        #plt.plot(E_data, E_data, 'b--', label='Ideal (E = E_pred)')
        plt.xlabel('Suma de esfuerzos principales (kPa)')
        plt.ylabel('Modulo resiliente (kPa)')
        plt.xscale('log')
        plt.yscale('log')
        plt.title('Ajuste del Modelo Exponencial (Escala Log-Log)')
        plt.legend()
        plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
        plt.show()

    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Error de procesamiento", f"Ocurrió un error:\n{str(e)}")

```

```
# Interfaz gráfica
ventana = tk.Tk()
ventana.title("Regresión Exponencial - Módulo de Resiliencia")
ventana.geometry("750x500")

instruccion = tk.Label(ventana, text="Pega los datos (x y E) separados por
espacio/tabulador en cada fila:")
instruccion.pack(pady=10)

texto_entrada = tk.Text(ventana, height=15, width=90)
texto_entrada.pack()

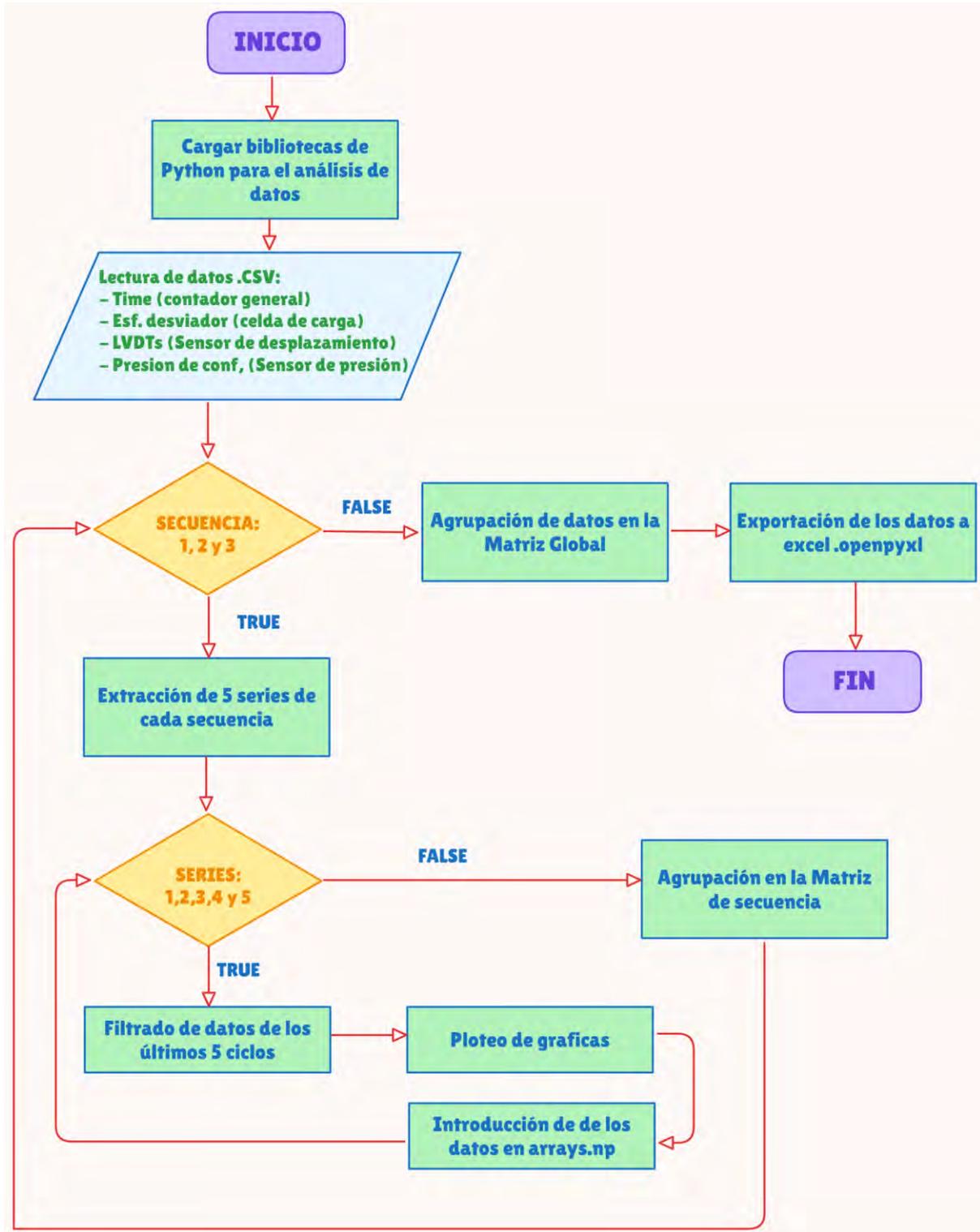
boton_procesar = tk.Button(ventana, text="Ejecutar regresión",
command=procesar_datos)
boton_procesar.pack(pady=10)

etiqueta_resultado = tk.Label(ventana, text="", justify="left", font=("Courier",
12))
etiqueta_resultado.pack(pady=10)

ventana.mainloop()
```

Código de programación Python para el procesamiento de datos obtenidos del ensayo de módulo de resiliente de subrasantes AASTHO T 307-99 (2012)

Anexo D-2.1 Diagrama de flujo del código para el cálculo del procesamiento de datos



Anexo D-2.2 Diagrama de algoritmo del código para el cálculo del procesamiento de datos

```
Inicio
|
| 1.-- Cargar las bibliotecas de Python necesarias
| |
| | 1.1-- Crear las variables necesarias
|
| 2.-- Importar los datos .CSV (Datos extraídos de los resultados de
| | laboratorio)
| |
| | 2.1-- Separarlos en rangos diferenciados por presión de
| | | confinamiento
| | 2.2-- lectura de los archivos
|
| 3.-- Creación de tres secciones diferenciadas
| |
| | 3.1 Para cada secuencia (1,2,3):
| | | True:
| | | | 3.1.1-- Creación de las 5 series de cada secuencia
| | | | 3.1.2-- Para cada serie (1,2,3,4,5):
| | | | | True:
| | | | | | 3.1.2.1 Establecimientos los rangos de arrays.np
| | | | | | 3.1.2.2 Filtrado de los últimos 5 ciclos de cada
| | | | | | | serie
| | | | | | 3.1.2.3 Grafica de los 5 picos de los datos Esf.
| | | | | | | desviador, LVDT, P.confing
| | | | | | 3.1.2.4 Selección de los datos del grafico
| | | | | | 3.1.2.5 Introducción de los datos a matrices
| | | | | | 3.1.2.6 Regresar al punto 3.1.2
| | | | | False:
| | | | | | Salir del bucle
| | | | 3.1.3 Agrupación de datos en la matriz general
| | | | 3.1.4 Volver al punto 3.1
| | | | False:
| | | | | Salir del bucle
|
| 4.-- Agrupación de los datos en la matriz global
|
| 5.-- Exportación de los datos a Excel
|
Fin
```

Anexo D-2.3 Código en el lenguaje de python del procesamiento de datos

```
import plotly.express as px
import numpy as np
import pandas as pd
from openpyxl import load_workbook
A = 'HOJA RM.xlsx'
```

```

wb = load_workbook(A)
MatrizG = np.zeros((4*16,6))

df = pd.read_csv('Resultados\RM250402(1).csv')
subset4 = df1.iloc[58800:59600]
fig = px.line(subset4, x='Time.F', y='Force')

fig.update_layout(
    xaxis=dict(
        ticks='outside',
        ticklen=10,
        ticklabelshift=25,
        ticklabelstandoff=15
    )
)
fig.update_layout(
    title='Gráfica Esfuerzo Principal Serie: 00',
    #xaxis=dict(title='Puntos', range=[0, 6]), # Rango de 0 a 6 para el eje X
    yaxis=dict(title='Esfuerzo (kPa)'),
    template='plotly'
)
fig.show()

fig = px.line(subset4, x='Time.F', y='LVDT')

fig.update_layout(
    xaxis=dict(
        ticks='outside',
        ticklen=10,
        ticklabelshift=25,
        ticklabelstandoff=15
    )
)
# Configurar el rango de los ejes
fig.update_layout(
    title='Gráfica Desplazamiento Serie: 00',
    #xaxis=dict(title='Puntos', range=[0, 6]), # Rango de 0 a 6 para el eje X
    yaxis=dict(title='Desplazamiento (mm)'),
    template='plotly'
)
fig.show()
# EXTRACCION DE DATOS PARA EXCEL
LVDT_cero = # mm : milimetros
LVDTini = # mm : milimetros
# Ciclo          96      97      98      99      100
DAT0 = np.array([[ ], # LVDT_MAX (mm)
                 [ ], # LVDT_inicial (mm)
                 [ ], # Esf.desv. max (kPa)
                 [ ]]) # Esf.desv. contact (kPa)

# UNIMOS TODOS
Grupo = 3 #[1,2,3]
MatrizTT = np.zeros((4*16,6))
Matriz = np.zeros((4,6))
Matriz5 = np.zeros((4*5,6))
DATTT = np.array([DAT0,DAT1,DAT2,DAT3,DAT4,DAT5])
DATT = np.array([DAT1,DAT2,DAT3,DAT4,DAT5])
if Grupo == 1:
    for i in range(6):
        for j in range(4):

```

```

        Matriz[j,:] = DATTT[i,j,:]
        MatrizTT[i*4:4*(i+1),:] = Matriz
        Matriz = np.zeros((4,6))
elif Grupo == 2:
    for i in range(5):
        for j in range(4):
            Matriz[j,:] = DATT[i,j,:]
            MatrizTT[(i+6)*4:(i+7)*4,:] = Matriz
            Matriz = np.zeros((4,6))
elif Grupo == 3:
    for i in range(5):
        for j in range(4):
            Matriz[j,:] = DATT[i,j,:]
            MatrizTT[(i+11)*4:(i+12)*4,:] = Matriz
            Matriz = np.zeros((4,6))
MatrizG = MatrizG + MatrizTT
# EXPORTADO A EXCEL
Columnas = np.array([[ 'B', 'G', 'L', 'Q', 'V'],      #LVDTmax
                    [ 'C', 'H', 'M', 'R', 'W'],      #LVDTi
                    [ 'D', 'I', 'N', 'S', 'X'],      #σmax
                    [ 'E', 'J', 'O', 'T', 'Y']])     #σcont
LVDT_i = [7,17,27,37]
Filas =[10,20,30,40]
ws = wb['Proceso de pre-calculo']
#INTRODUCCIÓN DE LOS LVDTs_i
for i in range(4):
    if i == 0:
        C = 'C7'
        LVDTi = MatrizG[1,0]
        ws[C] = LVDTi
    else:
        for j in range(5):
            Lt = Columnas[1,j] + str(LVDT_i[i])
            LVDTi = MatrizG[(4*i-3)*5+j*4,0]
            ws[Lt] = LVDTi
# INTRODUCCION DE LAS DEMAS FILAS
for i in range(4):
    if i == 0:
        for j in range(4):
            for k in range(5):
                Ltt = Columnas[j,i] + str(Filas[i]+k)
                Vlor = MatrizG[j,k+1]
                ws[Ltt] = Vlor
    else:
        for j in range(5):
            for k in range(4):
                for n in range(5):
                    Ltt = Columnas[k,j] + str(Filas[i]+n)
                    Vlor = MatrizG[4*(i*5-4)+j*4+k,n+1]
                    ws[Ltt] = Vlor

#Datos LVDT
ws['E3'] = LVDT_cero
ws['E4'] = LVDTini

wb.save(A)

```

ANEXO E. PERFILES ESTRATIGRAFICOS

Anexo E-1. Calicata 01: km 01+500

De la exploración, la primera calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica: Perfil estratigráfico – km 01+500

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 01
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Collparo Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
						Progresiva: km 01 + 500
PROF. m	Estrato	Símbolo Grafico	Clasificación SUCS	Descripción del Suelo	Nf	Observaciones
0.00	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON RAICES, PASTOS, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.10						
0.20						
0.30						
0.40						
0.50	2		CL	SUELO NATURAL ESTRATO DE ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ OSCURO, CONSISTENCIA FIRME		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00				FONDO EXPLORADO 1,50 METROS		
1.10						
1.20						
1.30						
1.40						
1.50						
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-2. Calicata 02: km 02+200

De la exploración, la segunda calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 02+200

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 02
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Collparó Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
<i>Progresiva: km 02 + 200</i>						
PROF. m	Estrato	Símbolo Grafico	Clasificación SUCS	Descripción del Suelo	Nf	Observaciones
0.00	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON RAICES, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.10						
0.20						
0.30						
0.40						
0.50	2		CL	SUELO NATURAL ESTRATO DE ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ CLARO, CONSISTENCIA FIRME		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20						
1.30						
1.40						
1.50				FONDO EXPLORADO 1,50 METROS		
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-3. Calicata 03: km 03+060

De la exploración, la tercera calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 03+060

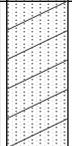
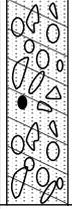
PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 03
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Pallpancay Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
<i>Progresiva: km 03 + 060</i>						
PROF. m	Estrato	Símbolo Gráfico	Clasificación SUCS	Descripción del Suelo	Nf	Observaciones
0.00	1		N/A	MATERIAL DE RELLENO PARA AFIRMADO, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.10						
0.20						
0.30						
0.40	2		CL	SUELO NATURAL ESTRATO DE ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD, COLOR CAFÉ OSCURO, CONSISTENCIA FIRME		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.50						
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10				FONDO EXPLORADO 1,50 METROS		
1.20						
1.30						
1.40						
1.50						
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-4. Calicata 04: km 4+040

De la exploración, la cuarta calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 04+040

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 04
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Pallpancay Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
<i>Progresiva: km 04 + 040</i>						
PROF. m	Estrato	Símbolo Grafico	Clasificación SUCS	Descripción del Suelo	Nf	Observaciones
0.00	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON RAICES, PASTOS, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.10						
0.20						
0.30	2		SC	SUELO NATURAL ESTRATO DE ARENA ARCILLOSA, COLOR CAFÉ, CONSISTENCIA FIRME		-
0.40						
0.50						
0.60						
0.70	3		SC - SM	ESTRATO DE ARENA LIMO ARCILLOSA CON GRAVA, COLOR CAFÉ CLARO, CONSISTENCIA FRAGIL		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20	FONDO EXPLORADO 1,50 METROS					
1.30						
1.40						
1.50						
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-5. Calicata 05: km 05+360

De la exploración, la quinta calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 05+360

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 05
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Suncco Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
<i>Progresiva: km 05 + 360</i>						
PROF. m	Estrato	Simbolo Grafico	Clasificacion SUCS	Descripción del Suelo	Nº	Observaciones
0.00						
0.10	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON RAICES, PASTOS, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.20				SUELO NATURAL		
0.30						
0.40	2		SC	STRATO DE ARENA ARCILLOSA, COLOR CAFÉ, CONSISTENCIA FIRME		-
0.50						
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00	3		SC - SM	ESTRATO DE ARENA LIMO ARCILLOSA CON GRAVA, COLOR CAFÉ CLARO, CONSISTENCIA FRAGIL		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
1.10						
1.20						
1.30						
1.40						
1.50						
1.60				FONDO EXPLORADO 1,50 METROS		
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-6. Calicata 06: km 06+550

De la exploración, la sexta calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 06+550

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 06
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Suncco Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
<i>Progresiva: km 06 + 550</i>						
PROF. m	Estrato	Simbolo Grafico	Clasificacion SUCS	Descripción del Suelo	Nº	Observaciones
0.00						
0.10	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON RAICES, PASTOS, COLOR CAFÉ		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.20						
0.30	2		SC	SUELO NATURAL		-
0.40				TRATO DE ARENA ARCILLOSA, COLOR CAFÉ, CONSISTENCIA FIRME		
0.50						
0.60	3		SC - SM	ESTRATO DE ARENA LIMO ARCILLOSA CON GRAVA, COLOR CAFÉ OSCURO, CONSISTENCIA FRAGIL		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20						
1.30						
1.40						
1.50				FONDO EXPLORADO 1,50 METROS		
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-7. Calicata 07: km 07+400

De la exploración, la séptima calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 07+400

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 07
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Suncco Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
<i>Progresiva: km 07 + 400</i>						
PROF. m	Estrato	Simbolo Grafico	Clasificacion SUCS	Descripción del Suelo	Nº	Observaciones
0.00						
0.10	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON PASTOS, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.20						
0.30	2		SC	STRATO DE ARENA ARCILLOSA, COLOR CAFÉ, CONSISTENCIA FIRME		-
0.40						
0.50	3		SC - SM	ESTRATO DE ARENA LIMO ARCILLOSA CON GRAVA, COLOR CAFÉ OSCURO, CONSISTENCIA FRAGIL		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20				FONDO EXPLORADO 1,50 METROS		
1.30						
1.40						
1.50						
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-8. Calicata 08: km 08+300

De la exploración, la octava calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 08+300

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 08
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Ushpabamba Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
<i>Progresiva: km 08 + 300</i>						
PROF. m	Estrato	Simbolo Grafico	Clasificacion SUCS	Descripción del Suelo	Nf	Observaciones
0.00	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON PASTOS, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.10				SUELO NATURAL		
0.20	2		GC	ESTRATO DE GRAVA ARCILLOSA CON ARENA BIEN GRADADA, COLOR CAFÉ CLARO		-
0.30						
0.40						
0.50						
0.60	3		GM	ESTRATO DE GRAVA LIMOSA CON ARENA, CON PARTILCULAS REDONDEADAS		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20	FONDO EXPLORADO 1,50 METROS					
1.30						
1.40						
1.50						
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-9. Calicata 09: km 09+630

De la exploración, la novena calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 09+630

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 09
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Ushpabamba Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
<i>Progresiva: km 09 + 630</i>						
PROF. m	Estrato	Simbolo Grafico	Clasificacion SUCS	Descripción del Suelo	Nf	Observaciones
0.00	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON PASTOS, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.10				SUELO NATURAL		
0.20	2		GC	ESTRATO DE GRAVA ARCILLOSA CON ARENA BIEN GRADADA, COLOR CAFÉ OSCURO		-
0.30						
0.40						
0.50	3		GM	ESTRATO DE GRAVA LIMOSA CON ARENA, CON PARTILCULAS ANGULOSAS, CONTIENE FRAGMENTOS DE ROCA		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20	FONDO EXPLORADO 1,50 METROS					
1.30						
1.40						
1.50						
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia

Anexo E-10. Calicata 10: km 10+500

De la exploración, la décima calicata presenta el siguiente perfil estratigráfico con lo cual se colecto la muestra para el ensayo.

Gráfica Perfil estratigráfico – km 10+500

PERFIL ESTRATIGRAFICO						PERFORACION C - 10
TESIS:	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA BAJO LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS EN LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO A PARURO TRAMO 0+000 – 10+500 KM					
LOCALIZACIÓN:	Sector: Ushpabamba Distrito: San Jeronimo Provincia: Cusco Departamento: Cusco					
						Progresiva: km 10 + 500
PROF. m	Estrato	Simbolo Grafico	Clasificacion SUCS	Descripción del Suelo	Nf	Observaciones
0.00	1		N/A	TIERRA ORGANICA CON PASTOS, COLOR CAFÉ CLARO		DESCRIPCIÓN VISUAL
0.10						
0.20	2		GC	SUELO NATURAL ESTRATO DE GRAVA ARCILLOSA CON ARENA BIEN GRADADA		-
0.30						
0.40	3		GM	ESTRATO DE GRAVA LIMOSA CON ARENA, CON PARTILCULAS ANGULOSAS, CONTIENE FRAGMENTOS DE ROCA		ESTRATO DE COLECTA DE MUESTRA PARA ENSAYO
0.50						
0.60						
0.70						
0.80						
0.90						
1.00						
1.10						
1.20						
1.30						
1.40						
1.50				FONDO EXPLORADO 1,50 METROS		
1.60						
1.70						
1.80						
1.90						
2.00						

Nota. Se extrajo la muestra de suelo a una profundidad de 1.50 m. Fuente: Elaboración propia