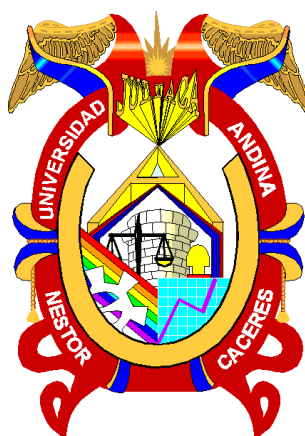




UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
MENCIÓN: GEOTECNIA Y TRANSPORTES



**INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN
EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL
PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825
METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR**

TESIS PRESENTADA POR:
WILFREDO DAVID SUPO PACORI


**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL**


JULIACA – PERÚ

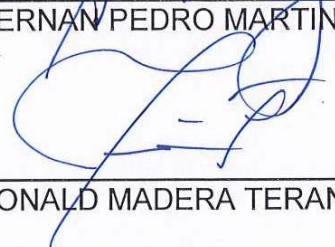
2024




UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
MENCIÓN: GEOTECNIA Y TRANSPORTES
INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN
EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL
PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825
METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR
TESIS PRESENTADA POR:
WILFREDO DAVID SUPO PACORI
PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL
MENCIÓN: GEOTECNIA Y TRANSPORTES
APROBADA POR:

PRESIDENTE DEL JURADO : 
Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA

MIEMBRO DEL JURADO : 
Dr. HERNAN PEDRO MARTINEZ RAMOS

MIEMBRO DEL JURADO : 
Dr. RONALD MADERA TERAN

ASESOR DE TESIS : 
Mgtr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN : TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN – P50



UNIVERSIDAD ANDINA

"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"

ESCUELA DE POSGRADO



RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 044-2024-D-EPG-UANCV/J

Juliaca, 01 de abril del 2024

VISTOS:

El expediente N° 2023-013128, presentado por el (la) Bachiller **SUPO PACORI WILFREDO DAVID**, con número de DNI. **02428673**, asignado (a) con código de matrícula **29129901**, de la **Maestría en INGENIERÍA CIVIL, Mención: GEOTECNIA Y TRANSPORTES**, de la Escuela de Posgrado de la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" de la Sede Central Juliaca.

CONSIDERANDO:

Que, el (a) Bach. **SUPO PACORI WILFREDO DAVID**, con número de DNI. **02428673**, asignado (a) con código de matrícula **29129901**, de la **Maestría en INGENIERÍA CIVIL, Mención: GEOTECNIA Y TRANSPORTES**, ha solicitado fecha, hora y modalidad de sustentación de la Tesis titulada: **INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR** La misma que pertenece a la Línea de Investigación: **TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN - P50** y;

Que, el (a) referido (a) Dictamen de Tesis aprobado por los jurados el 18 de diciembre del 2023. Establece la fecha de sustentación; habiendo para el efecto cumplido los requisitos establecidos en el reglamento para la Obtención del Grado Académico de Magíster/Maestro y Doctor de la Escuela de Posgrado de la UANCV;

Que, en el Artículo 66 del Reglamento General de la Escuela de Posgrado de la UANCV, establece que la sustentación de Tesis de Posgrado es un trabajo de investigación original y crítico, de actualidad y de alto valor científico;

En uso de las atribuciones conferidas a la Dirección en el inciso "J" del artículo 17° del Reglamento General de la Escuela de Posgrado, y el Art. 76 del Estatuto Universitario;

SE RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO. - DECLARAR EXPEDITO para la Sustentación de la Tesis titulada: **INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR** Elaborado por el (la) Bachiller **SUPO PACORI WILFREDO DAVID**. Integrado por los siguientes docentes:

- Presidente del Jurado : **Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA**
- Miembro del Jurado : **Mgtr. HERNAN PEDRO MARTINEZ RAMOS**
- Miembro del Jurado : **Dr. RONALD MADERA TERAN**
- Asesor de Tesis : **Mgtr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA**

ARTÍCULO SEGUNDO. - El proceso de la Sustentación de la Tesis en mención, se llevará a cabo:

- Fecha : **Miercoles, 03 de abril del 2024**
- Hora : **11:00 a.m.**
- Lugar : **Aula N° 310 EPG - UANCV - JULIACA**

A cuya finalización el Jurado registrará los resultados en el Libro de Actas de Sustentación de Tesis de Maestría con el grado **MAGISTER** de los estudiantes que ingresaron anterior a la aprobación de la ley Universitaria N° **30220**.

ARTÍCULO TERCERO. - Elévese la presente Resolución al Rectorado, Vicerrectorado Académico, Vicerrectorado Administrativo y Oficina del Órgano de Inspección y Control para conocimiento.

Regístrese, comuníquese y Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
ESCUELA DE POSGRADO


Dr. Leopoldo Wenebaldo Cori Corti
DIRECTOR (J)



Cc./Archiv.EPG (01)
Interesado (01)
Cargo (01)
Jurados (03)
Asesor (01)
Expediente (01)
LWCC/MSV



RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 1237-2023-USA-EPG-UANCV/J

Juliaca, 07 de Diciembre del 2023

VISTOS:

El expediente N° 012282, presentado por el (a) Bach. **WILFREDO DAVID SUPO PACORI**, con número de DNI. **02428673**, asignado (a) con código de matrícula **29129901**, de la Maestría en **INGENIERIA CIVIL**, Mención: **GEOTECNIA Y TRANSPORTES**, Línea de investigación **TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION – P50** de la Escuela de Posgrado de la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" de la Sede Central Juliaca.

CONSIDERANDO:

Que, con exp. 012282 el (a) Bach. **WILFREDO DAVID SUPO PACORI**, solicita desglose del título por abreviatura en el proyecto titulada: **INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR** aprobada con **RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 469-2019 USA-EPG-UANCV/J**.

Que, con registro N° 1437 de fecha 30 de mayo del 2019 el comité de investigación del proyecto de tesis titulado: **INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR** cumple con los lineamientos y contenidos establecidos en reglamento de grados de investigación conducentes Grado Académico de Magister/Maestro y Doctor de la Escuela de Posgrado de la UANCV;

En uso de las atribuciones conferidas a la Dirección en el inciso "J" del artículo 17° del Reglamento General de la Escuela de Posgrado, y el Art. 76 del Estatuto Universitario;

SE RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO. – RECTIFICAR LA RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 469-2019-USA-EPG-UANCV/J de fecha 01 de Junio del 2019, únicamente en lo que corresponde desglosar las abreviaturas en el título del proyecto dice: MSNM debe decir: Metros Sobre el Nivel del Mar, asimismo, suprimir las palabras del título del proyecto (Zona Sur de Juliaca) en la resolución antes mencionado.

ARTÍCULO SEGUNDO. – CONSERVAR a los miembros del jurado y asesor que aprobaron el proyecto de tesis titulado: **INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR** Presentado por el (la) Bach. **WILFREDO DAVID SUPO PACORI**

Presidente	:	Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA
Primer Miembro	:	Mgtr. HERNAN PEDRO MARTINEZ RAMOS
Segundo Miembro	:	Dr. RONALD MADERA TERAN
Asesor	:	Mgtr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA

ARTÍCULO TERCERO. – AUTORIZAR el desarrollo de la tesis, de acuerdo al reglamento de investigación conducente al grado académico de **MAGISTER** de la escuela de posgrado de la UANCV.

ARTICULO CUARTO.-Elévese la presente Resolución al Rectorado, Vicerrectorado Académico, Vicerrectorado Administrativo y Oficina del Órgano de Inspección y Control para conocimiento.

Regístrese, comuníquese y Archívese,



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
ESCUELA DE POSGRADO
Dr. **RODOLFO VILLALBA SUPO PACORI**
DIRECTOR (e)

Cc./Archiv. EPG (01)
Interesado (01)
Cargo (01)
Jurados (03)
Asesor (01)
Expediente (01)
MAPCC/meyn



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ" ESCUELA DE POSGRADO



RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 469 - 2019-USA-EPG/UANCV

Juliaca, 01 de Junio del 2019.

VISTOS:

El Registro N° 1437 del Libro de Registro de Proyectos de Investigación de Tesis del MAESTRIA en INGENIERÍA CIVIL mención: GEOTECNIA Y TRANSPORTES, del Jurado revisor del Proyecto de Tesis: INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 MSNM – ZONA SUR DE JULIACA. Línea de Investigación; TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN. Presentado por el (a) Bach: SUPO PACORI WILFREDO DAVID, con número de DNI 02428673 y con Código de matrícula N° 29129901, para optar el Grado Académico de MAGISTER en INGENIERÍA CIVIL mención: GEOTECNIA Y TRANSPORTES, de la Escuela de Posgrado de la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez de Juliaca;

CONSIDERANDO:

Que, el (a) Bach. SUPO PACORI WILFREDO DAVID, para optar el Grado Académico de MAGISTER en INGENIERÍA CIVIL mención: GEOTECNIA Y TRANSPORTES, de la Escuela de Posgrado ha presentado el Dictamen de Proyecto de Investigación de tesis: INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 MSNM – ZONA SUR DE JULIACA. Línea de Investigación; TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN. Presentado por el (a) Bach. SUPO PACORI WILFREDO DAVID, para ser registrada en el Libro de Actas de Proyectos de Tesis.

Que, el referido Dictamen de Tesis aprobado por los jurados el 30 de Mayo del 2019, se ha registrado en el Folio N° 1437 del Libro de Registro de Proyectos de Investigación de Maestrías, establece que se encuentra apto para ser desarrollado a lo establecido en el reglamento de Grado de Investigación conducente al Grado Académico de Magister y Doctor de la Escuela de Posgrado de la UANCV;

Que, en el Reglamento General de la escuela de Posgrado de la UANCV, establece que la sustentación de Tesis de Posgrado es un trabajo de investigación original y critico de actualidad y de alto valor científico.

En uso de las atribuciones conferidas a la Dirección en el inciso "h" del artículo 15 del Reglamento General de la Escuela de Posgrado, y el Art. 74 del Estatuto Universitario;

SE RESUELVE:

PRIMERO.- APROBAR el PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE TESIS DE MAESTRIA, Titulado: INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 MSNM – ZONA SUR DE JULIACA. Línea de Investigación; TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN. Presentado por el (a) Bach: SUPO PACORI WILFREDO DAVID, con número de DNI 02428673 y con Código de matrícula N° 29129901, para optar el Grado Académico de MAGISTER en INGENIERÍA CIVIL mención: GEOTECNIA Y TRANSPORTES, y Siendo Asesorado por el (a) Mgtr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA, y según Acta de Sorteo, la terna de Jurados son los siguientes docentes:

Presidente : Mgtr. ORLANDO EDILBERTO LA TORRE BARRA
Primer Miembro : Mgtr. HERNAN PEDRO MARTINEZ RAMOS
Segundo Miembro : Dr. RONALD MADERA TERAN

SEGUNDO.- AUTORIZAR el desarrollo de Tesis, de acuerdo al Reglamento de Investigación conducente al Grado Académico de MAGISTER de la Escuela de Posgrado.

TERCERO.- ELEVAR al Rectorado, Vicerrectorado Académico, Vicerrectorado Administrativo y Oficina del Órgano de Inspección y Control para conocimiento, así como a la Oficina de Economía, para cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese y Archívese

Cc: CARGO (01)
ARCHIVO EPG - 2018 (01)
INTERESADO (01)
OCWasy



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
ESCUELA DE POSGRADO

Dr. César Augusto Cortés Méndez
DIRECTOR



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
ESCUELA DE POSGRADO

Mg. Luis Chavira Aguilar
SECRETARIO ACADÉMICO



INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

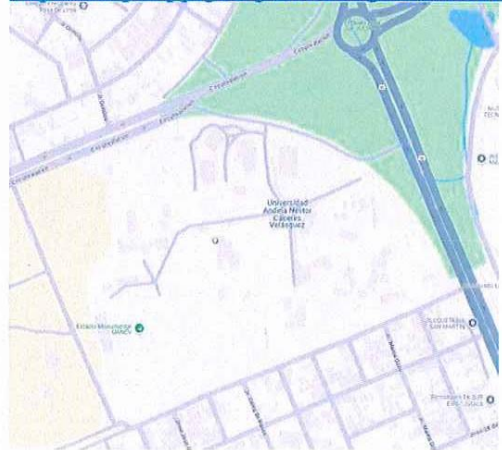
1	Submitted to Higher Education Commission Pakistan Trabajo del estudiante	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	1library.co Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	1%
5	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	www.camineros.com Fuente de Internet	1%
7	es.slideshare.net Fuente de Internet	1%



METADATOS COMPLEMENTARIOS

TÍTULO DE LA TESIS	
INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	Wilfredo David Supo Pacori
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02428673
URL de ORCID	http://orcid.org/0000-0003-4821-3825
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Fritz Willy Mamani Apaza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02306659
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0268-5061
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Oscar Vicente Viamonte Calla
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02371550
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Hernán Pedro Martínez Ramos
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01316765
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Ronald Madera Terán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02429150



Datos de investigación	
Línea de investigación	Tecnología de la construcción - P – 50
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	<p>Ensayos: País: Perú Departamento: Puno Provincia: San Román Distrito: Juliaca Lugar: Ciudad Universitaria – Juliaca Edificio: Laboratorio de mecánica de suelos, concreto y asfaltos- Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras - UANCV</p> <p>Experimento: País: Perú Departamento: Puno Provincia: San Román Distrito: Juliaca Lugar: Ciudad Universitaria – Juliaca Zona: 19L Coordenada Este: 379594.00 m E Coordenada Norte: 8282368.00 m S https://maps.app.goo.gl/HSN33gB7rNSDRkk7</p> 
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Agosto 2019 - Setiembre 2024 2019 – 2024
URL de disciplinas OCDE https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html - Librería	Ingeniería Civil https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.00 Ingeniería de la construcción https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.00



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
ESCUELA DE POSTGRADO

Dr. Segundo Ortiz Cansaya
DIRECTOR
DE INVESTIGACIÓN - EPG



DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo **Wilfredo David Supo Pacori**, identificado con DNI Nro. **02429673** en mi condición de egresado de:

- Escuela Profesional
- Programa de Segunda Especialidad,
- Programa de Maestría o Doctorado

Maestría en Ingeniería Civil, Mención: Geotecnia y Transportes

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación, Trabajo Académico denominada:

Influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante del pavimento, tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar

Asesorado por: **Mgtr. Fritz Willy Mamani Apaza**

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

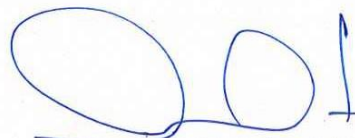
Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca **07** de noviembre de 2024


Firma del Asesor


Firma del Estudiante



Huella digital



DEDICATORIA

A la memoria de Jacinto Supo Mamani, mi padre, ejemplo de perseverancia, a quien siempre tengo presente en mi memoria.

A: Ada Liz, mi querida esposa y compañera en la vida, a mis hijas Melisa y Angélica y a mi madre María Pacori.



AGRADECIMIENTO

A Dios, por todo. A la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, mi alma mater, por otorgarme la oportunidad de crecer tanto académica como personalmente.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xii

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema.....	15
1.2. Formulación del problema.....	17
1.2.1. Interrogante general.....	17
1.2.2. Interrogantes específicas.....	17
1.3. Justificación de la investigación	17
1.4. Objetivos	20
1.4.1. Objetivo general.....	20
1.4.2. Objetivos específicos.....	20
1.5. Hipótesis	20
1.5.1. Hipótesis General	20
1.6. Variables	21
1.6.1. Independiente	21
1.7. Dependiente	21
1.8. Variables intervinientes.....	21
1.9. Operacionalización de variables	22



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación23

2.2. Bases teóricas.....28

2.2.1. Subrasante28

2.2.2. Capa de mejoramiento, definición y funciones35

2.2.3. Módulo resiliente de la subrasante (*MR*)37

2.4. Modelos y algoritmos de retrocálculo53

2.5. Deflectometría63

2.3. Marco conceptual.....67

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de la investigación69

3.1.1. Tipo de investigación69

3.2. Diseño experimental70

3.3. Población y muestra.....71

3.3.1. Población71

3.3.2. Muestra.....71

3.4. Procedimientos71

3.4.1. Construcción del tramo experimental.....71

3.4.2. Análisis de Datos75

3.4.3. Análisis estructural.....76



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante.....88

5.1.2. Por el método de Hogg modificado.....88

5.1.3. Por el método de Huang - Kenlayer.....90

5.1.4. Propiedades físico mecánicas del suelo natural de la subrasante92

5.1.5. Propiedades físico mecánicas del suelo de mejoramiento de la subrasante.... 94

5.2. Deflexiones teóricas y observadas en el experimento95

5.3. Valor de diseño de la subrasante.....97

5.3.1. Por el método de Hogg modificado.....97

5.3.2.1. Por el método de Huang - Kenlayer.....98

5.4. Contrastación de hipótesis.....98

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Operacionalización de variables del estudio</i>	22
Tabla 2	<i>Subrasante para secciones en corte y relleno</i>	30
Tabla 3	<i>Requisitos de calidad de los materiales para terraplenes</i>	32
Tabla 4	<i>Normas para caracterización físico-mecánica de subrasantes</i>	33
Tabla 5	<i>Categorías de subrasante según el MTC del Perú</i>	49
Tabla 6	<i>Ecuaciones para la obtención de parámetros de evaluación</i>	60
Tabla 7	<i>Coefficientes para el modelo de Hogg</i>	60
Tabla 8	<i>Clasificación de la investigación</i>	70
Tabla 9	<i>Composición y denominación de los tramos a escala real</i>	73
Tabla 10	<i>Resultados de prueba de normalidad de deflexiones</i>	76
Tabla 11	<i>Coefficientes de regresión para la ecuación de (Liu et al., 2019)</i>	78
Tabla 12	<i>Datos de entrada para calcular M_{RC} de la subrasante</i>	84
Tabla 13	<i>Variación del M_{RC} en relación a la PI</i>	84
Tabla 14	<i>Propiedades físicas del suelo natural de la subrasante, Pozo 1</i>	93
Tabla 15	<i>Propiedades físicas del suelo natural de la subrasante, Pozo 2</i>	93
Tabla 16	<i>Valor Relativo de Soporte in situ (CBR)</i>	93
Tabla 17	<i>Propiedades físico-mecánicas del suelo de mejoramiento</i>	94
Tabla 18	<i>Diferencias entre deflexiones medidas en campo y teóricas</i>	95
Tabla 19	<i>Valor de diseño de la subrasante compuesta en los tramos experimentales, por el método de Hogg modificado</i>	97



Tabla 20 M_{RC} de la subrasante, e_{CM} de 0 a 0.60m.....	98
Tabla 21 Relación e_{CM} vs M_{RC}	99
Tabla 22 Análisis de regresión.....	99
Tabla 23 Análisis de Profundidad de Influencia.....	100
Tabla 24 Incrementos del M_{RC}	100



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Estructura y subestructura de un pavimento flexible convencional* 32

Figura 2 *Subrasante compuesta por suelo natural y capa de mejoramiento*.... 36

Figura 3 *Procedimientos para mejorar la subrasante*..... 37

Figura 4 *Definición de módulo resiliente MR* 38

Figura 5 *Módulo resiliente efectivo de subrasantes, por criterios de servicio*... 48

Figura 6 *Diagrama de flujo del proceso de retrocálculo* 51

Figura 7 *Sistema de 2 capas (Bicapa)* 54

Figura 8 *Determinación del esfuerzo vertical según la teoría de Burmister* 56

Figura 9 *Factor F para el cálculo de deflexiones en un sistema bicapa* 56

Figura 10 *Modelo de Hogg*..... 59

Figura 11 *Diagrama de cuerpo libre de un sistema de dos capas*..... 62

Figura 12 *Viga Benkelman de un brazo* 64

Figura 13 *Viga Benkelman de un brazo, marca Humboldt, serie H-322*..... 64

Figura 14 *FWD Dynatest, modelo 8000 montado en remolque*..... 65

Figura 15 *Deflectómetro para cargas pesadas, Dynatest* 65

Figura 16 *Instalación de los sensores (PRMS) en el pavimento* 66

Figura 17 *Light Weight Deflectometer (LWD)*..... 66

Figura 18 *GeoGauge, marca Humboldt serie H-4140* 67

Figura 19 *Ubicación del tramo de control y experimental*..... 72



Figura 20 <i>Tramo experimental – vista en planta</i>	73
Figura 21 <i>Secciones transversales de los grupos experimentales y de control</i>	73
Figura 22 <i>Valores de los coeficientes a y b de la relación M_{Rd} y E_s</i>	78
Figura 23 <i>Modelo unicapa</i>	79
Figura 24 <i>Modelo bicapa</i>	79
Figura 25 <i>Modelo unicapa para análisis con Kenlayer</i>	80
Figura 26 <i>Modelo bicapa para análisis con Kenlayer</i>	81
Figura 27 <i>Respuesta estructural de la subrasante + $e_{CM} = 0.60$, $r = 0\text{cm}$</i>	83
Figura 28 <i>Respuesta estructural de la subrasante + $e_{CM} = 0.60$, $r = 16\text{cm}$</i>	83
Figura 29 <i>Respuesta estructural de la subrasante + $e_{CM} = 0.60$, $r=0\text{cm}$ y $r=16\text{cm}$</i>	84
Figura 30 <i>Comportamiento del M_{RC} en relación a la PI</i>	85
Figura 31 <i>Efecto de valores extremos de PI (3m y 0m)</i>	85
Figura 32 <i>Deformada de la subrasante considerando $e_{CM} = 0.60\text{m}$</i>	87
Figura 33 <i>Valor de diseño de subrasante compuesta - Hogg modificado 1</i>	89
Figura 34 <i>Valor de diseño de subrasante - Hogg modificado 2</i>	89
Figura 35 <i>Valor de diseño de la subrasante compuesta - Hogg modificado 3</i> .	90
Figura 36 <i>Influencia del e_{CM} en el M_{RC} de la subrasante compuesta</i>	91
Figura 37 <i>Deflexión experimental y teórica</i>	96



RESUMEN

Se buscó explicar la influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante para diseño de pavimentos de un tramo experimental a 3825 msnm., así como; evidenciar las características físicas y mecánicas del suelo natural de la subrasante y del suelo para la capa de mejoramiento. Se construyó una subrasante a escala real de 50m de longitud dividido en cinco tramos de 10m cada uno, el primero pertenece al grupo de control y los cuatro restantes a los grupos experimentales, se conformaron y compactaron cuatro tramos de subrasante compuestas por: suelo natural y una capa de mejoramiento de 0.15, 0.30, 0.45 y 0.60m de espesor, para medir en ellas deflexiones con viga Benkelman, generadas por un eje simple dual cargado con 8.2 toneladas, las deflexiones registradas sirvieron para el retrocálculo del módulo de la subrasante de cada tramo por los métodos: Hogg modificado y Huang – Kenlayer. Los resultados del método de Hogg muestran que el M_{Rd} varía de 33,288 a 57,406 kPa y el método de Huang – Kenlayer muestra que el M_{RC} varía de 20,850 a 81,200 kPa, para espesores de la capa de mejoramiento de 0.00 a 0.60m colocadas sobre el suelo natural. En conclusión, existe relación directa y tendencias cuadrática y exponencial entre el espesor de la capa de mejoramiento de la subrasante y su módulo resiliente según Hogg modificado y Huang – Kenlayer respectivamente.

Palabras clave: capa de mejoramiento, deflectometría, retrocálculo, valor de diseño de la subrasante



ABSTRACT

The aim was to explain the influence of the thickness of the improvement layer on the resilient modulus of the subgrade for pavement design of an experimental section at 3825 m above sea level, as well as to demonstrate the physical-mechanical properties of the natural soil of the design subgrade and of the soil for the improvement layer. A 50 m long full-scale subgrade section was constructed, divided into five sections of 10 m each, the first belonging to the control group and the remaining four to the experimental groups. Four subgrade sections were formed and compacted, composed of natural soil and an improvement layer of 0.15, 0.30, 0.45 and 0.60m thick, to measure deflections with Benkelman beam, generated by a simple dual axle loaded with 8.2 tons, the recorded deflections were used to backcalculate the modulus of the subgrade of each section by the methods: modified Hogg and Huang - Kenlayer. The results of the Hogg method show that it varies from 33,288 to 57,406 kPa and the Huang - Kenlayer method shows that it varies from 20,850 to 81,200 kPa, for thicknesses of the improvement layer from 0.00 to 0.60m placed on top of the natural soil. In conclusion, there is a direct relationship and quadratic and exponential trends between the thickness of the subgrade improvement layer and its resilient modulus according to modified Hogg and Huang - Kenlayer respectively.

Key words: improvement layer, deflectometry, back-calculation, subgrade design value.



INTRODUCCIÓN

El método de diseño de estructuras de pavimento de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 1993), así como la “Guía de Diseño Mecanístico-Empírico de Pavimentos” (“Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MPDG”) en cuanto a la variable de diseño, suelo de subrasante requiere conocer módulos de resiliencia (M_R) de sus componentes. Los M_R son parámetros mecánicos de los suelos que se obtienen mediante el ensayo triaxial de carga cíclica, ensayo que por requerir de un equipo costoso y de personal técnico altamente cualificado para aplicarlo, aún no se realiza en nuestro país; según la “Sección suelos y pavimentos” del manual de carreteras del MTC del Perú (2014) “Así mismo se extraerán muestras representativas de la sub rasante para realizar ensayos de Módulos de Resiliente (M_r) o ensayos de CBR para correlacionarlos con ecuaciones de M_r ” (p. 30). Las correlaciones $CBR - M_R$, por ser empíricas solo son aplicables al sitio de donde se realizaron las pruebas, decreciendo su confiabilidad para condiciones “similares” (Olarte P., 2015, p. 112). Por lo tanto, es necesario utilizar procedimientos más confiables para determinar los M_R de los suelos de subrasante y de los componentes del pavimento. Esos procedimientos de mayor confiabilidad son precisamente los ensayos no destructivos que a partir de la medición de deflexiones por retrocálculo permiten conocer los M_R de los componentes estructurales de los pavimentos. En este contexto, en nuestro país existen dificultades para obtener las propiedades mecánicas que nos permitirán diseñar y construir estructuras de pavimento con un grado de confiabilidad mayor.



Se detallan los procedimientos para la construcción de un tramo experimental a escala natural para poner en práctica el análisis de modelos de comportamiento estructural de pavimentos aplicado a la consecución de una comprensión más cercana a la realidad del comportamiento de una subrasante cuando se refuerza la misma con una capa de suelo, práctica muy difundida cuando la subrasante es pobre o insuficiente. Del análisis de las respuestas que resultan de la aplicación de modelos matemáticos del comportamiento estructural de pavimentos se pretende identificar un modelo pertinente para las particularidades de la ciudad de Juliaca y de esta manera los procesos de diseño y ejecución de pavimentos en nuestro medio, puedan mejorar.

Según Robert L. Lytton (1989) una alternativa de medición de las características de los materiales de los pavimentos y para confirmar resultados de ensayos de campo es el uso de "Ensayos No Destructivos" (END) o "Nondestructive testing" (NDT) por lo que un objetivo estratégico de los ensayos NDT debe ser que se conviertan en el método principal.

El estudio se desarrolló en cuatro capítulos.

Primer capítulo, el problema. Comprende el planteamiento, formulación, justificación, objetivos, variables e indicadores, operacionalización de variables e hipótesis del estudio.

Segundo capítulo, marco teórico. Contiene antecedentes, las bases teóricas y marco conceptual.

Tercer capítulo, metodología. Se detallan tipo y diseño del estudio, población y muestra y procedimientos desarrollados.



Cuarto capítulo, resultados y discusión. Comprende el análisis y discusión de resultados y contrastación de la hipótesis.

En apartado especial se presentan: conclusiones y recomendaciones para investigación futuras en la línea de investigación, basadas en hallazgos, limitaciones y perspectivas identificadas durante el desarrollo del estudio.

Por último, se presentan las referencias de fuentes citadas y anexos.



CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

En el proceso de diseño de la estructura de pavimentos flexibles se requiere conocer el M_R de la subrasante mejorada con capas de material de préstamo, Kardani y otros (2022) sostienen que, la estimación precisa del M_R del suelo compactado de la subrasante es imprescindible para el diseño seguro y sostenible de los sistemas de pavimento. Por otro lado Sahoo y Sigh (2022) manifiestan que, se dispone de muy poca investigación que estudie el comportamiento compuesto del material granular y el suelo de la subrasante en estructuras de pavimento de dos capas. Basado en estas afirmaciones se planteó efectuar el estudio del comportamiento de una subrasante compuesta (S_C) por suelo natural (S_N) y una capa de mejoramiento (CM) de espesor variable para analizar la influencia del espesor de esta última en el M_R de la subrasante en un tramo experimental a escala real utilizando información estructural registrada en campo y valores de módulo resiliente teóricos obtenidos por métodos analíticos.

Para precisar el valor de diseño de la subrasante de pavimentos asfálticos, en nuestro medio; se evidencia el problema de la carencia de laboratorios que cuenten



con el instrumental necesario para efectuar la prueba de módulo resiliente según la norma AASHTO T 307 (Gutiérrez, 2007). En estas circunstancias la *Guía para diseño de estructuras de pavimento de AASHTO* (AASHTO, 1993) establece la posibilidad de utilizar:

- a) Pruebas de laboratorio,
- b) Retrocálculo mediante ensayos no destructivos (NDT) o
- c) Estimación a partir de estudios de correlación de módulos elásticos.

El "Manual de Carreteras" del MTC (MTC-SP, 2014) recomienda también el uso de fórmulas de correlación, sin embargo, el retrocálculo es la segunda opción recomendada por AASHTO.

El M_R es la propiedad mecánica solicitada por el método AASHTO 1993 para el diseño estructural de pavimentos flexibles (AASHTO, 1993). Actualmente se carece de un procedimiento racional de diseño de las capas de mejoramiento de la subrasante; regularmente se dimensionan en base a experiencia del profesional responsable del diseño lo que, puede resultar en un sobre o sub dimensionamiento de la subestructura (Menéndez & Olarte, 2015).

Las correlaciones $CBR - M_R$, por ser empíricas solo son aplicables al sitio de donde se realizaron las pruebas, decreciendo su confiabilidad para condiciones "similares" (Olarte P., 2015, p. 112).

Olarte (2015) demostró que las variaciones del CBR de 4 a 6% causan un efecto en los espesores de sustitución de hasta 20cm de diferencia.



1.2. Formulación del problema

1.2.1. Interrogante general

¿Cómo influye el espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante para diseño de pavimentos obtenidos por deflectometría con viga Benkelman y métodos analíticos de un tramo experimental en la ciudad de Juliaca a 3825 metros sobre el nivel del mar?

1.2.2. Interrogantes específicas

PE1. ¿Qué propiedades físico-mecánicas presenta el suelo natural de la subrasante del tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar en la ciudad de Juliaca?

PE2. ¿Qué propiedades físico-mecánicas presenta el suelo de mejoramiento de la subrasante del tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar en la ciudad de Juliaca?

PE3. ¿Qué diferencias presentan las deflexiones medidas con viga Benkelman de la subrasante del tramo experimental a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca y las deflexiones teóricas obtenidas por métodos analíticos?

OE4. ¿Cuál es el valor de diseño de la subrasante del tramo experimental ubicado a 3825 m.s.n.m. en la ciudad de Juliaca, obtenido mediante estudio deflectométrico con viga Benkelman?

1.3. Justificación de la investigación

La falta de un procedimiento racional de diseño de los mejoramientos de subrasante, hace que el profesional responsable del diseño; sobre o sub



dimensione la subestructura de un pavimento, esto repercute en el costo de construcción generando adicionales y/o deterioros prematuros de la estructura (Olarte P., 2015). También se sabe que, el actual procedimiento de AASHTO (MEPDG) muestra una baja o nula sensibilidad a la subrasante y a las capas no ligadas, suscitando gran atención de los investigadores (Luo et al., 2017). Esto nos permite afirmar que, al proponer la aplicación de procedimientos empírico mecanicistas para definir el factor suelo de subrasante, para el diseño estructural de pavimentos, se busca contribuir al desarrollo de la ingeniería local incrementando la base de conocimientos de propiedades de los suelos mediante experimentación y aplicación de los hallazgos científicos más actuales en este campo.

Es necesario mencionar que para el cálculo del espesor de la capa de refuerzo de la subrasante especificado en el "Manual de Carreteras" del MTC, los resultados obtenidos en (Menéndez & Olarte, 2015) concluyen que los espesores obtenidos son diferentes porque el "Manual de Carreteras" MTC sugiere un proceso que no tiene sustento técnico y no contempla todas las variables incidentes en la estimación del espesor correspondiente de la subrasante mejorada. Por otro lado, Prasad y Kumar (2022) sostienen que existe muy poca investigación disponible que estudie el comportamiento compuesto del material granular y el suelo de la subrasante en estructuras de pavimentos bicapa, también Singh y Sahoo (2020) sostienen que se han realizado muchos esfuerzos para mejorar los programas informáticos basados en la teoría elástica multicapa; sin embargo, no parece haber ninguna formulación en la literatura para el análisis y diseño de pavimentos flexibles de dos capas que tenga en cuenta los esfuerzos y deformaciones desarrollados en



la superficie y en el límite de la capa granular y la subrasante, que depende de las propiedades y el espesor de las diferentes capas y de las cargas de las ruedas. En cuanto al uso de la viga Benkelman, (Gutiérrez, 2007; Sanjay et al., 2022) afirman que, debido a las dificultades asociadas a la adquisición y al desconocimiento del deflectómetro de impacto – Falling Weight Deflectometer (*FWD*), muchos países siguen utilizando Viga Benkelman para la evaluación estructural de carreteras.

El uso racional de materiales en la construcción de obras viales con diseños basados en conocimiento técnico científico contribuirá a que la inversión pública en obras, logre mayores beneficios para la población, es decir la inversión tendrá mayor rentabilidad. El presente estudio propuso analizar el comportamiento de materiales de refuerzo de subrasantes de baja resistencia para su mejor comprensión y empleo en el proceso de diseño y ejecución, lo que a corto y mediano plazo repercutirá en el uso eficiente de recursos.

La problemática que plantea el presente estudio sigue en constante desarrollo, como muestra se puede mencionar a K. Singh y J. P. Sahoo (2020) que proponen un nuevo enfoque mecanicista para determinar deformaciones de la superficie y de la interfaz subrasante-capas granular para un eje simple de rueda doble estándar, desarrollada por medio del software de simulación ABAQUS. También a (Nakhaei & Timm, 2023) que, proponen una nueva metodología para mejorar el retrocálculo de pavimentos flexibles con fundaciones estabilizadas, ellos sostienen que aunque son comunes, existen muy pocos datos mecanístico-empíricos y pocos estudios mecanísticos sobre estos tipos de pavimento y que para mejorar la comprensión fundamental y el diseño y comportamiento completo de los pavimentos flexibles con fundaciones estabilizadas, es necesaria una evaluación a escala natural.



1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Explicar la influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante para diseño de pavimentos de un tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar.

1.4.2. Objetivos específicos

OE1. Evidenciar las propiedades físico-mecánicas del suelo natural de la subrasante de diseño.

OE2. Evidenciar las propiedades físico-mecánicas del suelo de mejoramiento de la subrasante de diseño.

OE3. Comparar las deflexiones medidas con viga Benkelman de la subrasante del tramo experimental a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca y las deflexiones teóricas obtenidas por métodos analíticos.

OE4. Determinar el valor de diseño de la subrasante del tramo experimental a escala real ubicado a 3825 m.s.n.m., mediante estudio deflectométrico con viga Benkelman.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

El espesor de la capa de mejoramiento de la subrasante del tramo experimental a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca, influye en relación directa al módulo resiliente de diseño de la subrasante, correspondiendo a la regresión



exponencial con mejor coeficiente de determinación para una adecuada profundidad de influencia.

1.6. Variables

1.6.1. Independiente

Espesor de la capa de mejoramiento de subrasante (e_{CM}).

Definición: Espesor de la capa de mejoramiento conformada con material de préstamo colocado y compactado como refuerzo del suelo natural.

1.7. Dependiente

Módulo de resiliencia de la subrasante de diseño determinado por retrocálculo.

Definición: Relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación recuperable equivalente de los suelos que componen la subrasante, obtenida por retrocálculo a partir de deflectometría en tramos experimentales a escala real.

1.8. Variables intervinientes

- **Nivel freático.** Altura del espejo de agua subterránea en una perforación.
- **Suelo natural.** Material de baja resistencia al corte, excavables con métodos y herramientas manuales convencionales, sobre el que se colocará y compactará una capa de mejoramiento con la finalidad de reforzarla para mejorar su comportamiento mecánico.
- **Suelo de mejoramiento.** Material de préstamo de cantera colocado y compactado en capas sobre el suelo natural para mejorar su resistencia.



1.9. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables del estudio

Título: Influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante del pavimento, tramo experimental a 3825 msnm

Variable	Indicadores	Valor final/Escala	Tipo de variable
Independiente			
1. Espesor de la capa de mejoramiento	e_{CM}	0.0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60m	Continua
Dependiente			
2. Módulo resiliente equivalente de la subrasante	2.1 $M_{R_Suelo\ natural}$ 2.2 $M_{R_Capa\ de\ mejoramiento}$	KPa	Continua

Nota: " e_{CM} : Espesor de la capa de mejoramiento, M_R : Módulo resiliente"



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Prasad y Kumar (2022) buscaron desarrollar modelos de predicción del desempeño mecánico de un pavimento bicapa (capa granular y suelo de subrasante), para el que se planteó el estudio en una carretera de un solo carril de bajo volumen de tránsito y se examinaron las respuestas críticas del pavimento. Los resultados indicaron que la caracterización elastoplástica de la capa granular y las cargas de ruedas múltiples suponen diferencias considerables el desempeño de los pavimentos con capas granulares delgadas y relaciones de módulo bajas; sin embargo, su influencia se reduce con el incremento del espesor de la capa granular a una relación de módulo constante. Para un espesor constante del pavimento, se obtuvieron deformaciones relativamente mayores con relaciones de módulo más altas, lo que indicó que las respuestas del pavimento dependían del comportamiento compuesto del sistema de pavimento más que de la resistencia de una capa individual. Sobre la base de la variación de las deformaciones y los esfuerzos de la interfaz con las relaciones de módulo y las relaciones entre el espesor del pavimento y el ancho de los neumáticos, se desarrollaron modelos de predicción que pueden utilizarse para predecir las deformaciones de la superficie y



la interfaz (capa granular y subrasante), y los esfuerzos en la interfaz para el análisis y el diseño de una estructura de pavimento de dos capas.

Este antecedente demuestra la actualidad y el interés de cubrir los vacíos de conocimiento existentes en cuanto al comportamiento subrasante-capas de mejoramiento en pavimentos flexibles, además de orientar el estudio para seleccionar el método de análisis de estructura de pavimento considerando dos capas como un procedimiento válido para el análisis planteado en la presente tesis.

Zipoli y Avesani (2022) propusieron analizar la variabilidad del módulo elástico del material granular debido a la influencia de su espesor y a la presencia de subrasante pobre en la fundación. Se desarrolló un experimento a escala real en un campo de pruebas con dos secciones, una reforzada con geoceldas y otra sin refuerzo, se ejecutaron ensayos de carga de placa y deflectometría con viga Benkelman para registrar los módulos elásticos de las capas sin refuerzo y reforzadas, se utilizó la teoría elástica multicapa interpretar los resultados. Los resultados del ensayo con viga Benkelman mostraron que existe una influencia significativa del espesor de la capa granular de refuerzo sobre su módulo elástico cuando ésta se apoya directamente sobre una subrasante blanda. Concluyeron que la caracterización del módulo elástico de la capa de refuerzo para fines de diseño de pavimentos debe considerar su espesor y consecuencia de la rigidez de la subrasante y/o de las capas subyacentes.

Singh y Sahoo (2020) propusieron una nueva formulación para determinar las deformaciones de la superficie y de la interfaz ocasionados por un eje simple de una rueda y un eje simple de rueda doble de un sistema de pavimento bicapa. El nuevo procedimiento se desarrolló basándose en un enfoque mecanicista y en las



soluciones obtenidas a partir de un programa de elementos finitos tridimensional, utilizando ABAQUS teniendo en cuenta la influencia de la huella rectangular del neumático, el módulo de la capa base granular, el espesor del pavimento y la relación del módulo del pavimento y de la subrasante; para la estimación de las deflexiones de la superficie y de la interfaz, se han generado factores de deflexión en forma de gráficos adimensionales en función de la relación del módulo del pavimento y de la subrasante, y de la relación del espesor del pavimento y ancho del neumático. Se ha observado que la deformación permanente o el ahuellamiento es el principal modo de deterioro en las carreteras de bajo volumen con revestimiento fino o sin él, también que, el efecto del coeficiente de Poisson de la base granular y la subrasante es muy poco significativo.

Vásquez y García (2017), efectúan una revisión de los procedimientos numéricos desarrollados para el estudio de capas de conformación de la subrasante (Burmister, Odemark, Ivanov, Kirk y Guía Francesa de Diseño) y proponen una propuesta para verificar la calidad de construcción de pavimentos consiste en realizar ensayos in situ con deflectómetro liviano de impacto (LWD) durante las etapas iniciales de ejecución. Al registrar mediciones en campo en tiempo real, se puede: Validar si los resultados cumplen con las especificaciones de diseño, Identificar posibles áreas problemáticas tempranamente y Usar la información recolectada para ajustar y mejorar los criterios de diseño de futuros pavimentos asfálticos. Esta metodología permite un ciclo de retroalimentación donde la experiencia práctica constructiva ayuda a optimizar los métodos de diseño. El método mecánico-empírico para diseño de pavimentos ofrece mayor flexibilidad para determinar tanto los espesores como las características de calidad de los



diferentes estratos que componen la estructura y subestructura del pavimento. Particularmente, cuando se trabaja sobre suelos de subrasante con baja capacidad de soporte, es necesario realizar un análisis detallado de una capa de mejoramiento que cumpla una doble función: primero, soportar adecuadamente las cargas generadas por la maquinaria durante el proceso constructivo y segundo, garantizar un desempeño satisfactorio frente a las solicitaciones del tráfico vehicular una vez el pavimento entre en operación., existen diferentes ecuaciones de transformación de sistemas elásticos de dos capas en fundaciones equivalentes de una sola capa. Las ecuaciones de Odemark, Kirk e Ivanov son formas de una misma solución del sistema de capas elásticas, debido al comportamiento no lineal de los suelos, se requiere medir en campo los módulos elásticos tanto de la subrasante como de las capas de mejoramiento, aplicando niveles de esfuerzo que reproduzcan las condiciones reales a las que estará sometida la estructura durante su vida útil de servicio.

Menéndez y Olarte (2015), desarrollaron un método analítico calibrado para determinar el espesor óptimo de mejoramiento de subrasante, basado en ensayos in-situ y el análisis mecanicista de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles. La calibración se realizó en un tramo de 18 km de la Carretera Chanchamayo - Villa Rica (Ruta Nacional 005N), entre el Puente Raither y el Puente Paucartambo, donde se construyeron cuatro secciones de prueba con diferentes espesores de mejoramiento sobre suelos de fundación con propiedades similares. Se caracterizó el sistema compuesto por la subrasante mejorada y el suelo de fundación mediante el módulo resiliente equivalente, obtenido por retrocálculo a partir de mediciones con Viga Benkelman (VB) y Deflectómetro de Impacto (FWD).



Como resultado, se generó una carta de diseño que permite dimensionar el espesor requerido de la capa de mejoramiento. Asimismo; el autor compara los resultados obtenidos por el proceso recomendado en el “Manual de Carreteras” del MTC y concluye que: *“...los resultados son disimiles debido a que el procedimiento del Manual de Carreteras MTC no tiene un sustento técnico y no considera todas las variables y parámetros que inciden en el dimensionamiento del espesor adecuado de subrasante mejorada en pavimentos flexibles.”* (p. 11)

El presente proyecto de tesis plantea un experimento a escala real que permita explicar la influencia de la capa de mejoramiento de subrasante en su módulo de resiliencia, el mejoramiento estará conformado por suelos provenientes de la cantera “Taparachi” de la ciudad de Juliaca.

Ying et al. (2010) examinaron los fundamentos y limitaciones de las técnicas de retrocálculo en pavimentos flexibles y rígidos. Utilizando el método de análisis inverso de dos capas recomendado por la Guía AASHTO 1993 para evaluar estructuralmente pavimentos existentes, los investigadores compararon módulos obtenidos en laboratorio (estáticos) con aquellos derivados del retrocálculo (dinámicos), empleando la base de datos LTPP (Long-Term Pavement Performance). El estudio reveló una alta dispersión en la relación entre módulos estáticos y dinámicos, con un factor de ajuste aproximado de 0.33 para convertir el Módulo resiliente dinámico (MRd) de la subrasante al Módulo resiliente estático (MRe) mediante retrocálculo de la capa asfáltica. Estos hallazgos evidencian la necesidad de profundizar la investigación para mejorar las metodologías actuales de retrocálculo. Propusieron un modelo de regresión revisado para futuras aplicaciones.



2.2. Bases teóricas

2.2.1. Subrasante

El término "subrasante" en el diseño estructural de pavimentos comenzó a utilizarse de manera destacada alrededor de 1940. La fuente más antigua que se pudo encontrar fue la de (Goldbeck, 1940) en la que caracteriza el suelo de subrasante en términos de "valor de soporte de subrasante" en libras por pulgada cuadrada, variando de 0 a 90psi. Asimismo, en la fuente mencionada Goldbeck, propone un método de diseño de pavimentos no rígidos. Por otro lado; se tienen antecedentes históricos en el desarrollo de las carreteras de civilizaciones antiguas y que sientan las bases del empleo de subrasantes, como:

Calzadas romanas: Las estructuras de pavimento antiguas más famosas son las calzadas romanas. Estas calzadas se construyeron prestando una atención meticulosa a los cimientos y el drenaje, elementos clave del diseño moderno del subsuelo. En primer lugar, los ingenieros romanos preparaban el suelo natural para crear unos cimientos firmes, lo que se asemeja a la preparación moderna de la subrasante. Este proceso implicaba la excavación y, en ocasiones, la adición de materiales para mejorar la estabilidad y el drenaje, lo que refleja los objetivos del diseño actual del subsuelo. (O'Flaherty, 2002)

Antiguas carreteras mesopotámicas: En la antigua Mesopotamia, existen pruebas de carreteras construidas con tierra compactada o ladrillos de barro, donde la capa de tierra compactada cumplía una función similar a la de una subrasante moderna. Esta capa proporcionaba una base estable para los ladrillos o piedras colocados encima, que es la función principal de una subrasante en la ingeniería moderna de pavimentos. (Leick, 2002)



Carreteras medievales europeas: En la Europa medieval, las técnicas de construcción de carreteras variaban, pero a menudo implicaban la preparación del terreno natural para soportar la superficie de la carretera. Esto podría considerarse como una forma temprana de preparación de la subrasante, en la que el suelo se compactaba y a veces se mejoraba con materiales orgánicos para mejorar el soporte y el drenaje. (Hindle, 1998)

Caminos incas: Los incas eran famosos por sus sistemas de carreteras en Sudamérica. Construían carreteras con múltiples capas, incluida una capa base bien compactada que funcionaba de forma similar a una subrasante. Esta capa era crucial para la estabilidad y el drenaje en el variado y a menudo difícil terreno andino. (Hyslop, 1984)

Según el “Glosario de Términos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú” (2018) la subrasante “Es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte o relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado” (p. 21). Menéndez, J. (2016) afirma que: “La estructura del pavimento se apoya sobre una superficie con determinado espesor denominada subrasante. Esta está conformada por suelo natural compactado, material transportado y suelos mejorados entre otros” (p. 38). Por otro lado Christopher y otros (2006) definen subrasante como:

La superficie superior de una calzada sobre la que se construyen la estructura del pavimento y las bermas, con el propósito de proveer una plataforma para la construcción del pavimento y soportarla sin deflexiones indebidas que puedan impactar su desempeño. Para pavimentos construidos a nivel o en cortes, la subrasante es el suelo natural. La capa superior de este suelo natural puede

compactarse o estabilizarse para aumentar su resistencia, rigidez y/o estabilidad. En el caso de los pavimentos construidos sobre terraplenes, la subrasante es un material de préstamo compactado. Otros aspectos geotécnicos de la subrasante de interés en el diseño de pavimentos son la profundidad a la roca y la profundidad a la capa freática, especialmente si cualquiera de ellas se encuentra cerca de la superficie. El espesor real de la subrasante es algo indefinido, y la profundidad a considerar dependerá del método de diseño. (pp. 1-6)

Tabla 2*Subrasante para secciones en corte y relleno*

Tipo de Sección	Fundación natural	Composición de la subrasante	Especificaciones
Corte	Roca	Capa subrasante	150 mm de material seleccionado de subbase granular (CBR > 40%), para rellenar áreas profundizadas; hasta el nivel de subrasante.
	Suelo	Fundación compactada	300 mm de suelo natural compactado: 150 mm permanecen en su posición original sin haber sido removidos y 150 mm superiores (hasta el nivel de subrasante) que fueron escarificados, conformados, nivelados y compactados. Niveles de acuerdo a las pendientes transversales especificadas y compactación al 95% de la máxima densidad seca (MDS).
Relleno	Roca	Terraplén	Desde la superficie del macizo rocoso hasta el nivel de subrasante.
	Suelo	Fundación compactada	300 mm de suelo natural compactado de los que: 150 mm permanecen en su posición original sin haber sido removidos y 150 mm superiores hasta el nivel de fondo del terraplén, escarificados, conformados, nivelados y compactados al 90% de la máxima densidad seca (MDS).
		Terraplén	Conformado a su vez por la base, cuerpo y corona del terraplén. La base y cuerpo conformados en capas de hasta 300 mm compactados al 90% de la máxima densidad seca (MDS). La corona del terraplén o relleno tendrá un espesor mínimo de 300 mm y será conformado en dos capas de 150 mm, compactadas al 95% de la máxima densidad seca (MDS).

Nota. Componentes de una subrasante, adaptado de "Ingeniería de Pavimentos Materiales (5ta. ed., Vol. 1). ICG" - Menéndez, J. (2016, p. 38) y (MTC-SP, 2014).



Basado en estas definiciones, asumimos que la subrasante es una estructura delimitada en su superficie denominada nivel de subrasante, puede estar compuesta por una o más capas de suelos de calidad especificada dependiendo de su ubicación en una sección en corte o en relleno, nivel freático, diferencia de cotas entre el nivel de subrasante - terreno natural y características del suelo o roca natural.

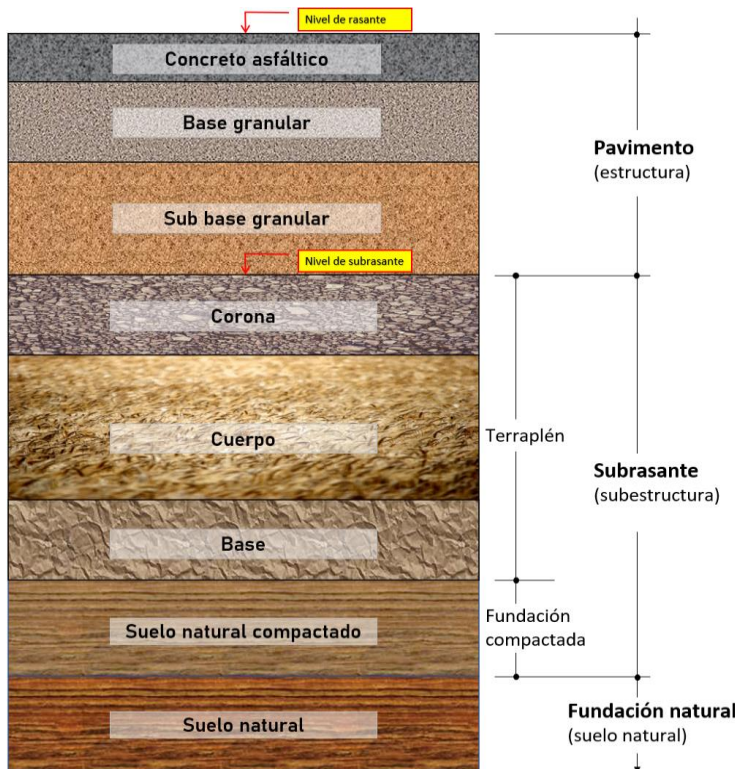
En la Tabla 2 se visualiza la composición de la subrasante en una vía vehicular por tipo de sección (corte o relleno) y tipo de fundación natural (roca o suelo). En la Figura 1 se puede observar, por ejemplo; la composición de una estructura de pavimento flexible y la subestructura en caso de estar ubicada en una sección en relleno.

Por lo general el suelo de subrasante se compone de varias capas, en caso de una sección en relleno: 300mm de suelo natural compactado y las del terraplén que puede estar compuesto por base, cuerpo y corona; y en el caso de una sección en corte 300mm superiores compactados del suelo natural o roca natural y una capa subrasante (EG-MTC, 2015).

“Las variaciones horizontales y verticales en los tipos de suelo sub superficiales, los contenidos de humedad, densidades, profundidad del nivel freático y la ubicación de los estratos rocosos deben considerarse durante el proceso de diseño del pavimento” (AASHTO, 2015, p. 82). “Los suelos expansivos, los suelos susceptibles a heladas y el flujo de agua deben identificarse y considerarse en el diseño del pavimento, debido a su efecto perjudicial sobre el desempeño del pavimento” (AASHTO, 2015, p. 82).

Figura 1

Estructura y subestructura de un pavimento flexible convencional



Nota. La estructura del pavimento convencional según Huang, Y., (2004), Menéndez, J., (2016, p. 38) y MTC (2014).

Las secciones en relleno de un tramo de carretera requieren por lo general de la colocación de capas de relleno para alcanzar la cota de diseño de la subrasante (nivel de subrasante), los materiales a utilizarse deben cumplir con especificaciones de calidad dependiendo de la parte del relleno o terraplén en el que serán colocados, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones por medio de las Especificaciones Técnicas para Construcción, establecen los requisitos mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3

Requisitos de calidad de los materiales para terraplenes

Condición	Partes del terraplén		
	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño máximo (cm)	15	10	7.5
% Máximo de fragmentos de roca >7,62 (cm)	30	20	
índice de plasticidad (%)	<11	<11	<10

También deben cumplir con:

- Desgaste a la abrasión los Ángeles: 60% máx. (MTC E 207)
- Tipo de Material: A-I-a, A-I-b, A-2-4, A-2-6 y A-3

Nota. Tomada de las (EG-MTC, 2015).

El proceso de caracterización físico-mecánica de la fundación (suelo o roca natural) que forma parte de la subrasante, en nuestro país obedece a las normas citadas en la Tabla 4. Los manuales para la gestión de carreteras son elaborados, actualizados y aprobados por el “Ministerio de Transportes y Comunicaciones” - MTC, órgano rector a nivel nacional, para la gestión de la infraestructura vial como se dispone en los artículos 19 y 20 del D.S. N° 034-2008-MTC (Aprobación del “Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial”). La elaboración, actualización y aprobación de norma técnica CE.010 (Pavimento urbanos), E.050 (Suelos y Cimentaciones) y las Normas Técnicas Peruanas (NTP) corresponden al “Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento” - MVCS.

Tabla 4

Normas para caracterización físico-mecánica de subrasantes

No.	Norma	Entidad
01	Manuales para gestión de carreteras	MTC
02	Norma Técnica CE.010 Pavimentos Urbanos	MVCS
03	Norma Técnica E.050 Suelos y Cimentaciones	MVCS
04	Norma Técnica Peruana (NTP)	MVCS

La caracterización del suelo de subrasante expresada en términos de módulo de resiliencia (M_R) se ha convertido en un aspecto crucial para el diseño de pavimentos



(George et al., 2000). Debido a las complejidades encontradas con el ensayo de (M_R), las pruebas in situ son deseables, si se puede establecer una correlación confiable (George et al., 2000). Así como en el Perú, actualmente en gran parte del mundo, por ejemplo Egipto, India, y países latinoamericanos; la estimación del (M_R) de la subrasante para el diseño de estructuras de pavimento se basa en una correlación empírica con el coeficiente de soporte de California (CBR) adoptada de la literatura (Aboelela et al., 2023). La construcción de pavimentos sobre subrasantes blandas ha sido una tarea desafiante para los ingenieros ya que los métodos convencionales resultan en mayores espesores de pavimento y costos de proyecto (Baadiga & Balunaini, 2023).

Existe una gran variedad de técnicas y materiales que se han desarrollado y empleado últimamente para estabilizar los suelos débiles de la subrasante. Algunas de estas técnicas y materiales son cada vez más comunes debido a su rentabilidad comparativa, practicidad y eficiencia. Por lo tanto, se está de acuerdo en que existe una necesidad de evaluar y valorar el desempeño comparativo de estos métodos y tratamientos de estabilización de subrasantes de pavimentos. (Shubber & Saad, 2020)

El estudio de las propiedades de la subrasante desde los inicios de la construcción de carreteras hasta el presente es esencial para el diseño de estructuras de pavimento, su estudio ha ido evolucionando y se puede concluir al respecto en que, cuanto más se sabe de su importancia y más se conoce sobre su desempeño, más conscientes somos de su complejidad e importancia en el diseño y construcción de pavimentos.



2.2.2. Capa de mejoramiento, definición y funciones

Es una capa que se coloca sobre el suelo natural o compactado para su reemplazo parcial o total, la calidad del material de mejoramiento deben cumplir lo establecido para corona del terraplén (EG-MTC, 2015), ver Tabla 3.

La capa de mejoramiento se utiliza para incrementar la rigidez de la subrasante antes de construir las capas estructurales del pavimento. Se considera el refuerzo de la subrasante mediante una capa adicional (capa de mejoramiento) cuando ésta tiene una capacidad de soporte inadecuada o propiedades mecánicas pobres para soportar los incrementos de esfuerzo ocasionadas por el tráfico vehicular y las condiciones climáticas.

De lo anterior se puede deducir que, el propósito de la capa de mejoramiento es:

- **Incrementar la capacidad de soporte de la subrasante:** Mejora la resistencia y rigidez de la subrasante, lo que resulta en un mejor soporte para las capas superiores del pavimento.
- **Controlar la expansión y contracción:** En suelos que son susceptibles a cambios volumétricos debido a la humedad, la capa de mejoramiento ayuda a mitigar estos cambios, protegiendo así la estructura del pavimento.
- **Facilitar la construcción:** Al mejorar las propiedades del suelo, se crea una superficie más resistente que facilita el proceso constructivo de las capas subsecuentes del pavimento.
- También podría contrarrestar los efectos de la capilaridad cuando el nivel freático es superficial o los efectos negativos de las precipitaciones pluviales debido a que

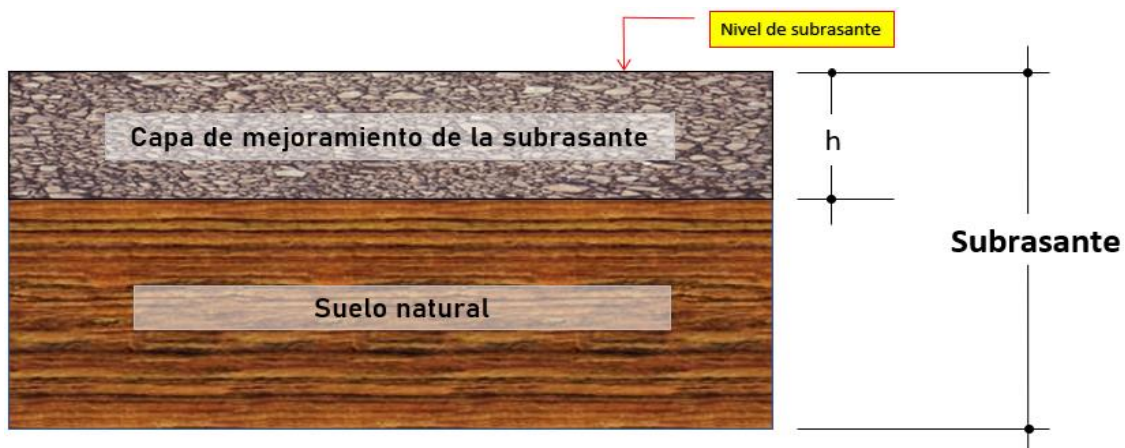
las propiedades mecánicas del suelo de la capa de refuerzo siempre deben ser mejores que las del suelo natural.

En la Figura 2 se observa el caso del uso de una capa de mejoramiento de espesor "h" colocado directamente sobre el suelo natural.

Existen varios procedimientos para mejorar una subrasante, según las (EG-MTC, 2015) del MTC-Perú ver Figura 3.

Figura 2

Subrasante compuesta por suelo natural y capa de mejoramiento



Asimismo, las (EG-MTC, 2015) disponen que los materiales existentes y/o que se adicionarán tengan la calidad exigida para los materiales que conformarán la corona del terraplén.

Figura 3*Procedimientos para mejorar la subrasante*

2.2.3. Módulo resiliente de la subrasante (M_R)

La definición del módulo resiliente (M_R) es introducida en la literatura por H. B. Seed, C. K. Chan y C. E. Lee en 1962 en la publicación (Seed et al., 1962), en la que se define como “la relación entre el esfuerzo desviador aplicado (σ_d) y la deformación recuperable (ε_r)”, propiedad no constante y dependiente de factores como el estado tensional, el contenido de humedad, densidad seca, energía de compactación y tixotropía del suelo (Seed et al., 1962). Una definición más actual es: “Relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación inducida, medida más común de la rigidez utilizada por los ingenieros.” (Thom, 2014, p. 49); otra definición dice: Relación entre esfuerzo y la deformación en la parte elástica de una curva esfuerzo-deformación (NCHRP, 2004a, p. A.6).

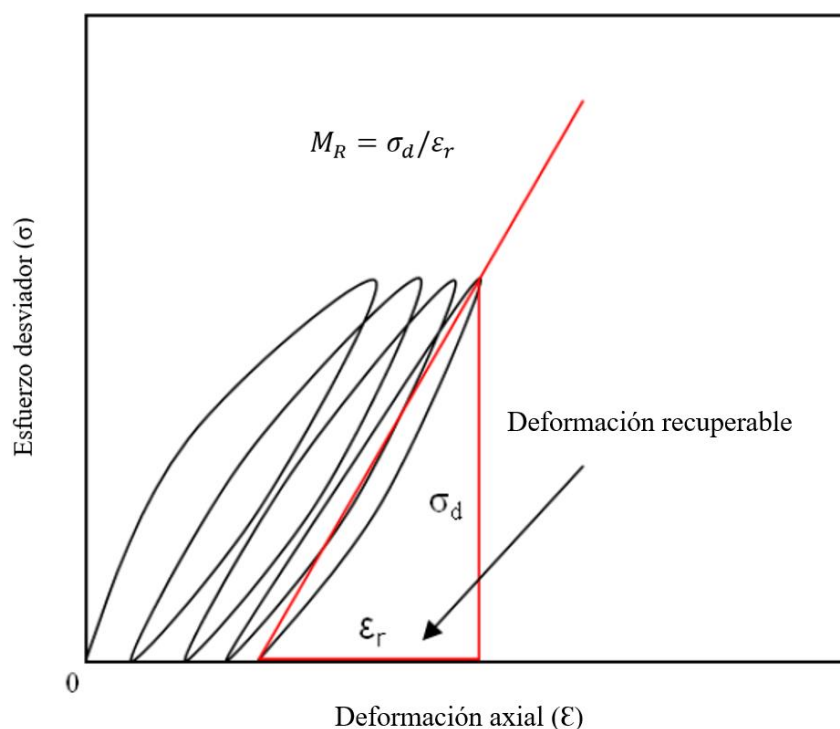
La respuesta resiliente de los materiales granulares se caracteriza normalmente por el M_R en un estado de esfuerzos dado. Cuando un vehículo pasa sobre la estructura del pavimento, se aplica un pulso de esfuerzo a la capa base. El material granular no ligado de la capa de base presenta una combinación de deformaciones

elásticas, que se recuperan y deformaciones permanentes, que se acumulan con cada ciclo de carga (Li et al., 2010), ver Figura 4.

La prueba pretende simular las condiciones de esfuerzo que se producen en la base y la subrasante de un sistema de pavimento. El M_R ha sido adoptado por la Federal Highway Administration de EEUU como el principal parámetro de desempeño para diseño de pavimentos (Durham et al., 2003), también sostiene que el (M_R) indica la rigidez del suelo en condiciones controladas de confinamiento y cargas repetidas.

Figura 4

Definición de módulo resiliente M_R



Nota. Adaptada de *Resilient Modulus Characterization of Alaskan Granular Base Materials* (p. 6), por Li, L., Liu, J., & Zhang, X., 2010, Alaska University Transportation Center.

El M_R es ampliamente utilizado en métodos de diseño de pavimentos mecanicista para caracterizar el comportamiento resiliente de los materiales. El Dr. Huang H. Yang (2004) sostiene que:



El módulo resiliente es el módulo de elasticidad para ser utilizado con la teoría elástica. También afirma que los materiales empleados en las estructuras de pavimento no son elásticos porque experimentan alguna deformación después de cada aplicación de carga, pero que pueden ser considerados elásticos debido a que después de las repeticiones iniciales (en la que se puede observar la acumulación de deformaciones no recuperables) el comportamiento de los materiales es prácticamente elástico. (p. 279)

Desde una perspectiva técnica y basado en las definiciones expuestas, se asume que el M_R es un indicador crucial de las características resistentes de los materiales componentes de los pavimentos en su diseño y análisis. Refleja las condiciones de un material para resistir deformaciones bajo cargas repetidas, un aspecto fundamental del desempeño de los pavimentos. Aunque los materiales no sean perfectamente elásticos, la consideración de un comportamiento elástico es válida y necesaria, particularmente después de las fases iniciales de carga, donde se estabilizan las deformaciones permanentes.

Esta posición teórica apoya la idea de que los materiales de pavimento, aunque no sean idealmente elásticos, se comportan de manera suficientemente elástica para permitir el uso de teorías y modelos elásticos en su análisis y posterior diseño. Esto facilita un análisis más manejable y práctico, aunque siempre es importante considerar los límites de estas aproximaciones y la naturaleza real de los materiales bajo estudio.

El módulo resiliente se representa por M_R y se calcula con la ecuación (10.1):

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Donde: (10.1)

M_R : *Módulo resiliente*

σ_d : *Esfuerzo desviador*

ε_r : *Deformación axial recuperable*

El módulo resiliente es afectado por el estado de esfuerzos, es decir, el módulo aumenta conforme aumenta el esfuerzo aplicado, asimismo; el módulo se ve influenciado por la naturaleza de los agregados, así como también por el peso volumétrico (Jiménez, 2010, p. 11). Esta característica mecánica se utiliza para definir la rigidez del suelo de la subrasante, y es uno de los insumos más importantes para el método de diseño de pavimentos Mecánico-Empírico (M-E) (Nakhaei & Timm, 2023; Rahman, 2017, p. vii; Schwartz et al., 2011; Sun et al., 2017).

Se tienen los siguientes tipos de módulo resiliente:

A) Módulo resiliente de suelos en laboratorio

Para determinar la respuesta elástica variable de los materiales que conforman la subrasante, se emplean pruebas de laboratorio que aplican cargas cíclicas bajo diferentes estados de confinamiento lateral y esfuerzos axiales en especímenes cilíndricos. (Von & Killingsworth, 1997).

La forma directa de determinar el M_R de un suelo es utilizando un ensayo triaxial de carga repetida (Repeated Load Triaxial - RLT) norma AASHTO T 307-99 - Standard



Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials cuya última actualización corresponde al año 2021, AASHTO T 307-99 (2021). Esta norma cubre los procedimientos para preparar y probar suelos de subrasante no tratados y materiales de base/subbase no tratados para determinar el módulo resiliente (M_R) bajo condiciones que representan una simulación de las condiciones físicas y estados de esfuerzo de los materiales debajo de pavimentos flexibles sometidos a cargas de ruedas móviles. (AASHTO, 2023)

Lo expresado por Von & Killingsworth nos da a entender que el ensayo del módulo resiliente no da como resultado un único valor, sino que define el módulo en diferentes estados de esfuerzo.

En palabras simples, el módulo resiliente del suelo no es más que el módulo elástico que se obtiene a partir de la carga cíclica aplicada a la probeta de material mientras se registran la carga y la deformación. Conociendo el área de la sección transversal de la probeta, la carga (lbs o kgf) se convierte en esfuerzo (psi o MPa). Y conociendo la longitud de la probeta, la deformación (plg o mm) se convierte en deformación (plg/plg). A partir del gráfico de esfuerzo frente a deformación, se obtiene la pendiente. Este es el módulo resiliente (elástico). El ensayo se realiza a aproximadamente 1 ciclo por segundo; normalmente, se promedian las pendientes de los gráficos de tensión-deformación de los últimos cinco ciclos de carga para obtener el (M_R). Dado que M_R es una función del estado de esfuerzo, el proceso anterior se repite a muchos niveles diferentes de carga y presión de confinamiento. (Richardson, 1994)

Se han utilizado varios tipos de relaciones [ver ecuaciones (10.2) y (10.3)] para representar los resultados de los ensayos de módulo resiliente de carga repetida

de suelos de grano grueso y de grano fino. Las dos relaciones a las que hace referencia (AASHTO, 1993) son:

Para capas de suelo granulares:

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

Donde:

θ : Esfuerzo total (suma de los esfuerzos principales)

(10.2)

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

K_1 y K_2 : Constantes de regresión

Para suelo de grano fino:

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

Donde:

(10.3)

σ_d : Esfuerzo desviador

K_1 y K_3 : Constantes de regresión

A partir de estas ecuaciones constitutivas se han estudiado mejoras para diversos casos como, por ejemplo: Aquel modelo que busca reflejar el efecto de los valores de esfuerzo en el M_R (Biswal et al., 2016) así como el modelo recomendado por la AASHTO 2002 – MEPDG (NCHRP, 2004a), ecuación (10.4).

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(1 + \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3}$$

Donde:

θ : Esfuerzo total (suma de los esfuerzos principales)

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

τ_{oct} : Esfuerzo de corte octaédrico

(10.4)

$$\tau_{oct} = \frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}}{3}$$

$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ son el mayor, intermedio y el menor esfuerzo principal respectivamente.

P_a : Presión atmosférica

k_1, k_2 y k_3 : Constantes del modelo

Este modelo puede identificar la respuesta al esfuerzo de los materiales sometidos a cargas repetidas, como la carga de tráfico, en la que se modifican los esfuerzos normales y de corte (Hanandeh et al., 2022).

Aunque los resultados del ensayo de carga repetida son básicamente fiables, puede que no sea fácil hacer la prueba debido al hecho de que la prueba es relativamente compleja y necesita una instalación de laboratorio sofisticada y un técnico cualificado (Khasawneh & Al-jamal, 2019). Como esto no podría ser accesible para muchos laboratorios establecidos para pruebas de rutina en áreas de construcción, métodos alternativos fueron propuestos por diferentes investigadores y las normas de diseño también han establecido recomendaciones de estimar el M_R basadas en estas investigaciones. La mayoría de estos métodos alternativos son modelos predictivos que intentan estimar el M_R a partir de otras propiedades simples del suelo mediante relaciones empíricas. Estos métodos

predictivos pueden ser categorizados como ecuaciones correlativas y ecuaciones constitutivas (Demeke et al., 2023).

Uno de los últimos aportes en cuanto a ecuaciones constitutivas fue realizada por Demeke y otros (2023) quienes proponen la ecuación (10.5):

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_3} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_4} \quad (10.5)$$

B) Módulo resiliente insitu

Para determinar el módulo resiliente in situ a partir de ensayos de corte triaxial de carga cíclica en laboratorio, deben conocerse los esfuerzos de confinamiento y axiales reales e inducir los esfuerzos al terreno en reposo (Von & Killingsworth, 1997).

Para determinar estos valores, deben estimarse o suponerse inicialmente las densidades y los espesores de las capas de la estructura del pavimento. Los siguientes pasos se utilizan para determinar un M_R que sea representativo del estado de esfuerzo insitu.

1. Determinar el coeficiente de presión del suelo, k :

Para suelos cohesivos (arcillas), el coeficiente de empuje del suelo en reposo, k_0 , se considera normalmente como una función de la relación de Poisson, ν , ecuación (10.6):

$$k_0 = \frac{\nu}{(1 - \nu)} \quad (10.6)$$

Para suelos granulares (gravas y arenas), el coeficiente de empuje del suelo en reposo es una función del ángulo de resistencia al corte, (ϕ), ecuación(10.7):

$$k_0 = 1 - \sin \phi \quad (10.7)$$

A medida que la rueda o la carga de prueba se aplica al pavimento y éste comienza a deflexionar, el empuje resultante ejercido por el suelo se aproxima a un valor máximo conocido como empuje pasivo del suelo (k_p), ecuación (10.8):

$$k_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + \frac{2C}{\sigma_z} \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

Donde: (10.8)

σ_z : *Esfuerzo vertical total*

C : *Cohesión del suelo*

Para el análisis estructural de pavimentos con base granular de menos de 0,2 m de espesor y capas superficiales de menos de 25,4 mm de espesor y sin subrasantes estabilizadas, bajo cargas pesadas (mayor que una carga por eje de 80 kN, se debe utilizar el coeficiente de empuje pasivo de suelos. Sin embargo, el coeficiente de empuje de suelos en reposo se utiliza para la mayoría de los tipos de estructuras de pavimento (Von & Killingsworth, 1997).

Para aquellas condiciones cuando se encuentran diferentes tipos de suelo verticalmente en un sondeo o área en particular, el módulo resiliente insitu debe ser determinado para cada capa del subsuelo. Si el módulo resiliente más pequeño se calcula en la parte superior de la subrasante, entonces ese valor se debe utilizar en el diseño para simplificar. Según Von y Killingsworth (1997):

Si el módulo resiliente mayor se calcula en la parte superior de la subrasante, ambos valores pueden considerarse por separado o puede utilizarse el concepto de *rigidez equivalente* para reducir el módulo resiliente mayor a un valor equivalente de la subrasante compuesta mediante la ecuación (10.9):

$$M_R(\text{Equivalente}) = \frac{(D_{S1})^3 M_{R1} + (D_{S2})^3 M_{R2}}{(D_{S1})^3 + (D_{S2})^3}$$

Donde: (10.9)

M_{Ri} : Módulo resiliente de la capa i

D_{si} : Espesor de la capa i

Se debe tomar en cuenta que esta ecuación proporciona un valor de M_R equivalente en una progresiva solamente, en una carretera se tienen normalmente decenas de estos valores con los que mediante el procedimiento denominado “diferencias acumuladas” de AASHTO se puede dividir la vía en tramos de características similares para luego proceder a determinar un valor de diseño de la subrasante para cada tramo o toda la vía según corresponda.

C) Módulo resiliente de diseño

Según (AASHTO, 1993) se debe estimar un módulo resiliente anual equivalente o de diseño para el suelo de subrasante basado en la deformación permanente de la subrasante mediante las ecuaciones (10.10) y (10.11):

$$U_{rs} = 4.022 \times 10^7 [M_R]^{-1.962}$$

Donde: (10.10)

U_{rs} : Factor de daño basado en un criterio de deformación por compresión vertical de la subrasante en la estación i

M_R : *Módulo resiliente efectivo del suelo de subrasante*

$$M_R(\text{Diseño}) = \sum_{i=1}^j \frac{(M_R)_i (U_{rs})_i}{(U_{rs})_i}$$

Donde:

M_R : *Módulo resiliente efectivo del suelo de subrasante* (10.11)

M_{Ri} : *Módulo resiliente del suelo de subrasante en la estación i*

U_{rsi} : *Factor de daño basado en un criterio de deformación por compresión vertical de la subrasante en la estación i*

j : *Número de estaciones*

El M_R efectivo de la subrasante basado en criterios de capacidad de servicio Figura 5 suele ser mayor que el M_R de diseño que se basa en minimizar las deformaciones permanentes en la subrasante debidas a las cargas de las ruedas. Por lo tanto, los diseños de pavimentos flexibles basados en un criterio de serviciabilidad deben comprobarse siempre utilizando criterios de deformación vertical por compresión de la subrasante, como se muestra en la ecuación (10.12):

$$\text{Log } N = 0.955 (\log M_{R\text{Design}}) - 4.082(\log \epsilon_v) - 10.90$$

Donde: (10.12)

N : *Número admisible de aplicaciones de carga para un peso y configuración de eje y una presión de neumáticos específicos*

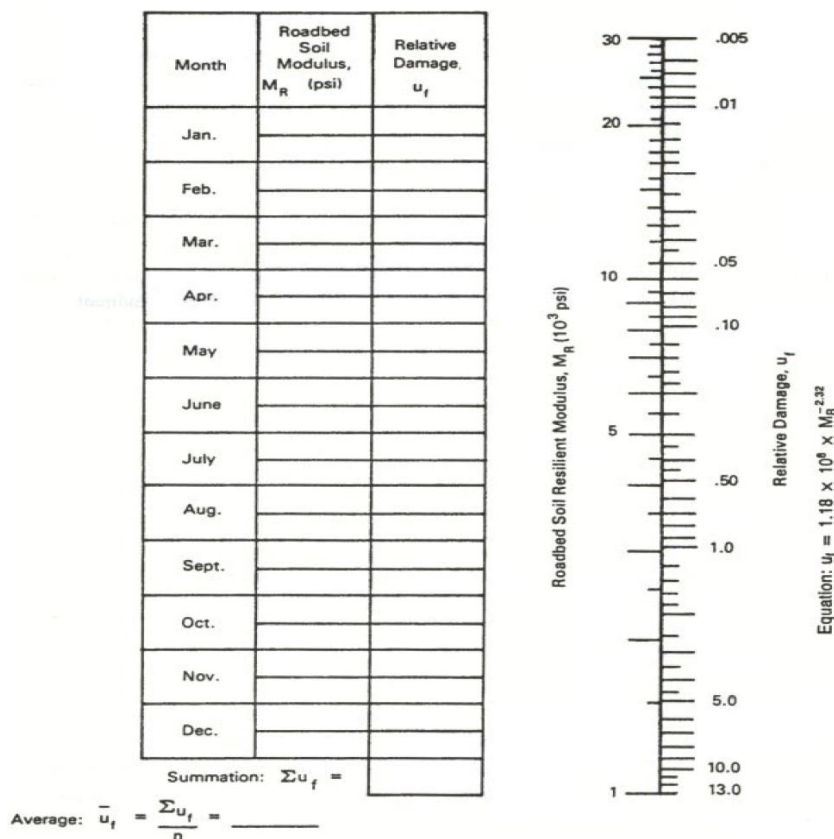
La Guía AASHTO (1993) recomienda que se realice una corrección adicional que considere la variabilidad estacionales de humedad, las heladas y la duración de cada estación. La media ponderada final MR_{sg} ("módulo resiliente efectivo") debe ser el valor utilizado en la ecuación de diseño AASHTO.

El MTC del Perú, dispone estimar el valor de diseño de la subrasante para cada tramo de características homogéneas definidos a partir de valores de diseño de subrasante puntuales (en una progresiva cualquiera) que representan a todos los componentes de la subrasante (de uno a más estrados). Estos componentes varían de acuerdo a: la ubicación de la subrasante (zona en relleno o en corte), a la diferencia de cotas entre el terreno y nivel de subrasante, si el apoyo natural está conformado por roca o por suelo, al nivel freático, entre otros factores.

Después de estimar el valor de diseño de la subrasante en términos de *CBR* se clasifican en categorías, ver Tabla 5.

Figura 5

Módulo resiliente efectiva de subrasantes, por criterios de servicio



Effective Roadbed Soil Resilient Modulus $M_R(\text{psi}) =$ _____ (corresponds to \bar{u}_f)

Nota. Effective Roadbed Soil Modulus M_R . (AASHTO, 1993)

Tabla 5*Categorías de subrasante según el MTC del Perú*

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR <6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR <10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR <20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR <30%
S ₅ : Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

Nota. Manual de carreteras, suelos geología, geotecnia y pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos. Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. Fuente: (MTC-SP, 2014).

Se considera una subrasante aceptable para efectuar el diseño y construcción el que corresponde a la categoría S₂: subrasante regular, cuyo valor de diseño de la sección homogénea o tramo de carretera tenga un *CBR* mayor o igual a 6% y menor a 10% (MTC-SP, 2014).

D) Módulo resiliente mediante retrocálculo

El retrocálculo se refiere generalmente a un procedimiento iterativo mediante el cual las propiedades de las capas del modelo de pavimento se ajustan hasta que las deflexiones calculadas bajo una carga dada coinciden con los valores medidos correspondientes (Saltan & Terzi, 2005, 2009; Zhang et al., 2021).

El retrocálculo es una técnica empleada para evaluar la capacidad estructural de un pavimento que consiste en la determinación de los valores de los módulos de cada una de las capas a partir de las deflexiones medidas sobre su superficie. Este procedimiento también es conocido como cálculo inverso debido a que los datos de entrada son la curva de deformación del pavimento, el espesor de cada una de las capas del pavimento y la carga aplicada a la estructura. (Noriega et al., 2010)



Fwa y Chan (1997) sostienen que, el retrocálculo implica encontrar la mejor combinación de soluciones para los módulos del pavimento en un espacio de búsqueda complejo. Dado que es un problema inverso mal planteado, se han creado numerosos programas y procedimientos informáticos para abordarlo.

Entonces, el retrocálculo es un procedimiento que permite obtener los módulos de los componentes del pavimento a partir de la medición de los cuencos de deflexión producidos por la aplicación de carga controlada, y espesores de dichos componentes.

En general, el retrocálculo puede ser una tarea difícil y la obtención de resultados razonables requiere a veces una experiencia considerable. Siempre es una buena práctica validar los resultados del retrocálculo a partir de otras fuentes, como los módulos medidos en laboratorio (Nakhaei & Timm, 2023).

Esencialmente el retrocálculo es una evaluación mecánica, basado generalmente en el análisis elástico de los cuencos de deflexión de la superficie del pavimento generados por varios dispositivos de deflexión. En el retrocálculo, los cuencos de deflexión superficial medidos y calculados se hacen coincidir (dentro de un margen de error tolerable) y se determinan los módulos de capa asociados necesarios para lograr esa coincidencia. El proceso de retrocálculo suele ser iterativo y normalmente se realiza con software de microordenadores. (WSDOT, 2005, p. 13)

En nuestro país actualmente se utilizan el deflectómetro de impacto y el deflectómetro de impacto ligero (FWD) y (LFWD) respectivamente, en reemplazo de la Viga Benkelman (VB), sin embargo; estos instrumentos aún son de difícil acceso por parte de los profesionales del interior del país y de muchos lugares en

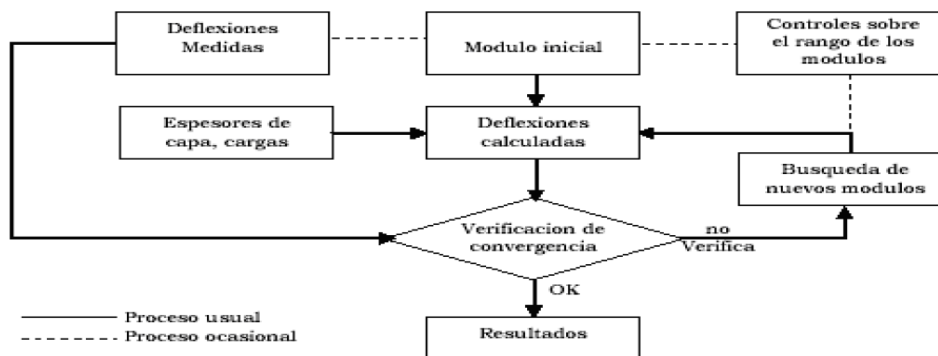
todo el mundo (Gutiérrez, 2007; Sanjay et al., 2022). Desde el punto de vista práctico la diferencia entre el uso de una VB o algún equipo de última generación para deflectometría se resume en la precisión de la medición de la deflexión y forma del cuenco de deflexión. El asunto más importante es el modelo utilizado para predecir los módulos resilientes de los componentes estructurales. En el presente estudio abordamos esa problemática.

En EE.UU. se usan pavimentos flexibles con fundaciones mejoradas, donde los materiales de la subrasante no son óptimos. Aunque son comunes, existen muy pocos datos empírico-mecánicos y pocos estudios mecanísticos sobre su comportamiento (Nakhaei & Timm, 2023). El retrocálculo es una determinación mecanicista de los módulos de las capas del pavimento a partir de las deflexiones medidas en superficie, a su vez constituye una parte esencial de un sistema de gestión de pavimentos eficaz (Rahman & Vargas-Nordcbeck, 2021).

Para mejorar la comprensión de los fundamentos, el diseño general y el comportamiento de los pavimentos flexibles con subrasantes mejoradas, es necesaria una evaluación a escala real (Nakhaei & Timm, 2023).

Figura 6

Diagrama de flujo del proceso de retrocálculo



Nota. Tomada de (INVIAS, 2008, p. 224)



El retrocálculo es una determinación mecanicista de los módulos de la capa de sección del pavimento a partir de las respuestas del pavimento medidas en superficie, que constituye una parte esencial de un sistema eficaz de gestión de pavimentos (Rahman & Vargas-Nordcbeck, 2021). Para resolver las dificultades a menudo encontradas en el retrocálculo, se han propuesto varias técnicas estáticas, dinámicas y adaptativas, como los métodos de mínimos cuadrados (por ejemplo, EVERCALC), la búsqueda en bases de datos (por ejemplo, MODULUS), técnicas de soft computing como redes neuronales, sistemas neuro-fuzzy y algoritmos genéticos (Harichandran et al., 1993). Asimismo, se han establecido procedimientos como el mostrado en la Figura 6.

Sun y otros (2017) califican como complicado al ensayo triaxial cíclico en laboratorio, por otro lado Piratheepan y Gnanendran (2013) afirmaron que el retrocálculo del M_R de la subrasante según la teoría elástica o el método numérico es más conveniente y fiable. Según Wu et al. (2020), uno de los retos del retrocálculo es tener en cuenta los efectos de las cargas en movimiento, como la velocidad del tráfico, la carga dinámica y el ángulo de desfase del cuenco de deflexión. Otro desafío es considerar la variación del espesor de la capa de pavimento y las propiedades del material en el campo, especialmente para la subrasante de grano fino que es susceptible a la deformación permanente bajo carga cíclica (Sun et al., 2017).

El método de retrocálculo se utiliza ampliamente para la evaluación de pavimentos y el diseño de rehabilitación, ya que puede proporcionar información sobre el estado estructural y el desempeño de las capas. Por lo tanto, se han desarrollado diferentes métodos de retrocálculo basados en diferentes supuestos, modelos y

algoritmos, como el método de elementos finitos, el filtro de Kalman, la red neuronal, el algoritmo genético, etc. (Sun et al., 2017; Wu et al., 2020).

2.4. Modelos y algoritmos de retrocálculo

A) *Sistema de dos capas (bicapa)*

El sistema bicapa de Burmister (1945) es un modelo matemático que permite calcular los esfuerzos y deformaciones en un pavimento formado por dos capas de material elástico (Ishihara, 1962; Péterfalvi et al., 2015). Los pavimentos flexibles típicos se componen de capas de forma que los módulos de elasticidad disminuyen con la profundidad (Yoder & Witczak, 1975).

Exactamente un sistema bicapa es la construcción de un pavimento flexible full-depth se coloca directamente sobre la subrasante. Si un pavimento se compone de tres capas (por ejemplo, una capa superficial asfáltica, una capa base granular y una subrasante), es necesario combinar la capa base y la subrasante en una única capa para calcular los esfuerzos y deformaciones en la capa asfáltica o combinar la capa superficial asfáltica y la capa base para calcular los esfuerzos y deformaciones en la subrasante. (Huang, 2004)

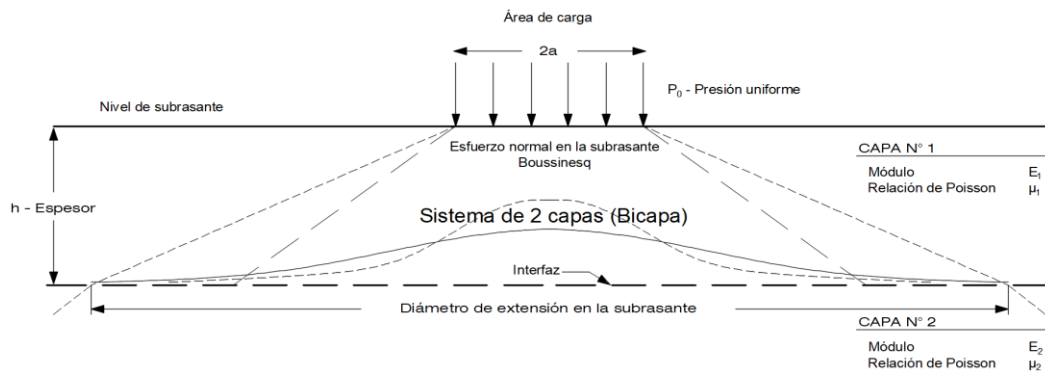
Cuarenta años después del desarrollo del análisis de Boussinesq, Westergaard en 1,926 desarrolló su propio análisis para la determinación de esfuerzos en un sistema de dos capas, donde la primera capa consistía en una losa de concreto. Aunque esta teoría no cubría el caso de los pavimentos flexibles, desencadenó el desarrollo del análisis de pavimentos flexibles de dos capas. (Nikolaidis, 2015)

El sistema de dos capas, como un paso hacia una mayor aproximación a las condiciones reales, se ilustra en la Figura 7. Consiste en una capa superficial N° 1

de espesor finito h que se apoya continuamente sobre la capa N° 2 de espesor infinito, con diferentes propiedades de resistencia (Burmister, 1945).

Figura 7

Sistema de 2 capas (Bicapa)



Nota. El gráfico muestra el sistema bicapa de Burmister. Adaptada y traducida de (Burmister, 1945)

Está claro que el sistema de dos capas se adapta de forma ideal al diseño del experimento propuesto en el presente estudio, sin embargo; se debe evaluar el hecho mencionado por Huang (2004) que sostiene que, el pavimento bicapa está compuesto por una capa de asfalto en caliente (Hot Mix Asphalt – HMA) apoyada sobre la subrasante. (Burmister, 1945; Nikolaidis, 2015; Yoder & Witczak, 1975) hacen referencia a capas de base y subrasante en donde esta última es de espesor infinito, a esto se debe agregar que, las diferencias entre una y otra capa del sistema explicadas son el espesor y las propiedades mecánicas para el análisis lineal E y ν . Por lo tanto, se asume que el sistema de dos capas es aplicable a nuestro caso, tal como se observa en la Figura 7.

La solución general del problema de dos capas requiere que se hagan suposiciones necesarias de la teoría de la elasticidad y, además, que se satisfagan ciertas condiciones esenciales de contorno y de continuidad a través de la interfaz entre las dos capas (Burmister, 1945).



Estas simplificaciones o suposiciones son las siguientes: (a) el material de cada capa se considera elástico, homogéneo e isótropo; (b) la primera capa tiene dimensión infinita en el nivel horizontal y dimensión finita en el nivel vertical; (c) la segunda capa (subrasante) tiene dimensiones infinitas en los niveles horizontal y vertical; (d) la superficie superior de la primera capa no está sometida a ninguna otra carga horizontal o vertical, excepto la carga de tráfico; y (e) la primera capa tiene un módulo de elasticidad superior o igual al de la segunda capa. (Nikolaides, 2015)

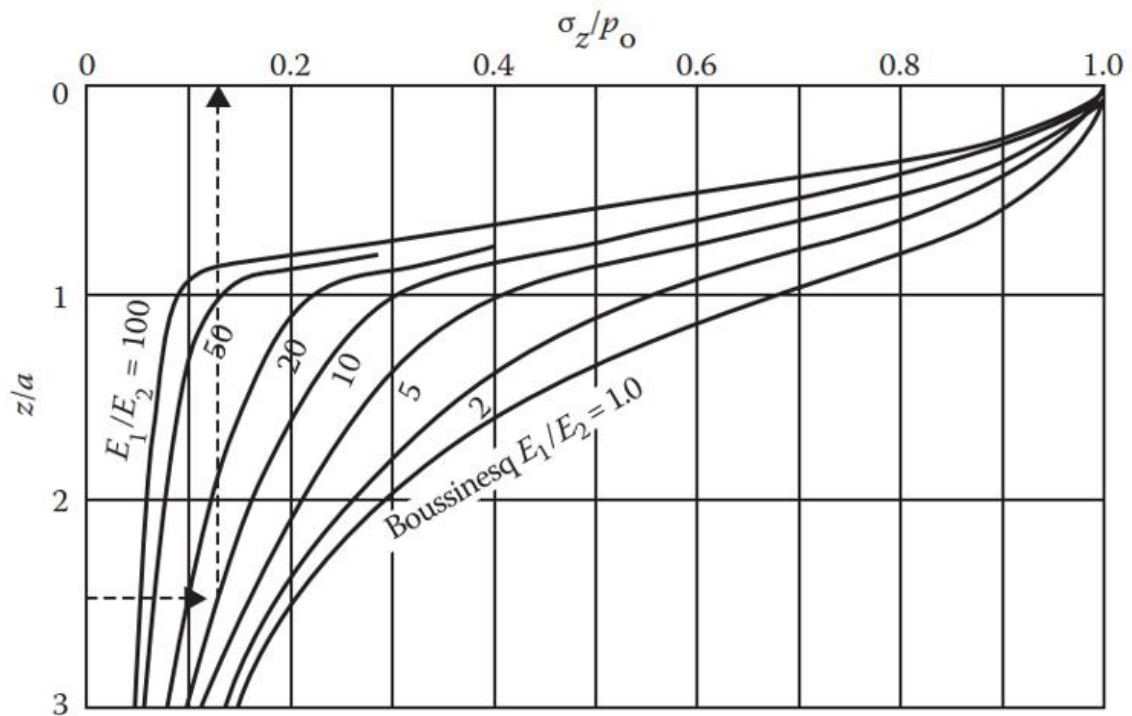
Los esfuerzos en un sistema bicapa están supeditados a la relación modular E_1/E_2 y la relación espesor-radio h_1/a . La Figura 8 permite ver efecto de una capa de pavimento sobre la distribución de esfuerzos verticales bajo el centro de un área circular cargada.

En la Figura 8, los esfuerzos verticales de Boussinesq en la interfaz base-subrasante ($E_1/E_2 = 1$) son aproximadamente el 70% de la presión aplicada, mientras que según la teoría de dos capas para una base con un módulo 100 veces superior al de la subrasante, los esfuerzos son aproximadamente el 10% de la presión aplicada (Yoder & Witczak, 1975).

El sistema bicapa de Burmister se basa en las ecuaciones de elasticidad y en la teoría de Boussinesq.

Figura 8

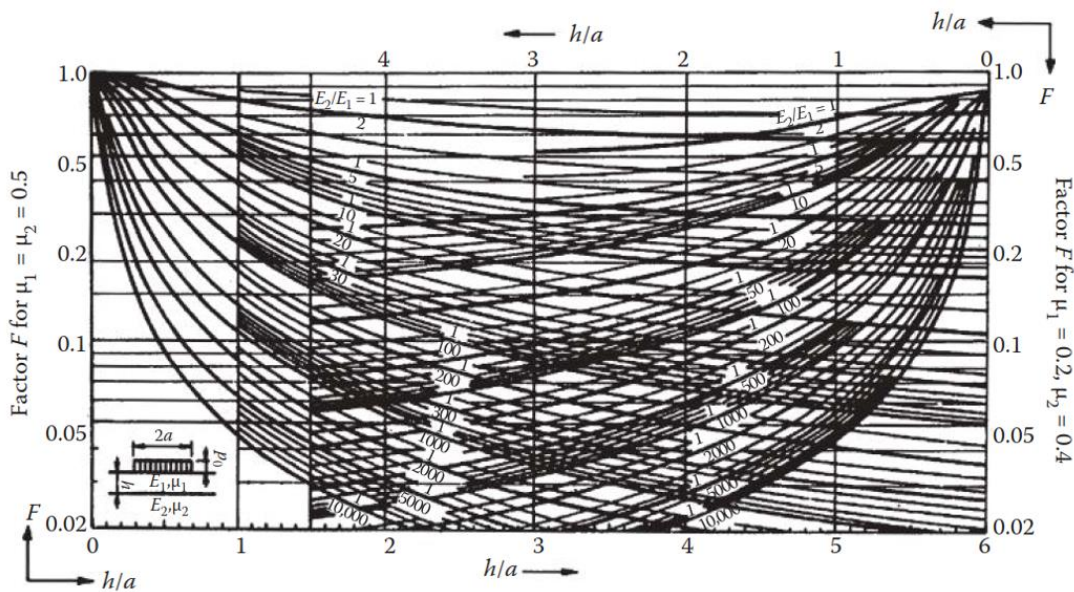
Determinación del esfuerzo vertical según la teoría de Burmister



Nota. Tomada de (Nikolaides, 2015, p. 497)

Figura 9

Factor F para el cálculo de deflexiones en un sistema bicapa



Nota. Tomada de (Nikolaides, 2015, p. 497)

La deflexión vertical en la superficie se calcula con la ecuación (10.13):

$$w_0 = \frac{1.5qa}{E_2} F$$

Donde:

w_0 : Deflexión vertical para $z=0$

q : Esfuerzo vertical

(10.13)

a : Radio de contacto

F : Factor "F" de deflexión bicapa

E_2 : Módulo elástico de la capa 2

B) Método de Odemark

El método Odemark, también conocido como el método de transformación Odemark o el concepto de espesor de capa equivalente (ELT), es una técnica utilizada en la ingeniería de pavimentos para el análisis y diseño estructural (Horak, 1988).

Se trata de un enfoque simplificado que permite la aproximación de los espesores de las capas del pavimento y las propiedades de los materiales, lo que lo convierte en una herramienta útil sobre el terreno (Ahmed, 2014). El método Odemark se basa en la teoría elástica multicapa, que supone que cada capa de una estructura de firme se comporta como un material elástico con propiedades específicas.

C) Método AASHTO 1993

Según (AASHTO, 1993), Parte III, Capítulo 5, afirma que, el valor de M_R de la subrasante puede calcularse a partir de los datos de ensayos no destructivos (Non Destructive Test - NDT) mediante la ecuación (10.14):

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r}$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente retrocalculado de la subrasante. **(10.14)**

P : Carga aplicada en un área circular.

d_r : Deflexión medida a una distancia radial "r"

r : Distancia radial de donde se mide la deflexión

El producto ($d_r r$) debe obtenerse en un punto del cuenco de deformación alejado del punto de aplicación de la carga, a una distancia tal que predomine la influencia de la subrasante, pero este punto no debe estar tan alejado que la medición de las deflexiones pierda precisión con cualquier tipo de equipo. AASHTO recomienda que el valor de (r_i) sea al menos el 70% del valor del radio del bulbo de esfuerzos (a_e) en la interfaz pavimento-subrasante. El radio del bulbo de esfuerzos se calcula mediante la ecuación (10.15):

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D \cdot \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2 \right]} \quad \text{(10.15)}$$

El módulo efectivo del pavimento (E_p) se calcula iterativamente utilizando la ecuación (10.16) hasta que el valor del segundo miembro sea igual al valor de la deflexión máxima (d_0) medida en el punto donde se aplica la carga:

$$d_0 = 1.5 \times p \times a \left[\frac{1}{M_R \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}}\right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}\right]}{E_p} \right]$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente de la subrasante

(10.16)

E_p : Módulo resiliente efectivo del pavimento

D : Espesor total de las capas de la subrasante (pavimento)

a : Radio del área circular donde se distribuye la carga

a_e : Radio del bulbo de esfuerzos en la interfaz pavimento-subrasante

p : Presión de contacto

r_i : Distancia radial desde el punto i

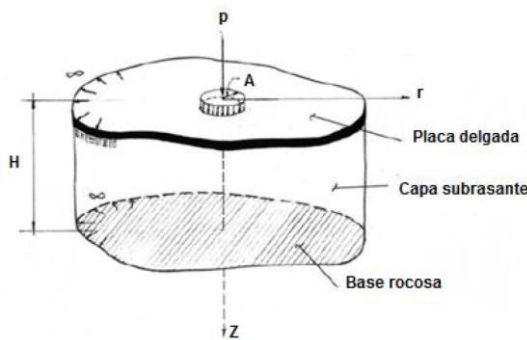
d_0 : Deflexión máxima

D) Método de Hogg Modificado

El método de Hogg modificado, publicado en 1977, propone calcular el módulo elástico del suelo de subrasante bajo una carga superficial usando un modelo bicapa que simplifica el sistema multicapa.

Figura 10

Modelo de Hogg



PARÁMETROS BÁSICOS DEL MODELO		
	$D = \frac{E_p \cdot h_p^3}{12(1 - \mu_p^2)}$	Rigidez a la flexión de la placa (t - m)
	$L_0 = \left(\frac{D(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)E_{sg}}\right)^{\frac{1}{3}}$	Longitud característica (cm)
	E_{sg}	Módulo de elasticidad de la subrasante ($\frac{kg}{cm^2}$)
	μ_0	Módulo de Poisson de la subrasante (adimensional)
	H	Profundidad del estrato rocoso (cm)
Parámetros de Evaluación	L_0, E_{sg}, D	Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas

Nota. Tomada de (Balarezo, 2017)

Tabla 6

Ecuaciones para la obtención de parámetros de evaluación

Parámetros de Evaluación- Método Numérico		Ecuación
Módulo de elasticidad de la subrasante según Hogg.	$E_{sg} = I \frac{(1 + u_0)(3 - 4u_0)}{2(1 - u_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left[\frac{P}{D_0 x L_0} \right]$	A
Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión máxima.	$r_{50} = R \frac{\left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{D_0}{D_R} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} - B}$	B
Longitud característica de la curva de deflexión.	$L_0 = \frac{y_0 r_{50} + [(y_0 r_{50})^2 - 4mAr_{50}]^{\frac{1}{2}}}{2}$ Si $\frac{A}{L_0} < 0.2$, entonces $L_0 = (y_0 - 2m)r_{50}$	C
Relación entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida.	$\left(\frac{S_0}{S} \right) = 1 - \bar{m} \left(\frac{A}{L_0} - 0.1 \right)$ Si $\frac{A}{L_0} < 0.2$, entonces $\left(\frac{S_0}{S} \right) = 1$	D

Nota. De (Hoffman, 1977), adaptada por (Balarezo, 2017)

Tabla 7

Coeficientes para el modelo de Hogg

Ecuación	CASOS		I	II	III
	Profundidad del estrato rígido	h/L_0	10	10	Infinito
Coefficiente de Poisson	u_0	0.50	0.40	Todos	
A	Factor de influencia	I	0.1614	0.1689	0.1925
B	Valor de D_R/D_0		>0.70	>0.426	Todos
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$1/\alpha$	2.460	2.629	3.115
		$1/\beta$	0.592	0.548	0.584
		B	0	0	0
	Valor de D_R/D_0		<0.70	<0.426	
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$1/\alpha$	371.1	2283.4	
$1/\beta$		0.219	0.2004		
B		2	3		
C	$L_0 = f(r_{50}, \alpha)$	y_0	0.620	0.602	0.525
		m	0.183	0.192	0.180
D	$\frac{S_0}{S} = f\left(\frac{A}{L_0}\right)$	\bar{m}	0.52	0.48	0.44

Nota. Adaptada de (Wiseman et al., 1977) por (Del Águila R., 2007)



E) Huang 1969

El Dr. Yang H. Huang ha realizado importantes contribuciones al análisis de estructuras de pavimento, utilizando métodos como el análisis de elementos finitos y la metodología mecánica empírica para el diseño de pavimentos. Huang ha abordado aspectos fundamentales en la ingeniería de pavimentos, incluyendo la determinación de esfuerzos críticos, deflexiones, propiedades de los materiales componentes, factores climáticos, y la caracterización del pavimento.

Los pavimentos flexibles son sistemas estratificados con mejores materiales encima y no pueden representarse como medio homogéneo, por lo que utilizar la teoría estratificada de Burmister resulta más apropiada. Burmister (1943) desarrolló en primer lugar soluciones para un sistema bicapa y luego las amplió a un sistema tricapa (Burmister, 1945). Con la llegada de los ordenadores, es posible aplicar la teoría a un sistema de "n" capas (Huang, 1967, 1968).

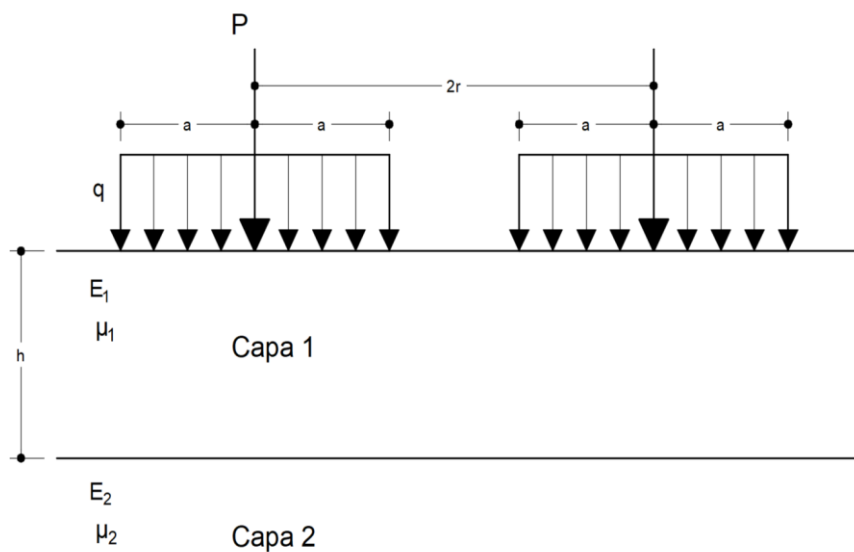
La Figura 11 muestra un sistema de dos capas. Los supuestos básicos que deben cumplirse son:

1. Homogeneidad, isotropía y comportamiento lineal elástico de cada capa, con un módulo E y coeficiente de Poisson μ .
2. El material carece de peso y es de extensión superficial infinita.
3. A diferencia de los estratos superiores que tienen espesores definidos, la capa de fondo se considera de profundidad ilimitada.
4. La estructura recibe en su superficie superior una carga distribuida homogénea de magnitud q, actuando sobre un área circular de radio a.

5. La interacción entre capas sucesivas respeta los principios de continuidad, manteniendo valores idénticos de tensiones y desplazamientos en ambas direcciones principales.

Figura 11

Diagrama de cuerpo libre de un sistema de dos capas



Nota. P: Carga aplicada en un neumático, q: Esfuerzo por cargas distribuida circular, a: Radio de carga distribuida circular, E_i : Módulo resiliente de la capa i, m_i : Coeficiente de Poisson de la capa i

Una de las contribuciones al análisis estructural de pavimentos por el Dr. Huang es el programa informático KENPAVE, en el que Kenlayer se aplica a los pavimentos flexibles. La columna vertebral de Kenlayer es la solución de un sistema elástico de varias capas bajo una zona circular cargada.

Las soluciones se superponen para las ruedas múltiples, se aplican de forma iterativa para las capas no lineales y se colocan en varios momentos para las capas viscoelásticas. Como resultado, Kenlayer puede aplicarse a sistemas de capas bajo ruedas simples, dobles, dobles tándem o dobles trídem de desempeño en cada capa de forma disímil: elástica lineal, elástica no lineal o viscoelástica. El estudio

de daños puede realizarse en 12 periodos al año, cada periodo de propiedades particulares del material. 12 grupos de carga como máximo por cada periodo, simples o múltiples. El daño causado por la fisuración, fatiga y la deformación permanente de cada periodo sobre todos los grupos de carga se suma para evaluar la vida de diseño (Huang, 2004).

2.5. Deflectometría

La deflexión en un pavimento es una deformación temporal que desaparece cuando se retira la carga que la produce. En la deformación viscoelástica, existe un cierto lapso de tiempo entre la retirada de la carga y la recuperación completa de la deformación. En la deformación elástica, la recuperación se produce inmediatamente después de retirar la carga, este último es el caso de los pavimentos (Carneiro, 1966). Equipos de medición deflectométrica

A) Equipos de medición deflectométrica

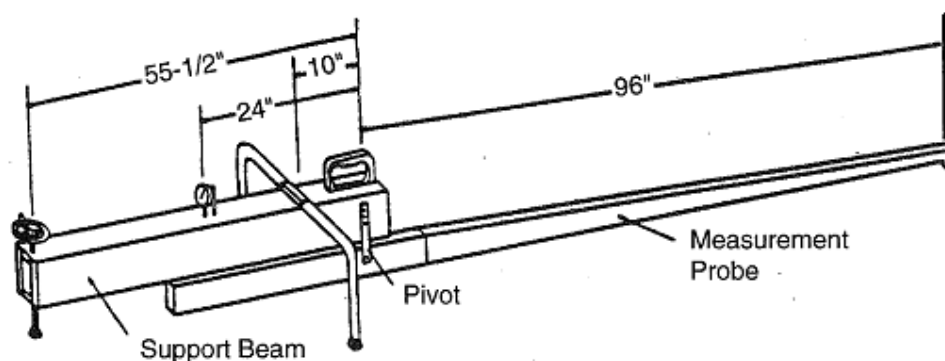
La medición de deflexiones en estructuras de pavimento es esencial para evaluar su condición estructural y predecir su vida útil. Aquí tienes una lista de equipos comúnmente utilizados para medir deflexiones en estructuras de pavimento:

Viga Benkelman (VB): Es un dispositivo simple y tradicional que utiliza un sistema de palanca para medir la deflexión del pavimento bajo una carga estática.

El deflectómetro de viga Benkelman fue el primer método desarrollado para la medición de las deflexiones del pavimento y es económico y fácil de conseguir, sin embargo; presenta un alto grado de incertidumbre, ya que no simula las cargas de tráfico en movimiento (Sanjay et al., 2022).

Figura 12

Viga Benkelman de un brazo



Nota. Tomada de https://www.pavementinteractive.org/wp-content/uploads/2010/01/Benkelman_beam.jpg

Falling Weight Deflectometer (FWD): Este es un equipo más avanzado que simula la naturaleza dinámica de las cargas vehiculares. Mide la deflexión del pavimento por una masa conocida en caída libre desde una altura establecida.

Figura 13

Viga Benkelman de un brazo, marca Humboldt, serie H-322



Nota. Deflectometría en tramo experimental del presente estudio. Uso de la viga Benkelman Humboldt H-322.

Figura 14

FWD Dynatest, modelo 8000 montado en remolque



Nota. Tomada de

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/07040/images/figure6.jpg>

Heavy Weight Deflectometer (HWD): Similar al FWD, pero diseñado para aplicar cargas más pesadas, el HWD es utilizado principalmente para pavimentos con capacidad para soportar tráfico pesado.

Figura 15

Deflectómetro para cargas pesadas, Dynatest



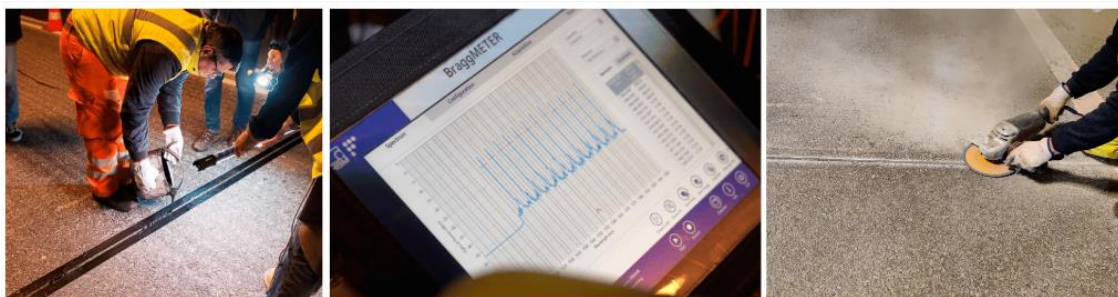
Nota. Tomada de: <https://dynatest.com/wp-content/uploads/2022/11/Jan-Winterskov-Dubai-International-Airport-2-nyt-logo.jpg>

Dynaflect: Este equipo mide la deflexión y la recuperación del pavimento bajo cargas dinámicas, utilizando un sistema de masa oscilante.

Pavement Response Monitoring System (PRMS): Es un sistema avanzado que utiliza sensores instalados en el pavimento para medir la deflexión bajo cargas de tráfico en tiempo real.

Figura 16

Instalación de los sensores (PRMS) en el pavimento



Nota. Tomada de (Rebelo et al., 2023)

Light Weight Deflectometer (LWD): Similar al FWD, pero diseñado para cargas más ligeras, es ideal para aplicaciones en pavimentos más delgados o durante la fase de construcción.

Figura 17

Light Weight Deflectometer (LWD)

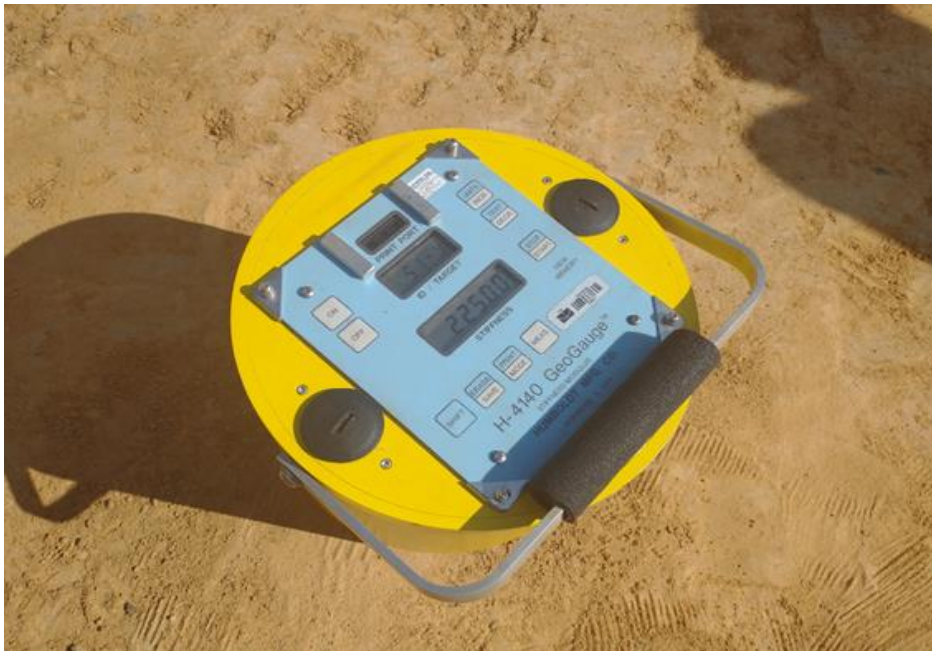


Nota. Tomada de: <https://alatuji.co.id/wp-content/uploads/2021/09/image-040.jpg>

GeoGauge: Utiliza vibraciones de alta frecuencia para medir la rigidez del pavimento, lo que indirectamente proporciona información sobre la deflexión.

Figura 18

GeoGauge, marca Humboldt serie H-4140



Nota. Tomada de: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/equipes-do-dnit-monitoram-pavimento-de-segmentos-experimentais-no-ambito-do-pro-medina/medina6.png>

2.3. Marco conceptual

A) Retrocálculo

Procedimiento que permite obtener el módulo resiliente de cada uno de los componentes de la subrasante a partir de la medición de su espesor y los cuencos de deflexión utilizando equipos como viga Benkelman o Falling Weight Deflectometer (FWD).

B) Valor de diseño de la subrasante

Es la capacidad de resistencia estructural de la subrasante expresada en unidades de esfuerzo, determinada por procedimientos establecidos de métodos



de diseño estructural de pavimentos o normas de diseño y construcción de obras viales.

C) Subrasante

La subrasante es una estructura delimitada en su superficie denominada nivel de subrasante, puede estar compuesta por una o más capas de suelos de calidad especificada dependiendo de su ubicación en una sección en corte o en relleno, nivel freático, diferencia de cotas entre el nivel de subrasante - terreno natural y características del suelo o roca natural.

D) Capa de mejoramiento

Capa de refuerzo de la subrasante de espesor establecido por diseño, generalmente colocada sobre el suelo natural compactado, generalmente compuesto por material de préstamo de cantera.

E) Deflectometría

Procedimiento de medición de deflexiones medidas a nivel de subrasante o superficie de capas componentes de la subrasante o estructura del pavimento, utilizando viga Benkelman o deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer – FWD).



CAPÍTULO III METODOLOGÍA

La secuencia metodológica expuesta a continuación permite determinar la influencia que tiene el eCM sobre el M_R de la subrasante del tramo experimental a 3825 m.s.n.m. utilizando retrocálculo de deflexiones obtenidas con viga Benkelman. Se construyó tramos de subrasante mejorada (grupo control y grupos experimentales) a escala real en la zona sur de la ciudad de Juliaca.

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo de investigación

Considerando los principios de parsimonia, exhaustivo y excluyente (Supo & Zacarías, 2020) se plantea cuatro clasificaciones operativas del presente trabajo de investigación, ver Tabla 8.

Tabla 8

Clasificación de la investigación

Criterio	Tipo
<ul style="list-style-type: none">Según la intervención del investigadorSegún el control de la medición de la variable de estudioSegún el número de mediciones de la variable de estudioSegún el número de variables analíticas	<ul style="list-style-type: none">Con intervenciónCon control de la mediciónLongitudinalCon más de una variable

El método empleado es inductivo-deductivo, con un tratamiento de los datos, enfoque cuantitativo.

3.2. Diseño experimental

El diseño del estudio es cuasi-experimental, consistió en un grupo de control y cuatro grupos experimentales. El grupo de control fue una subrasante compuesta únicamente por suelo natural. Los cuatro grupos experimentales estuvieron compuestos por suelo natural y capas de mejoramiento de suelo granular de 0.15, 0.30, 0.45 y 0.60m de espesor, respectivamente

G_c		M_1
G_1	(X_1)	M_2
G_2	(X_2)	M_3
G_3	(X_3)	M_4
G_4	(X_4)	M_5

Donde:

G_c : Grupo control

G_i : Grupo experimental "i"



M_i : Prueba deflectométrica en el grupo control y experimental "i"

X_i : Tratamiento "i", consistente en refuerzo de la subrasante con una capa de mejoramiento de espesor (0.15, 0.30, 0.45 y 0.60m).

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Población infinita compuesta por subrasantes para pavimentos de la zona Sur de la ciudad de Juliaca.

3.3.2. Muestra.

La muestra fue determinada por procedimiento no probabilístico a conveniencia del investigador. Está compuesta por la subrasante del tramo de experimentación de 50m de longitud por 4m de ancho.

3.4. Procedimientos

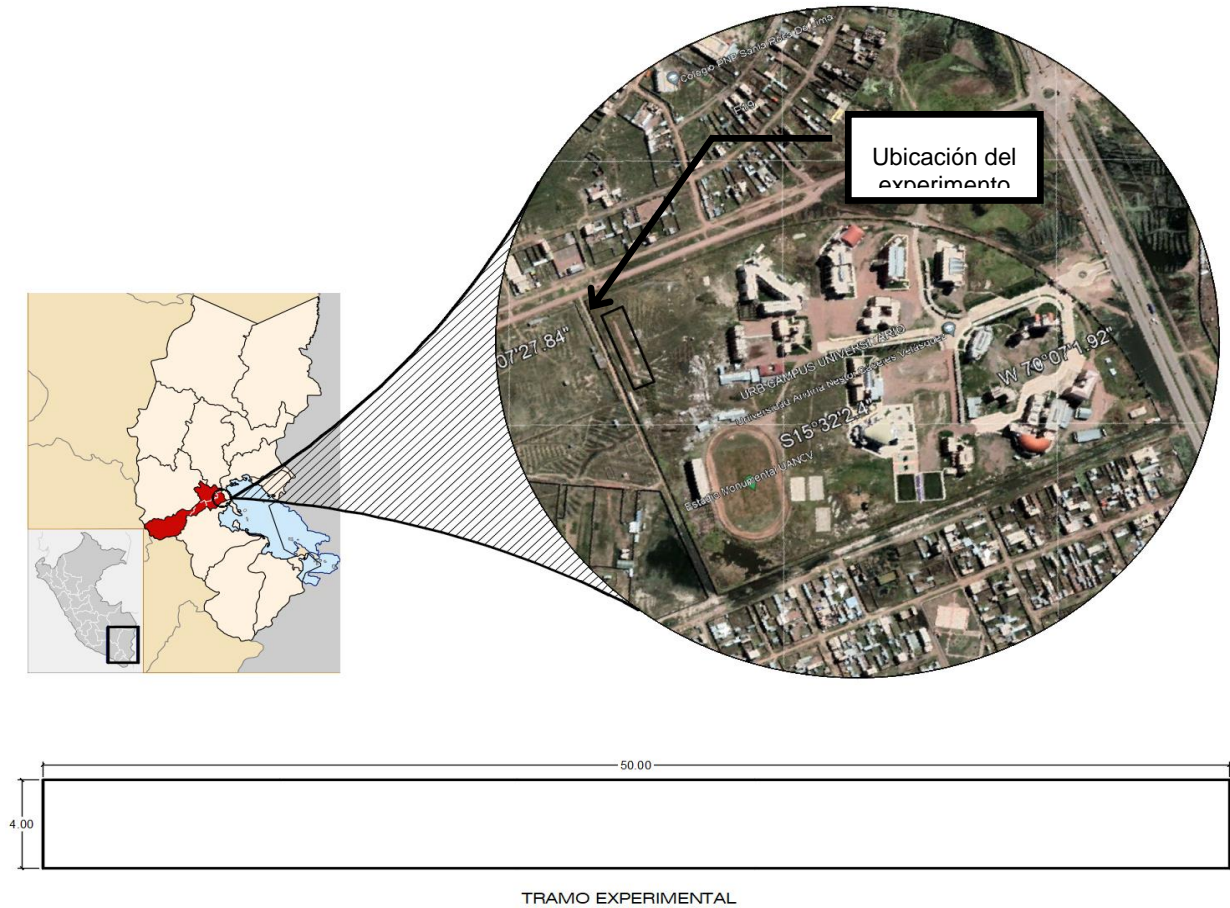
3.4.1. Construcción del tramo experimental

Ubicación

El tramo de control y experimental se ubica en la Región Puno, Provincia de San Román, Distrito de Juliaca, Campus de la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez - UANCV, en un área de 50m de largo por 4m de ancho ubicado al norte del Estadio Monumental de la UANCV.

Figura 19

Ubicación del tramo de control y experimental



Nota. Coordenadas UTM: 379577.94 m E, 8282406.62 m S, de Google Earth Pro 7.3.6.9345

Composición

El tramo de prueba tiene una longitud de 50m dividida en cinco tramos de 10m cada uno. El primer tramo denominado Tramo I corresponde al grupo de control y no tiene refuerzo de capa de mejoramiento, los tramos II al V tienen refuerzo que varía de 0.15m a 0.60m según el detalle mostrado en la Tabla 9,

Figura 20 y Figura 21.

Tabla 9

Composición y denominación de los tramos a escala real

Tramo	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor de la capa de relleno (m)	Grupo Experimental
I	10	4	0.00	Control
II	10	4	0.15	1
III	10	4	0.60	2
IV	10	4 </td <td>0.45</td> <td>3</td>	0.45	3
V	10	4	0.30	4

Figura 20

Tramo experimental – vista en planta

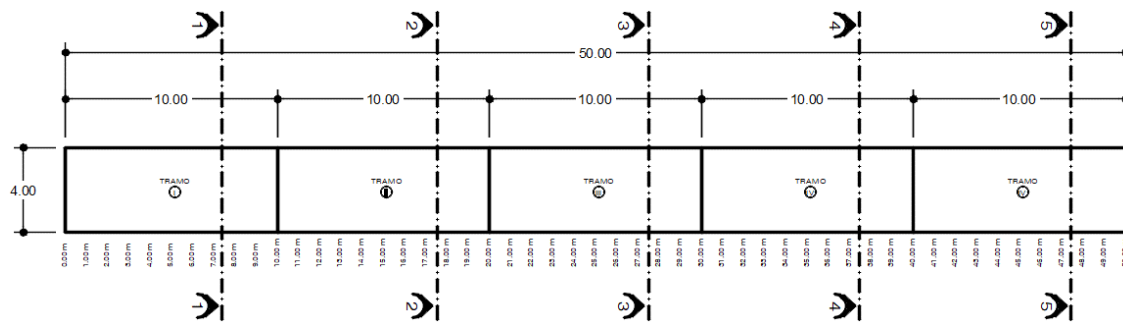
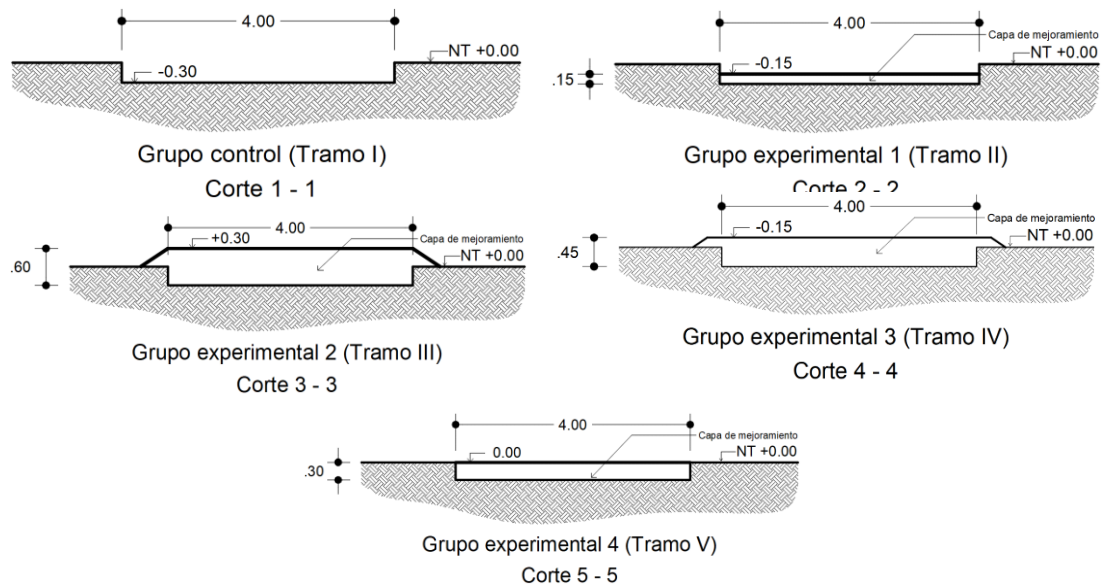


Figura 21

Secciones transversales de los grupos experimentales y de control





Proceso constructivo

Para su construcción se empleó equipo mecánico para la conformación y compactación de las capas de mejoramiento de la subrasante (motoniveladora, camión cisterna y rodillo liso vibratorio); para el transporte del material de préstamo se utilizó volquetes de 15m³; para el control de niveles se utilizó un equipo topográfico (Nivel, mira y jalones) y equipos de ensayos de mecánica de suelos de campo (CBR in situ, Cono de arena y Viga Benkelman, entre otros). Se siguieron los procedimientos especificados en las (EG-MTC, 2015) y (MTC-SP, 2014).

Control de calidad

El control de calidad de la construcción del tramo experimental se realizó considerando las "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción" (EG-MTC, 2015) y el "Manual de Ensayo de Materiales" (MTC-EM, 2016) ambos del "Ministerio de Transportes y Comunicaciones" del Perú.

- Equipo topográfico compuesto por nivel, mira y jalones para el control de niveles y alineamientos.
- Equipo de CBR in situ, para medir el valor relativo de soporte del suelo natural, según la norma MTC E-133
- Viga Benkelman de brazo simple, según lo normado en MTC E-1002
- Camión de dos ejes, con eje posterior de tipo simple dual cargado con 8.2 t, neumáticos con una presión de inflado de 5.6 Kg/cm², distancia entre centro de llanta de 32 cm.
- Equipo de CBR de laboratorio para medir el valor relativo de soporte del suelo de mejoramiento, según lo especificado por la norma MTC E-132.
- Equipo de proctor modificado según lo especificado en la norma MTC E-115.



- Equipo de densidad de campo – cono de arena, para determinar el grado de compactación del suelo natural y las capas de relleno, según norma MTC E-117.
- Equipo para determinar límites de Atterberg (LL, LP) en laboratorio, norma MTC E-110 y MTC E-111.
- Juego de tamices para análisis granulométrico mecánico según norma MTC E-107.
- Otros equipos e instrumentos menores.

3.4.2. Análisis de Datos

Los datos registrados de deflexiones de los tramos experimentales y de control fueron sometidos a pruebas de normalidad, utilizando el software IBM SPSS Statistics v. 26, en la

Tabla 10 se presentan los resultados del análisis de normalidad.

El p-valor (%) = 20.00 indica que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula a un nivel de confianza del 95%. Esto sugiere que, con base en la prueba de Kolmogorov-Smirnov corregida por Lilliefors, no se puede afirmar que los datos se desvíen significativamente de una distribución normal. Ver en el (Anexo H) el procedimiento completo de la prueba de normalidad realizada.

Tabla 10

Resultados de prueba de normalidad de deflexiones

Medidas	Espesor de la capa de mejoramiento (m)				
	0.00	0.15	0.30	0.45	0.60
Media 10 ⁻² mm	344.40	289.33	205.73	166.93	151.73
Error estándar de la media	24.98	15.15	10.07	7.66	9.45
IC 95% Límite inferior	295.44	259.64	184.14	151.93	133.22
IC 95% Límite superior	393.36	319.02	227.33	181.94	170.25
Nivel de significancia (α)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
p-valor (%)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00

Nota. La media, el error estándar y los límites inferior y superior del intervalo de confianza están expresadas en unidades de 10⁻²mm. Prueba de Kolmogorov-Smirnov, corregido por Lilliefors

3.4.3. Análisis estructural

A) Modelo de Hogg modificado

Se aplicó el procedimiento establecido en (Hoffman, 1977), el modelo se presenta en la Figura 10, fórmulas de la Tabla 6 y Tabla 7, se consideraron los casos $h/L_0=10$ y $h/L_0=\infty$ (casos II y III) donde h representa la distancia de la superficie de aplicación de carga y una base rocosa.

Una vez obtenido el módulo de elasticidad (entendido como estático) de la subrasante según Hogg (E_{sg}), ecuación (15.1).

$$E_{sg} = I \frac{(1 + u_0)(3 - 4u_0)}{2(1 - u_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left[\frac{P}{D_0 L_0} \right]$$

Donde:

E_{sg} : Módulo de elasticidad de la subrasante.

u_0 : Relación de Poisson de la subrasante

S_0 : Rigidez teórica por carga puntual

S : Rigidez del pavimento = P/D_0 (carga distribuida) **(15.1)**

P : Carga aplicada

D_0 : Deflexión máxima

D_R : Deflexión a una distancia radial "R"

R : Distancia radial desde el punto inicial de carga

r_{50} : Distancia radial donde $(D_R/D_0) = 0.5$

L_0 : Longitud característica

I : Factor de influencia

Obtenemos el módulo resiliente dinámico a 1Hz según el criterio de Liu y otros (2019) con la ecuación (15.2):

$$M_{Rd} = aE_s + b$$

Donde:

M_{Rd} : Módulo resiliente dinámico **(15.2)**

E_s : Módulo resiliente estático

a, b : Coeficientes de regresión (parámetros de ajuste)

a toma valores en el rango de 1.98 - 2.34 mientras que el parámetro b está en el rango de 1.35 – 12.1, para presiones de confinamiento de 15 a 60KPa, 90% de MDS del suelo de subrasante, ver Figura 22. Para nuestro estudio se asume valores en función al esfuerzo de confinamiento, asignando el mayor esfuerzo para e_{CM} de 0.60m y el menor valor para el suelo natural sin capa de mejoramiento, ver Tabla 11. El detalle de la aplicación de estos criterios se muestra en el Anexo G.

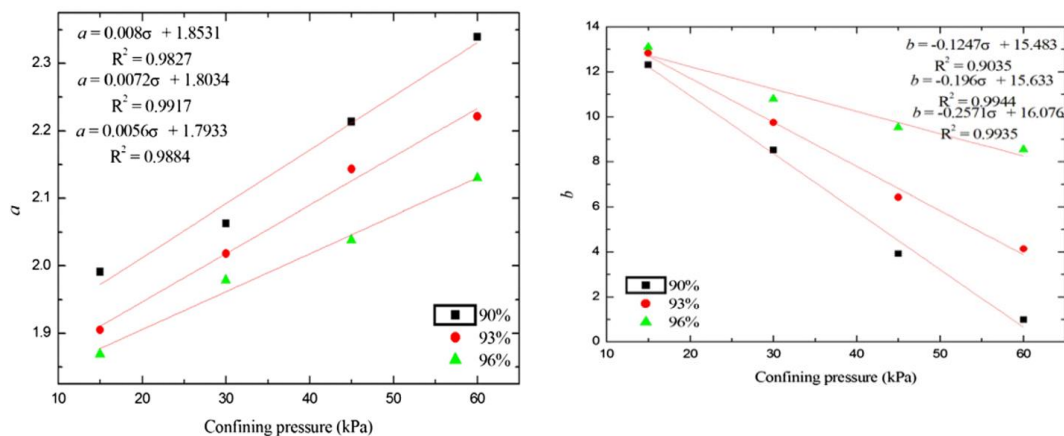
Tabla 11

Coefficientes de regresión para la ecuación de (Liu et al., 2019)

Coeficiente	eCM (m)				
	0.6	0.45	0.3	0.15	0
a	2.34	2.25	2.16	2.07	1.98
b	1.35	4.04	6.73	9.41	12.10

Figura 22

Valores de los coeficientes a y b de la relación M_{Rd} y E_s

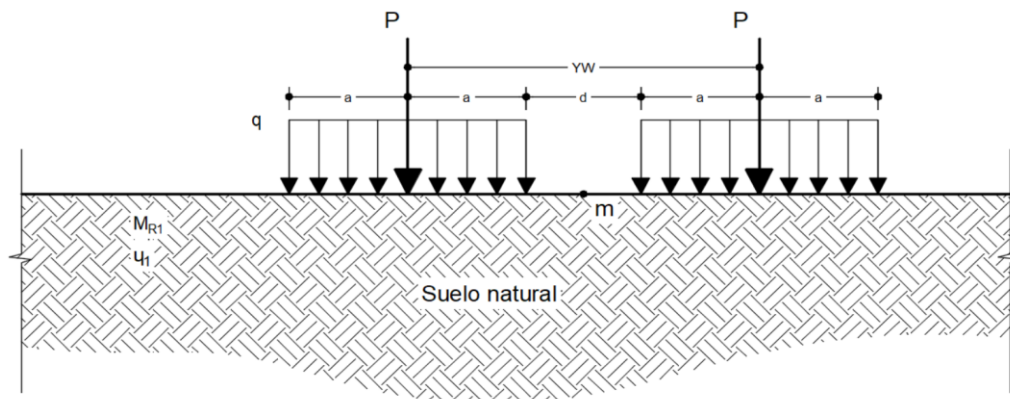


Nota. Propuesta por (Liu et al., 2019)

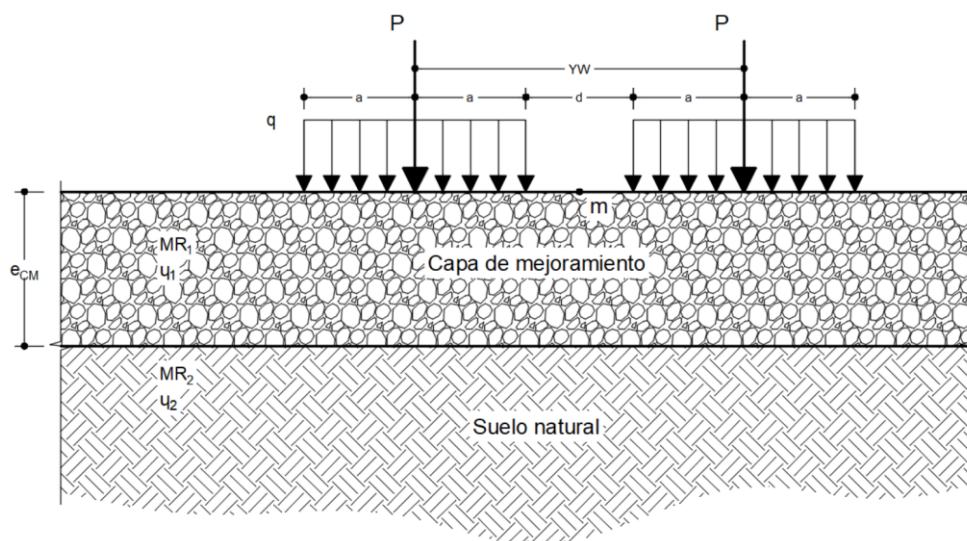
B) Modelo de Huang – Kenlayer

Se utilizó el software Kenlayer (Huang, 1993), para el análisis de los tramos experimentales y de control, considerando constante el módulo de resiliencia de la capa uno (M_{R1}) correspondiente a la capa de mejoramiento. El retrocálculo consistió en iterar a partir de un módulo del suelo natural (M_{R2}) semilla, hasta lograr convergencia entre la deflexión teórica y la medida en el tramo experimental correspondiente.

Se definieron dos modelos para ser analizados con Kenlayer a) Modelo unicapa (Figura 23), b) Modelo bicapa (Figura 24), considerando (Huang, 2004).

Figura 23*Modelo unicapa*

Nota. Basado en (Huang, 2004)

Figura 24*Modelo bicapa*

Nota. Basado en (Huang, 2004)

En estos modelos, M_{R1} y M_{R2} representan los módulos resilientes de la capa de mejoramiento y del suelo natural, respectivamente. Para el retrocálculo de M_{R2} , se considera M_{R1} como constante. Esta decisión se basa en que la capa de mejoramiento (M_{R1}) permite un mayor control experimental en comparación con el suelo natural (M_{R2}), cuyas propiedades son inherentemente más variables.

C) Propiedades mecánicas

Para la aplicación de los métodos desarrollados en el presente estudio se utilizó coeficientes de Poisson de 0.35 para los suelos de la capa de mejoramiento y 0.40 para el suelo natural, en base a la Tabla 1 del Anexo I (valores típicos de la relación de Poisson).

El valor del módulo resiliente de la capa de mejoramiento se obtuvo mediante las ecuaciones 3.604.105(1).1 y 3.604.105(1).2 de (MOP-DGOP, 2020; Powell et al., 1984) ver ecuación (15.3).

$$M_R(MPa) = 17.6(CBR)^{0.64} \quad \text{para } CBR < 12\%$$

$$M_R(MPa) = 22.1(CBR)^{0.55} \quad \text{para } 12\% \leq CBR < 80\% \quad (15.3)$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente en MPa

CBR: Relación de soporte California (%)

Obteniéndose un módulo resiliente de 146,100.00 KPa correspondiente al CBR de 31% de la capa de mejoramiento.

Figura 25

Modelo unicapa para análisis con Kenlayer

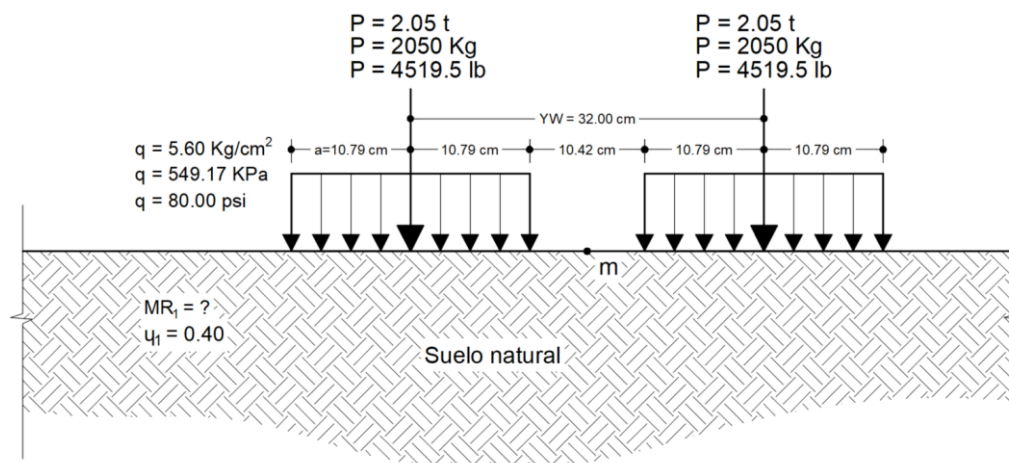
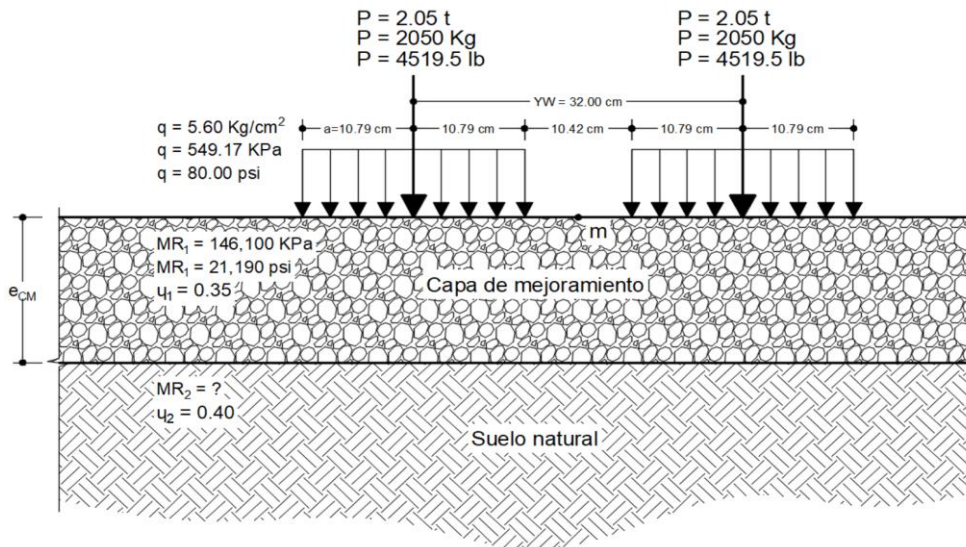


Figura 26

Modelo bicapa para análisis con Kenlayer



D) Módulo resiliente de diseño

Para el presente estudio el M_R equivalente de la subrasante compuesta por suelo natural y la capa de mejoramiento debe estimarse por la ecuación de (Von & Killingsworth, 1997) ecuación (15.4), dado el caso de que el módulo resiliente mayor corresponde a la capa superior de la subrasante (ver Figura 26).

$$M_R(\text{Equivalente}) = \frac{(D_{S1})^3 M_{R1} + (D_{S2})^3 M_{R2}}{(D_{S1})^3 + (D_{S2})^3}$$

Donde: (15.4)

M_{Ri} : Módulo resiliente de la capa i

D_{Si} : Espesor de la capa i

El espesor de la capa 1 corresponde a los espesores de la capa de mejoramiento en el experimento, el espesor de la 2 corresponde al suelo natural y como se sabe éste es de una profundidad infinita por lo que se delimitó por profundidad de influencia.



Profundidad de influencia (*PI*), se define generalmente como la profundidad por debajo de la superficie del pavimento hasta la cual los esfuerzos o deformaciones inducidos por las cargas del tráfico tienen un efecto significativo en el desempeño estructural del pavimento y la subrasante (Huang, 2004). Según (Ullidtz, 1998), la *PI* puede considerarse como la profundidad en la que el esfuerzo vertical se reduce a aproximadamente al 10% del esfuerzo aplicado en la superficie. Por su parte, Mallick y El-Korchi (2018) describen la *PI* como la profundidad por debajo de la cual los cambios en las características del suelo tienen un efecto insignificante en el desempeño del pavimento.

La profundidad de influencia no es un valor fijo, sino que varía dependiendo de variable como la magnitud de la carga, las propiedades de los materiales del pavimento y la subrasante, y el criterio específico de diseño utilizado (como deflexión, deformación o esfuerzo). Por lo tanto, estimamos la profundidad de influencia con el siguiente procedimiento:

- 1. Análisis teórico basado en la distribución de esfuerzos:** Se utilizó el software Kenlayer para modelar la estructura del pavimento y la subrasante en el tramo III de suelo natural reforzado con 0.60m de eCM, la respuesta estructural para $r = 0.0\text{cm}$ (punto de análisis en el eje de simetría de una rueda) se muestra en la Figura 27, para $r = 16.0\text{cm}$ (punto de análisis en medio de las dos ruedas del semieje simple) en la Figura 28 y en la Figura 29 se comparan las dos respuestas estructurales. Se puede observar que para $r = 0.0\text{cm}$ a 0.40m de profundidad el esfuerzo vertical se reduce a aproximadamente 10%. Para $r = 16.0\text{cm}$ el esfuerzo máximo se produce a 0.15m de profundidad (151 KPa) y se reduce a 10% aproximadamente a 0.70m de profundidad. De este

análisis podemos establecer que para el presente estudio la PI debería ser superior a 0.70.

Figura 27

Respuesta estructural de la subrasante + eCM = 0.60, r = 0cm

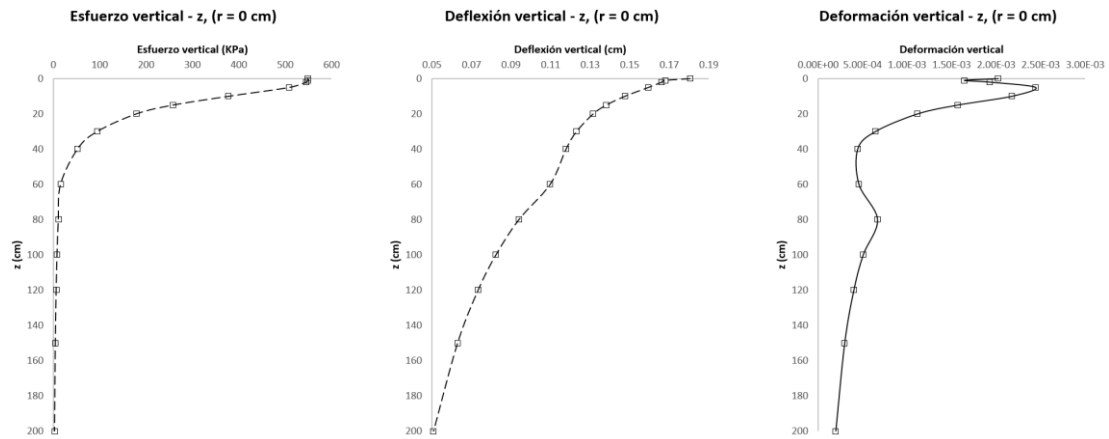


Figura 28

Respuesta estructural de la subrasante + eCM = 0.60, r = 16cm

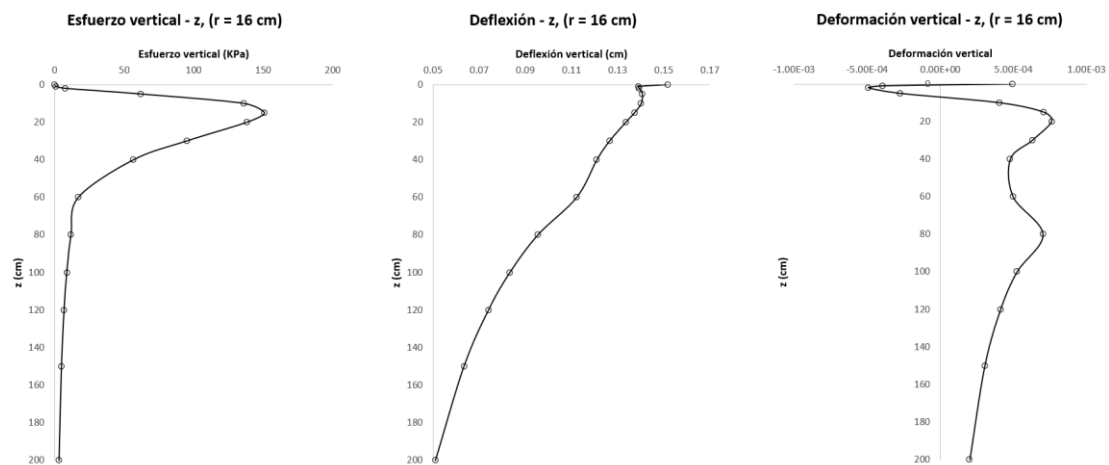
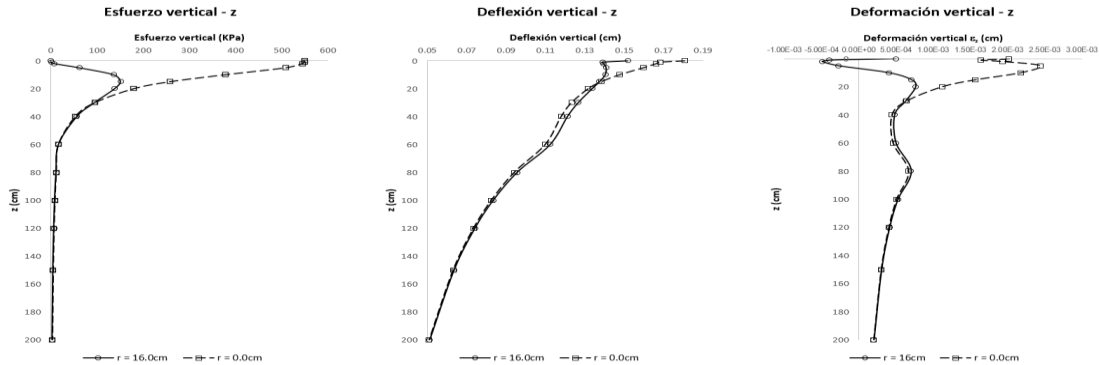


Figura 29

Respuesta estructural de la subrasante + eCM = 0.60, r=0cm y r=16cm



Con los datos de la Tabla 12 se calcularon lo M_{RC} de la subrasante mediante la ecuación de Von y Killingsworth (1997) para PI de 0.60 a 1.80m, se observa la significativa influencia de PI ver Tabla 13 y Figura 30.

Tabla 12

Datos de entrada para calcular M_{RC} de la subrasante

Composición de la subrasante	eCM (m)	M_{R1} (KPa)	U_1	M_{R2} (KPa)	U_2
SN + 0.00m de la CM	0.00	146,100	0.35	20,850	0.40
SN + 0.15m de la CM	0.15	146,100	0.35	20,850	0.40
SN + 0.30m de la CM	0.30	146,100	0.35	19,750	0.40
SN + 0.45m de la CM	0.45	146,100	0.35	18,900	0.40
SN + 0.60m de la CM	0.60	146,100	0.35	16,300	0.40

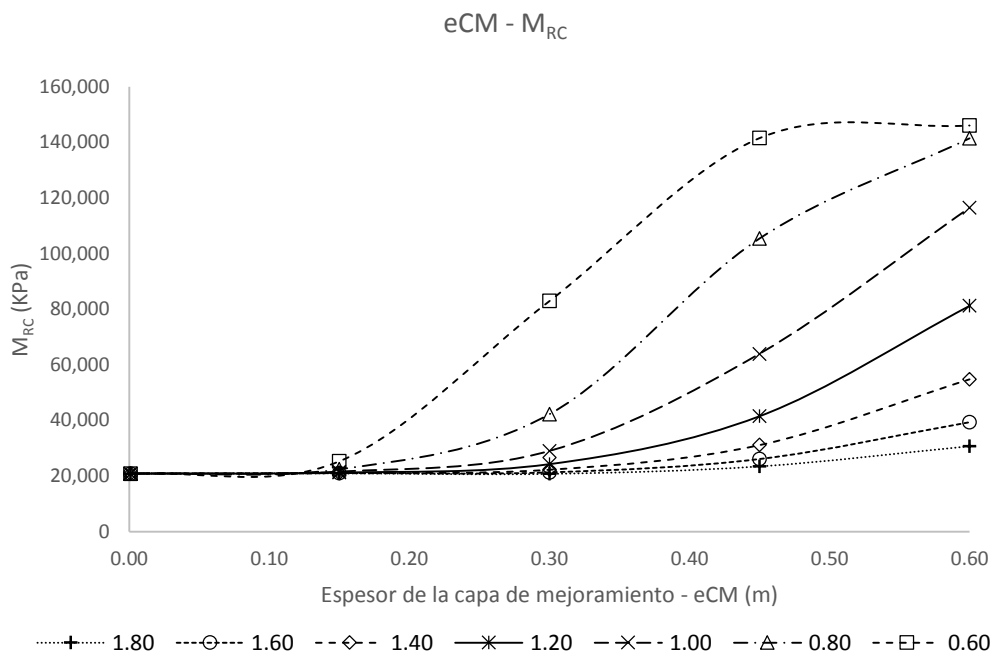
Tabla 13

Variación del M_{RC} en relación a la PI

eCM (m)	Módulo Resiliente Compuesto - M_{RC} (KPa)						
	Profundidad de Influencia - PI (m)						
	1.80	1.60	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60
0.00	20,850	20,850	20,850	20,850	20,850	20,850	20,850
0.15	20,944	20,989	21,066	21,214	21,535	22,371	25,323
0.30	20,753	21,284	22,262	24,263	28,970	42,194	82,925
0.45	23,443	26,091	31,120	41,495	63,914	105,401	141,557
0.60	30,722	39,357	54,812	81,200	116,431	141,464	146,100

Figura 30

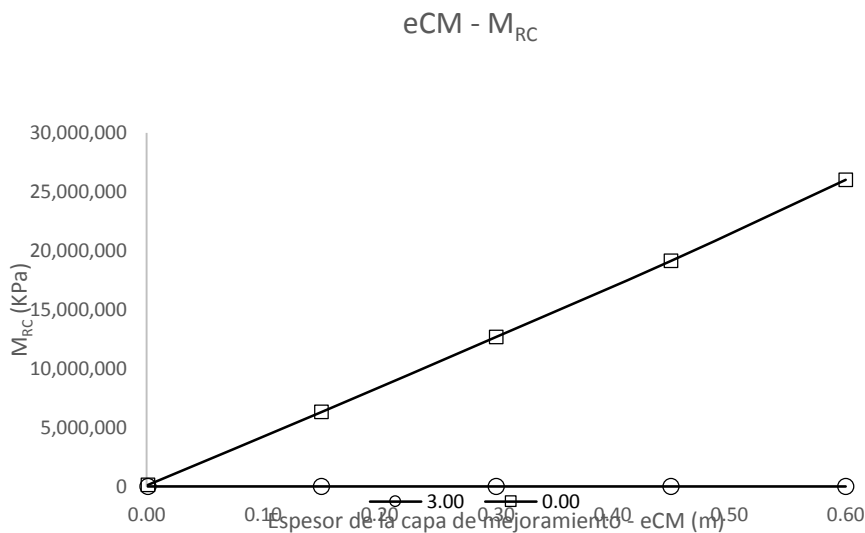
Comportamiento del M_{RC} en relación a la PI



Para una PI de 1.80m a más el M_{RC} tiende anular el efecto de la capa de refuerzo y para PI de 0.60 a menos, el M_{RC} se incrementa excesivamente indicando rigideces muy elevadas Figura 31.

Figura 31

Efecto de valores extremos de PI (3m y 0m)





Finalmente, para las condiciones del presente estudio se asume un PI de 1.20m donde el esfuerzo máximo producido por las dos ruedas del semieje de 8.2ton ($r=16.0\text{cm}$) se reduce a 5% aproximadamente.

Otro aspecto a considerar en el análisis es conocer la variación del valor de las deflexiones en relación a la ubicación del punto de análisis, como la deflexión en el centro de una de las ruedas, en el medio de las dos ruedas del semieje y como estas deflexiones se reducen a medida que se incrementa el e_{CM} de la subrasante, este aspecto se analizó utilizando el método de Huang – Kenlayer y su resultado se muestra en la Figura 32.

Se evidencia que las mayores deflexiones se presentan en el centro del área de contacto de cada rueda y éstas se reducen significativamente para e_{CM} de 0.30 a más.

Las condiciones de carga, subrasante y deflexiones pertenecen al experimento montado en el presente estudio.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

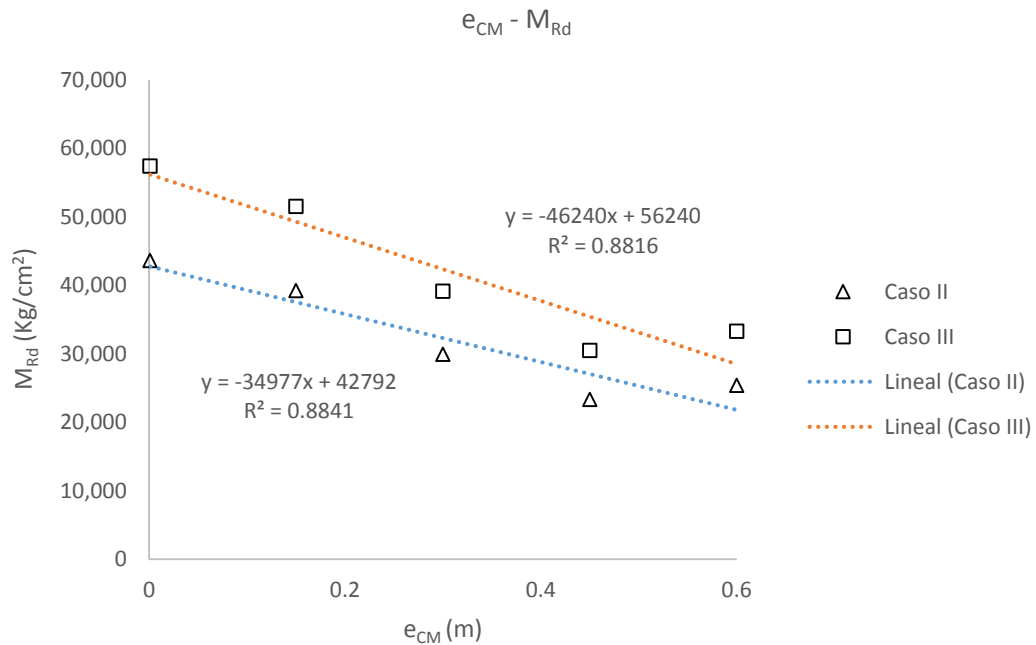
5.1. Influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante

5.1.2. Por el método de Hogg modificado

En el proceso de retrocálculo por el método de Hogg modificado, se ha encontrado que el eCM de la subrasante del tramo experimental influye en relación directa y tendencia cuadrática como la de mejor ajuste, en el M_{Rd} ver Figura 33, Figura 34 y Figura 35. Se consideraron dos casos: Caso II para $H/L_0 = 10$ y Caso III para $H/L_0 = \infty$, donde H : *Altura a la capa rígida* y L_0 : *Longitud característica*. En ambos casos se observa un resultado inesperado para $eCM = 0$ y $eCM = 0.15m$, obteniéndose M_{Rd} para $eCM = 0.15m$ menor que para $eCM = 0.0m$ (sin capa de refuerzo) lo que refuerza la afirmación de (Nakhaei & Timm, 2023) quienes sostienen que el retrocálculo puede ser una tarea difícil y la obtención de resultados **razonables** requiere a veces de mucha experiencia; también debemos considerar lo afirmado por (Fwa et al., 1997) que concluye que el retrocálculo implica la mejor combinación de soluciones y que al ser un problema inverso mal planteado se requiere utilizar programas informáticos para abordarlo. Los resultados se muestran más razonables para eCM de 0.30m a más, para las condiciones del presente estudio.

Figura 33

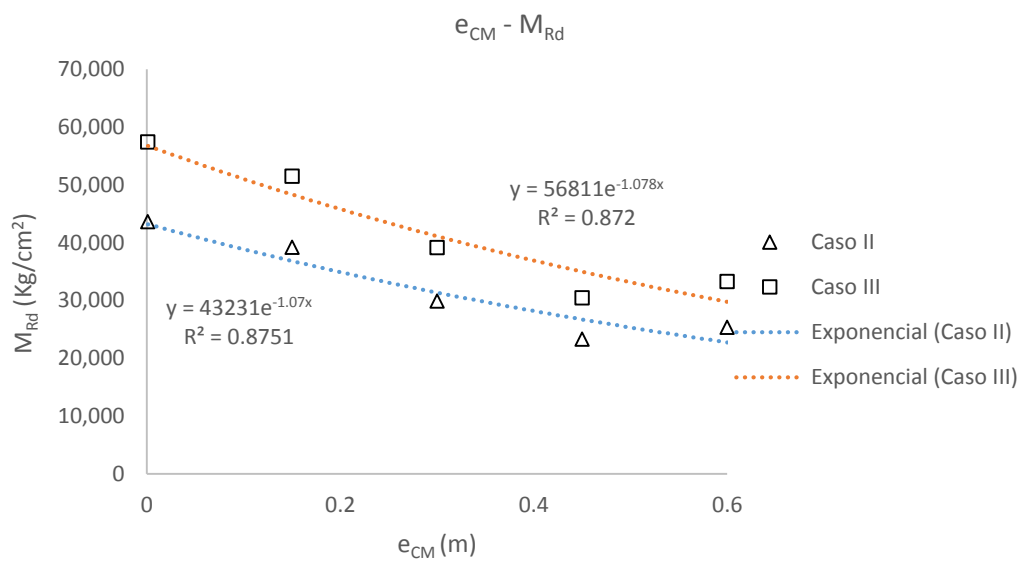
Valor de diseño de subrasante compuesta - Hogg modificado 1



Nota. Casos II y III, regresión lineal

Figura 34

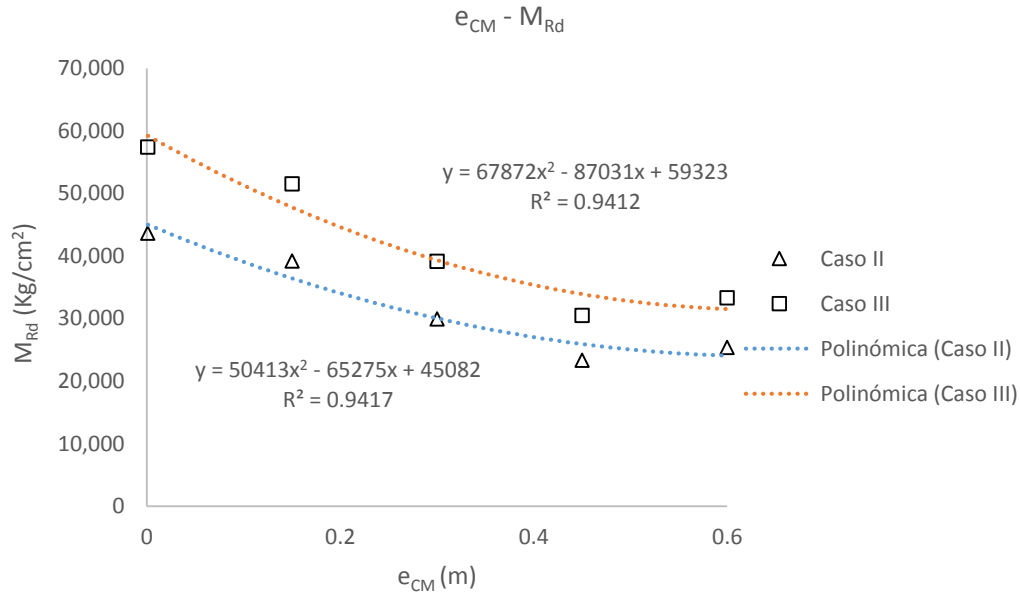
Valor de diseño de subrasante - Hogg modificado 2



Nota: Casos II y III, regresión exponencial

Figura 35

Valor de diseño de la subrasante compuesta - Hogg modificado 3



Nota. Casos II y III, regresión cuadrática

5.1.3. Por el método de Huang - Kenlayer

Se ha encontrado que el e_{CM} de la subrasante del tramo experimental influye en relación directa y tendencia exponencial en el módulo resiliente de diseño ver Figura 36. La línea de tendencia resultante se muestra en la ecuación (20.1):

$$M_{RC} = 16489e^{2.26(e_{CM})}$$

Donde:

(20.1)

M_{RC} : Módulo resiliente compuesto en KPa

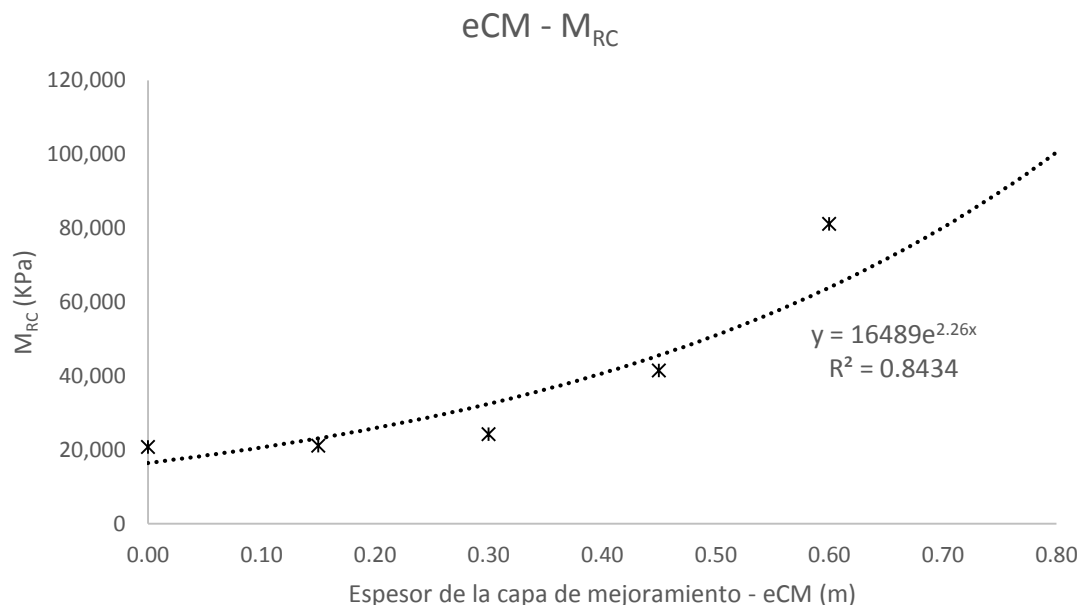
e_{CM} : Espesor de la capa de mejoramiento

El valor $R^2 = 0.8955$ muestra que a medida que aumenta el e_{CM} , el M_{RC} de la subrasante compuesta también aumenta exponencialmente. Esto significa que incrementos pequeños en el espesor superiores a 0.30m de la capa de

mejoramiento resultan en aumentos significativos en el M_{RC} . Prasad & Kumar (2022) examinaron el comportamiento de las deformaciones y esfuerzos en estructuras de pavimentos de dos capas, destacando que la inclusión de capas de refuerzo (mejoramiento) de mayor espesor ayuda a reducir las deformaciones en la subrasante. Este fenómeno se refleja claramente en los resultados obtenidos, donde el incremento del espesor de la capa de mejoramiento resulta en un incremento considerable en el M_{RC} . Asimismo, el efecto significativo del espesor: Un incremento en el e_{CM} de 0.00 m a 0.60 m resulta en un incremento del M_{RC} de 20,850 KPa a 81,200 KPa, lo que representa un aumento de casi 4 veces. Esto subraya la importancia de la capa de mejoramiento en el desempeño estructural de la subrasante, como lo señalan Singh & Sahoo (2022).

Figura 36

Influencia del e_{CM} en el M_{RC} de la subrasante compuesta





La ecuación de la línea de tendencia puede ser utilizada para predecir el M_{RC} esperado para un espesor dado de la capa de mejoramiento, lo cual es útil en el diseño de soluciones de mejoramiento de suelos.

El valor de R^2 cercano a 1 indica que el modelo exponencial describe adecuadamente la relación entre las variables, lo que respalda la validez de las conclusiones extraídas. Sin embargo, aunque el modelo muestra un buen ajuste, es importante reconocer las limitaciones inherentes a un estudio de campo localizado. Factores como la variabilidad del suelo, condiciones climáticas específicas y métodos de construcción pueden influir en los resultados. Lekarp et al. (2000) enfatizaron la importancia de considerar una amplia gama de factores al evaluar el comportamiento de materiales granulares en estructuras de pavimento, incluyendo el estado de esfuerzos, densidad, contenido de humedad y gradación del material.

5.1.4. Propiedades físico mecánicas del suelo natural de la subrasante

El suelo natural de la zona del estudio tiene las propiedades físico-mecánicas presentadas en la Tabla 14 y Tabla 15. El nivel freático se encuentra a 1.10m de la superficie del terreno natural, se encontraron tres estratos, el primero corresponde a suelo orgánico que fue removido para colocar la capa de mejoramiento.

En el Pozo 1 (Tabla 14) después de la capa orgánica a eliminar (desbroce) se encontraron dos estratos de arcilla de baja compresibilidad (CL) según SUCS, A – 6 (10) A – 7 – 5 (8) según AASHTO.

Tabla 14*Propiedades físicas del suelo natural de la subrasante, Pozo 1*

Condición	Muestra 2	Muestra 3
Clasificación AASHTO	A - 6 (10)	A - 7 - 5 (8)
Índice de plasticidad (%)	11.22	12.30
Humedad (%)	8.14	14.64

Tabla 15*Propiedades físicas del suelo natural de la subrasante, Pozo 2*

Condición	Muestra 2	Muestra 3
Clasificación AASHTO	A - 6 (11)	A - 7 - 5 (10)
Índice de plasticidad (%)	12.60	17.12
Humedad (%)	9.23	15.43

Tabla 16*Valor Relativo de Soporte in situ (CBR)*

Punto	Profundidad (m)	CBR (%)
1	0.30	4.6
2	0.30	5.7

En el Pozo 2 (Tabla 15) después de la capa orgánica a eliminar (desbroce) se encontraron dos estratos de arcilla de baja compresibilidad (CL) según SUCS, A - 6 (11) A - 7 - 5 (10) según AASHTO.

Considerando el (MTC-SP, 2014), el suelo natural, por la resistencia al corte por punzonamiento (*CBR*) puede calificarse como insuficiente (ver Tabla 5). Por lo tanto una opción a considerar es colocar una capa de mejoramiento sobre este para mejorar el comportamiento mecánico de la subestructura (Menéndez & Olarte, 2015; Prasad & Kumar, 2022; Zipoli & Avesani Neto, 2022).

20.2. Propiedades físico mecánicas del suelo de mejoramiento de la subrasante

Los resultados de la evaluación de las propiedades físico mecánicas del suelo de mejoramiento del estudio se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17

Propiedades físico-mecánicas del suelo de mejoramiento

Condición	Muestra 1
Tamaño máximo (cm)	5.00
Índice de plasticidad (%)	13.96
Desgaste de materiales (%) (Los Ángeles)	33.71
Valor Relativo de soporte - CBR (%)	31.0

El tipo de suelo de la capa de mejoramiento utilizado, proveniente de la cantera "Taparachi" de la ciudad de Juliaca se clasifica como A-1-a(0) según el sistema de clasificación AASHTO, entonces está comprendido entre los suelos aceptables: A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-6 y A-3 según (EG-MTC, 2015).

El valor relativo de soporte del suelo de mejoramiento CBR se determinó al 90% de la máxima densidad seca. El porcentaje de compactación mínimo para la

capa de mejoramiento, en el experimento fue de 90% tomando en cuenta el contexto más crítico que se presenta en la ejecución de obras en el medio local.

5.2. Deflexiones teóricas y observadas en el experimento

En la Tabla 18 y

Figura 37, se presentan los resultados del cálculo de las deflexiones considerando el modelo unicapa, por los procedimientos de: (Foster & Ahlvin, 1954) considerando una relación de Poisson igual a 0.5 y una profundidad de influencia de 1.20m, (Ahlvin & Ulery, 1962) y Kenlayer (Huang, 1993); donde se aprecia que las deflexiones medidas en campo en los tramos experimentales son significativamente mayores a los hallados con los procedimientos analíticos, considerando las propiedades de los componentes de la subrasante observadas en el experimento.

Tabla 18

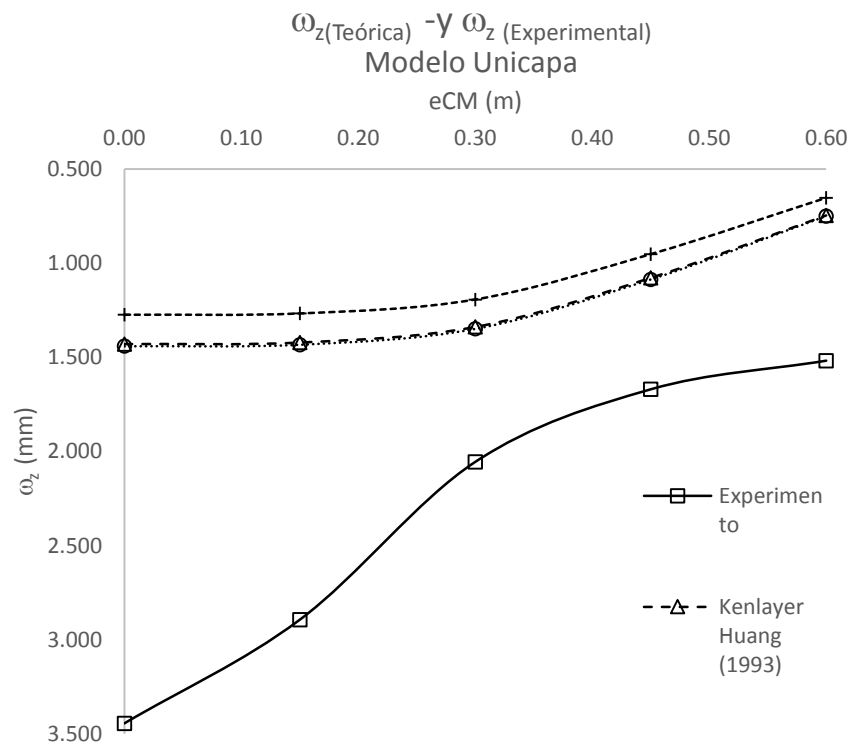
Diferencias entre deflexiones medidas en campo y teóricas

eCapa de Mejoramiento (m)	esuelo natural (m)	MR(Equivalente) (KPa)	V(Equivalente)	ω_z (mm)			
				(*) Foster y Ahlvin (1954)	Ahlvin y Ulery (1962)	Kenlayer Huang (1993)	Experimento
0.00	1.20	50,242	0.40	1.274	1.440	1.429	3.444
0.15	1.05	50,521	0.40	1.267	1.432	1.421	2.893
0.30	0.90	53,666	0.40	1.192	1.348	1.338	2.055
0.45	0.75	67,269	0.39	0.951	1.086	1.077	1.669
0.60	0.60	98,170	0.38	0.652	0.750	0.745	1.517

Nota. (*) Considerando $\nu = 0.50$ y Profundidad de influencia = 1.20m

Figura 37

Deflexión experimental y teórica



También es de destacar la gran similitud de las deflexiones teóricas obtenidas por Kenlayer y Ahlvin & Ulery. En cuanto a las diferencias entre las deflexiones teóricas según Foster y Ahlvin (1954) y Kenlayer de Huang (1993) se debe a que en el primer procedimiento solo se tienen las cartas gráficas para calcular la respuesta estructural con una relación de Poisson $\nu = 0.5$, en cambio la solución de Yang. H. Huang (Kenlayer) así como la solución de (Ahlvin & Ulery, 1962) calculan para cualquier valor de ν necesario.

Estos resultados confirman lo manifestado por Prasad y Kumar (2022) en cuanto a la influencia del espesor de la capa de refuerzo. Para espesores de 0.30m a 0.60 se tiene que las deflexiones siguen la tendencia teórica. El espesor influye significativamente en la deflexión reduciéndola, consecuentemente el módulo de la subrasante se incrementaría. Asimismo; los resultados muestran la significativa

influencia del espesor de la capa granular de refuerzo sobre la deflexión en consecuencia sobre el módulo resiliente cuando ésta se apoya directamente sobre una subrasante blanda, tal como concluyeron Zipoli y Avesani (2022).

5.3. Valor de diseño de la subrasante

5.3.1. Por el método de Hogg modificado

Por medio del método de Hogg modificado se ha determinado que los M_{Rd} de la subrasante compuesta varían de 25,383 a 43,642 kPa para subrasantes con e_{CM} de 0 a 0.60m de espesor respectivamente para el caso II del método (Caso II: $H/L_0 = 10$) y de 33,288 a 57,406 para subrasantes con e_{CM} de 0 a 0.60m de espesor respectivamente, considerando el caso III del método (Caso III: $H/L_0 = \infty$), ver Tabla 19. Se utilizaron los coeficientes de regresión "a" y "b" para la ecuación (15.2) propuesta por (Liu et al., 2019), según el criterio expuesto en 3.4.3. Análisis estructural / Modelo de Hogg modificado, con lo que se obtuvieron los M_{Rd} a partir de E_s .

Tabla 19

Valor de diseño de la subrasante compuesta en los tramos experimentales, por el método de Hogg modificado

Composición de la subrasante	CASO II		CASO III	
	M_{Rd} (Kg/cm ²)	M_{Rd} (kPa)	M_{Rd} (Kg/cm ²)	M_{Rd} (kPa)
SN + 0.00m CM	258.83	25,383	339.45	33,288
SN + 0.15m CM	237.87	23,327	310.67	30,466
SN + 0.30m CM	304.89	29,900	399.01	39,130
SN + 0.45m CM	399.83	39,210	525.21	51,505
SN + 0.60m CM	445.02	43,642	585.38	57,406

Nota:

Caso II: $H/L_0 = 10$

H: Altura a la capa rígida

Caso III: $H/L_0 = \infty$

L₀: Longitud característica

5.3.2.1. Por el método de Huang - Kenlayer

Por retrocálculo utilizando Kenlayer del Dr. Huang se ha determinado que los M_{RC} de la subrasante varían de 20,850 a 81,200 kPa para subrasantes con e_{CM} de 0 a 0.60m de espesor respectivamente, ver Tabla 20 Los valores retrocalculados para la capa de mejoramiento mantienen coherencia con los valores según (NCHRP, 2004b), ver Tabla 2 del Anexo I.

Tabla 20

M_{RC} de la subrasante, e_{CM} de 0 a 0.60m

Composición de la subrasante	e_{CM} (m)	M_{R1} (KPa)	U_1	M_{R2} (KPa)	U_2	M_{RC} (KPa)
SN + 0.00m de la CM	0.00	146,100	0.35	20,850	0.40	20,850
SN + 0.15m de la CM	0.15	146,100	0.35	20,850	0.40	21,214
SN + 0.30m de la CM	0.30	146,100	0.35	19,750	0.40	24,263
SN + 0.45m de la CM	0.45	146,100	0.35	18,900	0.40	41,495
SN + 0.60m de la CM	0.60	146,100	0.35	16,300	0.40	81,200

Nota. e_{CM} : Espesor de la capa de mejoramiento, M_{Ri} : Módulo resiliente de la capa i , M_{RC} : Módulo resiliente compuesto

5.4. Contratación de hipótesis

Para contrastar la hipótesis, se analizó cada componente clave y se comparó con los resultados obtenidos.

1. Relación entre e_{CM} y M_{RC}

Hipótesis: Relación directa

Resultado: Relación directa confirmada



Tabla 21

Relación eCM vs M_{RC}

<i>eCM (m)</i>	<i>M_{RC} (kPa)</i>
0.00	20,850
0.15	21,214
0.30	24,263
0.45	41,495
0.60	81,200

Observación: La tabla muestra un claro incremento del *M_{RC}* a medida que aumenta el *eCM*, confirmando la relación directa.

2. Tipo de regresión

Hipótesis: Regresión exponencial con mejor coeficiente de determinación

Resultado: Confirmado

Tabla 22

Análisis de regresión

Tipo de Regresión	Ecuación	R²
Exponencial	$M_{RC} = 16489e^{2.26(eCM)}$	0.8955

Observación: La regresión exponencial muestra un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8955$), confirmando que es el modelo de mejor ajuste.

3. Profundidad de influencia significativa

Hipótesis: Adecuada profundidad de influencia

Resultado: Confirmado, profundidad de influencia recomendada de 1.20m

Tabla 23

Análisis de Profundidad de Influencia

Profundidad (m)	% de σ_z máx.
1.20	5%

Observación: Se determinó que a una profundidad de 1.20m, el esfuerzo vertical máximo (σ_z máx) se reduce al 5% de su valor en la superficie, indicando una profundidad de influencia adecuada.

4. Incrementos significativos del M_{RC}

Hipótesis: Incrementos importantes para e_{CM} desde 0.30m Resultado:
Confirmado

Tabla 24

Incrementos del M_{RC}

e_{CM} (m)	M_{RC} (kPa)	Incremento respecto al anterior (%)
0.00	20,850	-
0.15	21,214	1.8
0.30	24,263	16.4
0.45	41,495	99.0
0.60	81,200	289.4

Observación: Se observan incrementos significativos del M_{RC} a partir de e_{CM} = 0.30m, con aumentos porcentuales muy notables para 0.45m y 0.60m.

Conclusión de la Contrastación:

La hipótesis planteada se confirma en todos sus aspectos principales:

1. Se verifica la relación directa entre el e_{CM} y el M_{RC} .



2. La regresión exponencial es la que mejor representa la relación, con un alto R^2 .
3. Se establece una profundidad de influencia adecuada de 1.20m.
4. Se confirman incrementos importantes del M_{RC} a partir de $e_{CM} = 0.30m$.

Por lo tanto, se puede afirmar que la hipótesis ha sido contrastada satisfactoriamente, respaldando las conclusiones del estudio sobre la influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el M_R de diseño de la subrasante en las condiciones específicas del tramo experimental a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca.



CONCLUSIONES

PRIMERA. El eCM de la subrasante del tramo experimental a 3825 msnm influye en relación directa al módulo resiliente de diseño de la subrasante, en cuanto al modelo de mejor ajuste se encontró que, para el método de Hogg modificado corresponde a la regresión cuadrática y para el modelo de Huang – Kenlayer el exponencial.

- El retrocálculo por el método de Huang – Kenlayer se ha obtenido incrementos importantes del M_{RC} para eCM desde 0.30m. Se ha determinado que la profundidad de influencia es significativamente determinante en la magnitud del M_{RC} y su estimación requiere de un análisis detenido, se ha concluido que la PI recomendable es 1.20m para las condiciones particulares del estudio.
- El retrocálculo por Hogg modificado presenta inconsistencias para eCM de 0.15m y 0.00m, para eCM de 0.30 a 0.60m los M_{Rd} llegan hasta 57,406 kPa para el caso III en donde la relación $H/L_0 = \infty$, que muestra mayor cercanía a los resultados del método de Huang – Kenlayer.
- El método recomendado para el retrocálculo es el de Huang – Kenlayer para las condiciones del presente experimento por la coherencia de sus resultados.

SEGUNDA. Las propiedades físico-mecánicas del suelo natural en donde se construyó el tramo experimental presentan las características de la categoría S1 - Subrasante insuficiente con un $CBR_{in situ}$ promedio = 5.2%, según el Manual de Carreteras Sección Suelos y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.



TERCERA. Las propiedades físico-mecánicas del suelo utilizado en la capa de mejoramiento de la subrasante que provienen del lado Este de la cantera Taparachi de la ciudad de Juliaca, cumplen parcialmente con los requisitos de calidad exigidos para terraplenes de las EG-2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, siendo el *IP* mayor al especificado en 3.96%.

CUARTA. Las deflexiones medidas en el grupo de control y grupos experimentales se ajustan a una distribución normal según Kolgomorov-Smirnov, corregido por Lilliefors, muestran valores que en promedio van de 1.52 a 3.44mm. Los valores de las deflexiones observadas en los tramos experimentales difieren en 13.95% en promedio de las deflexiones calculadas por procesos mecanicistas, este hecho evidencia la necesidad de mejorar el control de las variables extrañas y realizar más investigación experimental que permitan ajustar los modelos teóricos.

QUINTA. El valor de diseño de la subrasante del tramo experimental a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca determinado por retrocálculo de deflexiones medidas con viga Benkelman:

- Utilizando el método de Hogg modificado para una relación $H/L_0 = 10$ (Caso II) es de 43,642 kPa, para el caso III en donde $H/L_0 = \infty$ (capa rígida a profundidad infinita) es 57,406 kPa, para $e_{CM} = 0.60m$ siendo el valor más conservador el correspondiente al caso II, consecuente se concluye que para las condiciones de la subrasante del presente estudio la capa de mejoramiento de 0.60m resulta insuficiente para tener una subrasante por lo menos regular según el “Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú”.



- Utilizando el método de Huang – Kenlayer el M_{RC} varía de 20,850 a 81,200 kPa, correspondiendo a los eCM de 0.45 y 0.60m valores que duplican y cuadruplican el M_{RC} sin capa de mejoramiento, comportamiento típico de la tendencia exponencial.



RECOMENDACIONES

PRIMERA. Para futuras investigaciones es necesario estudiar la variabilidad del suelo, condiciones climáticas específicas y métodos de construcción, así como evaluar el comportamiento de los materiales granulares en estructuras de pavimento, incluyendo el estado de esfuerzos, densidad, contenido de humedad y gradación del material.

SEGUNDA. Se recomienda construir un único tramo experimental de 30m de longitud como mínimo, para que el equipo mecánico de construcción maniobre sin inconvenientes, que la medición de las deflexiones con viga Benkelman o se realicen con el equipo apoyado completamente en la superficie de la capa en evaluación y sobre todo que sean las mismas condiciones del suelo natural, este último punto permitiría controlar el factor de variabilidad de propiedades físico mecánicas del suelo natural con mayor rigurosidad.

TERCERA. Es necesario estudiar el comportamiento de subrasantes con suelos estabilizados, reforzados en tramos experimentales a escala real para lograr una mejor comprensión del desempeño de los suelos de subrasante para pavimentos, considerando también las variaciones estacionales del nivel freático.



REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2015). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide—A Manual of Practice (2nd Edition)*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- AASHTO. (2023). *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials [Método estándar de prueba para determinar el módulo de resiliencia de suelos y agregados]*. STANDARD by American Association of State and Highway Transportation Officials, 2007. https://www.techstreet.com/standards/aashto-t-307-99-2021?product_id=1321084
- Aboelela, A. E., El-Badawy, S. M., Gabr, A. R., & Awed, A. M. (2023). Characterisation and modelling of subgrade resilient modulus for pavement structural design in Egypt. *Road Materials and Pavement Design*, 24(11), 2597-2620. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2152725>
- Ahlvin, R., & Ulery, H. (1962). Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space. *Highw. Res. Board Bull.*, 342, 1-13. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/hrbulletin/342/342-001.pdf>
- Ahmed, A. W. (2014). *Mechanistic-Empirical Modelling of Flexible Pavement Performance: Verifications Using APT Measurements* [Doctoral Thesis,



Royal Institute of Technology]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:716692/FULLTEXT01.pdf>

Baadiga, R., & Balunaini, U. (2023). Evaluation of pavement design input parameters of biaxial and triaxial geogrid stabilized flexible pavements overlying soft subgrades. *Cleaner Materials*, 9, 100192. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100192>

Balarezo, J. (2017). *Evaluación estructural usando viga benkelman aplicada a un pavimento* [Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil, Universidad de Piura]. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3135/ICI_241.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Biswal, D. R., Sahoo, U. C., & Dash, S. R. (2016). Characterization of granular lateritic soils as pavement material. *Transportation Geotechnics*, 6, 108-122. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.005>

Burmister, D. M. (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I. *Journal of Applied Physics*, 16(2), 89-94. <https://doi.org/10.1063/1.1707558>

Carneiro, F. B. L. (1966). Benkelman Beam-Auxiliary Instrument of the Maintenance Engineer. *Highway Research Board*, 129(3), 28-59.

Christopher, B. R., Schwartz, C., & Boudreau, R. (2006). *Geotechnical Aspects of Pavements* (Technical report No. FHWA NHI-05-037; p. 888). National Highway Institute Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation Washington, D.C.



[http://apps.itd.idaho.gov/apps/manuals/Materials/Materials%20References/
FHWA%20NHI-05-037.pdf](http://apps.itd.idaho.gov/apps/manuals/Materials/Materials%20References/FHWA%20NHI-05-037.pdf)

Del Águila R., P. (2007). *Determinacion del mr suelo de fundacion empirico-mecanicista*. XIV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, La Habana, Cuba.

Demeke, A. Y., Sachpazis, C. I., Assefa, E., & Pantelidis, L. (2023). Modeling the resilient modulus of subgrade soils with a four-parameter constitutive equation. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(4), 3795-3800. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01735-0>

Durham, G. N., Marr, W. A., DeGroof, W. L., ASTM International Committee D18 on Soil and Rock, & ASTM International Committee D18 on Soil and Rock (Eds.). (2003). *Resilient modulus testing for pavement components*. ASTM International.

EG-MTC. (2015, septiembre). *Manual de carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. http://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf

Foster, C. R., & Ahlvin, R. G. (1954). Stresses and deflections induced by a uniform circular load. *Highway Research Board Proceedings*, 33. <https://trid.trb.org/View/126578>

Fwa, T. F., Tan, C. Y., & Chan, W. T. (1997). Backcalculation Analysis of Pavement-Layer Moduli Using Genetic Algorithms [Análisis de retrocálculo de módulos de capas de pavimento mediante algoritmos genéticos]. *Transportation Research Record*, 1570(1), 134-142. <https://doi.org/10.3141/1570-16>



- George, K. P., Uddin, W., & University of Mississippi. Dept. of Civil Engineering. (2000). *Subgrade characterization for highway pavement design [Caracterización de la subrasante para el diseño de pavimentos de carreteras]* (Final Report No. FHWA/MS-DOT-RD-00-131; p. 261). University of Mississippi. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/24131>
- Goldbeck, A. T. (1940). A method of design of non-rigid pavements for highways and airport runways. *Proceedings*, 258-270.
- Gutiérrez, J. W. (2007). *Modelacion geotecnica de pavimentos flexibles en el Perú* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
- Hanandeh, S., Ardah, H., Ardah, A., & Abu-Farsakh, M. (2022). Prediction of the resilient modulus of stabilized weak subgrade for pavement design structure. *Transportation Geotechnics*, 37, 100856. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100856>
- Harichandran, R. S., Mahmood, T., Raab, A. R., & Baladi, G. Y. (1993). Modified Newton Algorithm for backcalculation of pavement layer properties [Algoritmo Newton modificado para el retrocálculo de las propiedades de las capas de pavimento]. *Transportation Research Record*, 1384. <https://trid.trb.org/view/378422>
- Hindle, B. P. (1998). *Medieval Roads and Tracks [Caminos y vías medievales]*. Bloomsbury USA.
- Hoffman, M. S. (1977). Application of Elasticity Models for Evaluation of Flexible Pavements. *Transportation Research Institute Technion. Israel*, 015-664.



- Horak, E. (1988). Application of Equivalent-Layer-Thickness concept in a mechanistic rehabilitation design procedure. *Transportation Research Record*, 1207, 69-75.
- Huang, Y. H. (1967, agosto). *Stresses and displacements in viscoelastic layered systems under circular loaded areas*. Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmnts. <https://trid.trb.org/View/104859>
- Huang, Y. H. (1968). Stresses and Displacements in Nonlinear Soil Media. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(1), 1-19. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001079>
- Huang, Y. H. (1993). *KENLAYER computer program* [Software].
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design [Análisis y Diseño de Pavimentos]* (2nd ed). Pearson/Prentice Hall; <https://books.google.com.pe/books?id=hURIQgAACAAJ>.
- Hyslop, J. (1984). *The Inka Road System [El sistema de caminos Inka]*. Academic Press.
- INVIAS. (2008). *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras* (2da.). Instituto Nacional de Vías - MT. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/986-guia-metodologica-para-el-diseno-de-obras-de-rehabilitacion-de-pavimentos-asfalticos-de-carreteras>
- Ishihara, K. (1962). The General Theory of Stresses and Displacements in Two-Layer Viscoelastic Systems. *Soils and Foundations*, 2(2), 51-68. https://doi.org/10.3208/sandf1960.2.2_51



- Jiménez, M. (2010). Implementación del ensayo de módulo resiliente en bases granulares para pavimentos. *Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2010 - Universidad de Costa Rica*, 12. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1207>
- Kardani, N., Aminpour, M., Nouman Amjad Raja, M., Kumar, G., Bardhan, A., & Nazem, M. (2022). Prediction of the resilient modulus of compacted subgrade soils using ensemble machine learning methods. *Transportation Geotechnics*, 36, 100827. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100827>
- Khasawneh, M. A., & Al-jamal, N. F. (2019). Modeling resilient modulus of fine-grained materials using different statistical techniques. *Transportation Geotechnics*, 21, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100263>
- Leick, G. (2002). *Mesopotamia: The Invention of the City [Mesopotamia: la invención de la ciudad]*. Penguin UK.
- Lekarp, F., Isacsson, U., & Dawson, A. (2000). State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1), 66-75. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66))
- Li, L., Liu, J., & Zhang, X. (2010). *Resilient Modulus Characterization of Alaskan Granular Base Materials [Caracterización del módulo resiliente de los materiales de base granular de Alaska]* (Final Report No. FHWA-AK-RD-10-08). Alaska University Transportation Center. <https://ntl.bts.gov/lib/46000/46700/46790/107045-Fines-Final-report-J.liu-ineautc11061.pdf>
- Liu, X., Zhang, X., Wang, H., & Jiang, B. (2019). Laboratory testing and analysis of dynamic and static resilient modulus of subgrade soil under various



influencing factors. *Construction and Building Materials*, 195, 178-186.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.061>

Luo, X., Gu, F., Zhang, Y., Lytton, R. L., & Zollinger, D. (2017). Mechanistic-empirical models for better consideration of subgrade and unbound layers influence on pavement performance. *Transportation Geotechnics*, 13, 52-68.

<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.06.002>

Lytton, R. L. (1989). Backcalculation of Pavement Layer Properties. En G. Baladi & A. Bush (Eds.), *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli* (pp. 7-7-32). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP19797S>

Menéndez, J. R. (2016). *Ingeniería de Pavimentos—Materiales* (5ta. edición, Vol. 1). ICG.

Menéndez, J. R., & Olarte, J. R. (2015, noviembre). *Método mecánico calibrado para determinar el espesor de subrasante mejorada en suelos limo-arcillosos*. XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, At Bariloche, Argentina. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2976.6160>

MOP-DGOP. (2020). *Manual de carreteras: Instrucciones y criterios de diseño* (2020.^a ed., Vol. 3). Dirección de Vialidad - Dirección de Obras Públicas - Ministerio de Obras Públicas (Chile).

MTC-EM. (2016). *Manual de ensayo de materiales* (Mayo-2016). https://drive.google.com/file/d/1Am1jUdFkZerWNuzyX8CxljoBghSde6d/_view

w



- MTC-GT. (2018). «*Glosario de Terminos*» *De Uso Frecuente en Proyectos de Infraestructura Vial*. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC-SP. (2014). *Manual de carreteras, suelos geología, geotecnia y pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos* (04/2014 ed.). Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Perú).
http://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf
- Nakhaei, M., & Timm, D. H. (2023). A new methodology to improve backcalculation of flexible pavements with stabilized foundations. *Construction and Building Materials*, 368, 130405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130405>
- NCHRP. (2004a). *Guide for Mechanistic-empirical Design—Final Report—Appendix A [Guía de Diseño Empírico-Mecanicista—Reporte Final—Apéndice A]* (p. 13). National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).
- NCHRP. (2004b, marzo). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavements Structures. Part 2. Design Inputs. Chapter 2. Material Characterization*. National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council.
- Nikolaides, A. (2015). *Highway Engineering—Pavements, Materials and Control of Quality*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Noriega, L., Helberto, M., & others. (2010). *Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio/Relation between resilient modulus found for backcalculation and found in laboratory*



test programs [Universidad Nacional de Colombia].

<http://www.bdigital.unal.edu.co/3774/>

O'Flaherty, C. A. (2002). *Highways: The Location, Design, Construction and Maintenance of Road Pavements [Carreteras: Localización, diseño, construcción y conservación de pavimentos de carreteras]* (4th.). Butterworth-Heinemann.

Olarte P., J. R. (2015). *Proceso innovado para determinar el espesor de subrasante mejorada en suelos limo-arcillosos aplicado en la carretera Puente Raither— Puente Paucartambo* [Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería de Transportes, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2662>

Péterfalvi, J., Primusz, P., Markó, G., Kisfaludi, B., & Kosztka, M. (2015). Evaluation of the Effect of Lime-Stabilized Subgrade on the Performance of an Experimental Road Pavement. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 36(2), 269-282.

Piratheepan, J., & Gnanendran, C. T. (2013). Back-Calculation of Resilient Modulus of Lightly Stabilized Granular Base Materials from Cyclic Load Testing Facility. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1068-1076. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000653](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000653)

Powell, W. D., Potter, J. F., Mayhew, H. C., & Nunn, M. E. (1984). THE STRUCTURAL DESIGN OF BITUMINOUS ROADS. *TRRL LABORATORY REPORT*, 1115, Article LR 1132 Monograph. <https://trid.trb.org/view/211702>

Prasad, J., & Kumar, A. (2022). Prediction Models for Computation of Deformations and Interface Stresses in a Two-Layered Pavement Structure [Modelos de



predicción para el cálculo de deformaciones y tensiones de interfaz en una estructura de pavimento de dos capas]. *International Journal of Geomechanics*, 22(1), 06021034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002246)

Rahman, M. (2017). *Characterization Of Subgrade Resilient Modulus For MEPDG And The Effects On Pavement Rutting [Caracterización del módulo de resiliencia de la subrasante para el MEPDG y sus efectos en el ahuellamiento del pavimento]* [Tesis Doctoral, University of South Carolina]. <https://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5400&context=etd>

Rahman, M., & Vargas-Nordcbeck, A. (2021). Structural Performance of Sections Treated with Thin Overlays for Pavement Preservation [Comportamiento estructural de secciones tratadas con capas delgadas para la conservación de pavimentos]. *Transportation Research Record*, 2675(8), 382-393. <https://doi.org/10.1177/0361198121997816>

Rebelo, F. J. P., Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Sá, J. O. e, Marecos, V., & Afonso, J. (2023). Installation and Use of a Pavement Monitoring System Based on Fibre Bragg Grating Optical Sensors. *Infrastructures*, 8(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8100149>

Richardson, D. N. (1994). Estimation of Resilient Modulus of Fine-Grained Subgrade Soils. *Proceedings of the 37th Annual Asphalt Conference (1994, Rolla, MO)*, 30. https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1035&context=civarc_enveng_facwork



- Sahoo, J. P., & Singh, A. K. (2022). Prediction Models for Computation of Deformations and Interface Stresses in a Two-Layered Pavement Structure [Modelos de predicción para el cálculo de deformaciones y esfuerzos de interfaz en una estructura de pavimento de dos capas]. *International Journal of Geomechanics*, 22(1), 06021034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002246)
- Saltan, M., & Terzi, S. (2005). Comparative analysis of using artificial neural networks (ANN) and gene expression programming (GEP) in backcalculation of pavement layer thickness. *IJEMS Vol.12(1) [February 2005]*. <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/8412>
- Saltan, M., & Terzi, S. (2009). Backcalculation of pavement layer thickness and moduli using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Studies in Computational Intelligence*, 259, 177-204. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04586-8_6
- Sanjay, R., Tejeshwini, S., Mamatha, K. H., & Dinesh, S. V. (2022). Comparative study on structural evaluation of flexible pavement using BBD and FWD [Estudio comparativo de la evaluación estructural de pavimentos flexibles mediante BBD y FWD]. *Materials Today: Proceedings*, 60, 608-615. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.124>
- Schwartz, C. W., Li, R., Kim, S. H., Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2011). *Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction [Evaluación de la sensibilidad de la predicción del desempeño del MEPDG]* (Final Report No.



- Project 1-47; p. 505). National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) of The National Academies. <https://doi.org/10.17226/22625>
- Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). *Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements [Características de resiliencia de los suelos de subrasante y su relación con la falla por fatiga de los pavimentos asfálticos]*. 611-636. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=716093>
- Shubber, K. H. H., & Saad, A. A. (2020). Subgrade stabilization strategies effect on pavement thickness according to AASHTO pavement design method. (Review). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1), 012145. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012145>
- Singh, A. K., & Sahoo, J. P. (2020). Analysis and design of two layered flexible pavement systems: A new mechanistic approach. *Computers and Geotechnics*, 117, 103238. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103238>
- Sun, X., Han, J., Crippen, L., & Corey, R. (2017). Back-calculation of resilient modulus and prediction of permanent deformation for fine-grained subgrade under cyclic loading [Retrocálculo del módulo resiliente y predicción de la deformación permanente para subrasante de grano fino bajo carga cíclica]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 04016284. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001834](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001834)
- Supo, J., & Zacarías, H. (2020). *Metodología de la Investigación Científica: Para Las Ciencias de la Salud, Las Ciencias Sociales y las Ingenierías (3ra.)*. Amazon Digital Services LLC - KDP Print US.



- Thom, N. (2014). *Principles of Pavement Engineering [Principios de Ingeniería de Pavimentos]* (2nd. edition). ICE Publishing; __Principles-of-Pavement-Engineering 2nd-Ed Nick Thom 2014.pdf.
- Ullidtz, P. (1998). *Modelling flexible pavement response and performance*. Polyteknisk Forlag. <https://trid.trb.org/View/1163961>
- Vásquez V., L. R., & García O., F. J. (2017). Análisis racional de capas de conformación para pavimentos asfálticos. *XIX CILA, Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Ponencia 5, 13.*
- Von, 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 [Folleto de diseño para la determinación de la subrasante de diseño en apoyo de la guía AASHTO de 1993 para el diseño de estructuras de pavimento]* (p. 33). U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/p/97083/97083.pdf>
- Wiseman, G., Hoffman, M. S., Ishai, I., Livneh, M., & Uzan, J. (1977). Simple elastic models for pavement evaluation using measured surface deflection bowls. *TRI*.
- WSDOT. (2005, agosto). *Everseries© User's Guide Pavement Analysis Computer Software and Case Studies*. Washington State Department of Transportation (WSDOT); [EverseriesUserGuidePart1.pdf](http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/0C02BB7B-C345-4958-AA08-089E5E512B96/0/EverseriesUserGuidePart1.pdf). <http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/0C02BB7B-C345-4958-AA08-089E5E512B96/0/EverseriesUserGuidePart1.pdf>



- Wu, C., Wang, H., Zhao, J., Jiang, X., & Qiu, Y. (2020). Asphalt pavement modulus backcalculation using surface deflections under moving loads [Retrocálculo del módulo del pavimento asfáltico mediante deflexiones de la superficie bajo cargas en movimiento]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(11), 1246-1260. <https://doi.org/10.1111/mice.12624>
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design [Principios de diseño de pavimentos]* (2nd.). John Wiley & Sons, Inc.
- Zhang, X., Otto, F., & Oeser, M. (2021). Pavement moduli back-calculation using artificial neural network and genetic algorithms [Retrocálculo de los módulos del pavimento mediante redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos]. *Construction and Building Materials*, 287, 123026. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123026>
- Zipoli, L. L. R., & Avesani Neto, J. O. (2022). Evaluation of back-calculated elastic moduli of unreinforced and geocell-reinforced unbound granular material from full-scale field tests [Evaluación de los módulos elásticos retrocalculados de material granular no reforzado y reforzado con geoceldas a partir de ensayos de campo a escala real]. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(5), 910-921. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.006>



ANEXOS



ANEXOS

- Anexo A: Matriz de consistencia**
- Anexo B: Tramo experimental**
- Anexo C: Certificados de ensayos de laboratorio en suelo natural de subrasante**
- Anexo D: Certificados de ensayos de laboratorio en suelo de mejoramiento**
- Anexo E: Certificados de ensayos de deflectometría**
- Anexo F: Hojas de cálculo método de Hogg modificado**
- Anexo G: Reportes retrocálculo - Kenlayer**
- Anexo H: Prueba de normalidad a datos de deflexión registrados en campo**
- Anexo I: Tablas referenciales**
- Anexo J: Panel Fotográfico**



Anexo A:
Matriz de consistencia



MATRIZ DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Título: Influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante del pavimento, tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar

Autor: Wilfredo David Supo Pacori

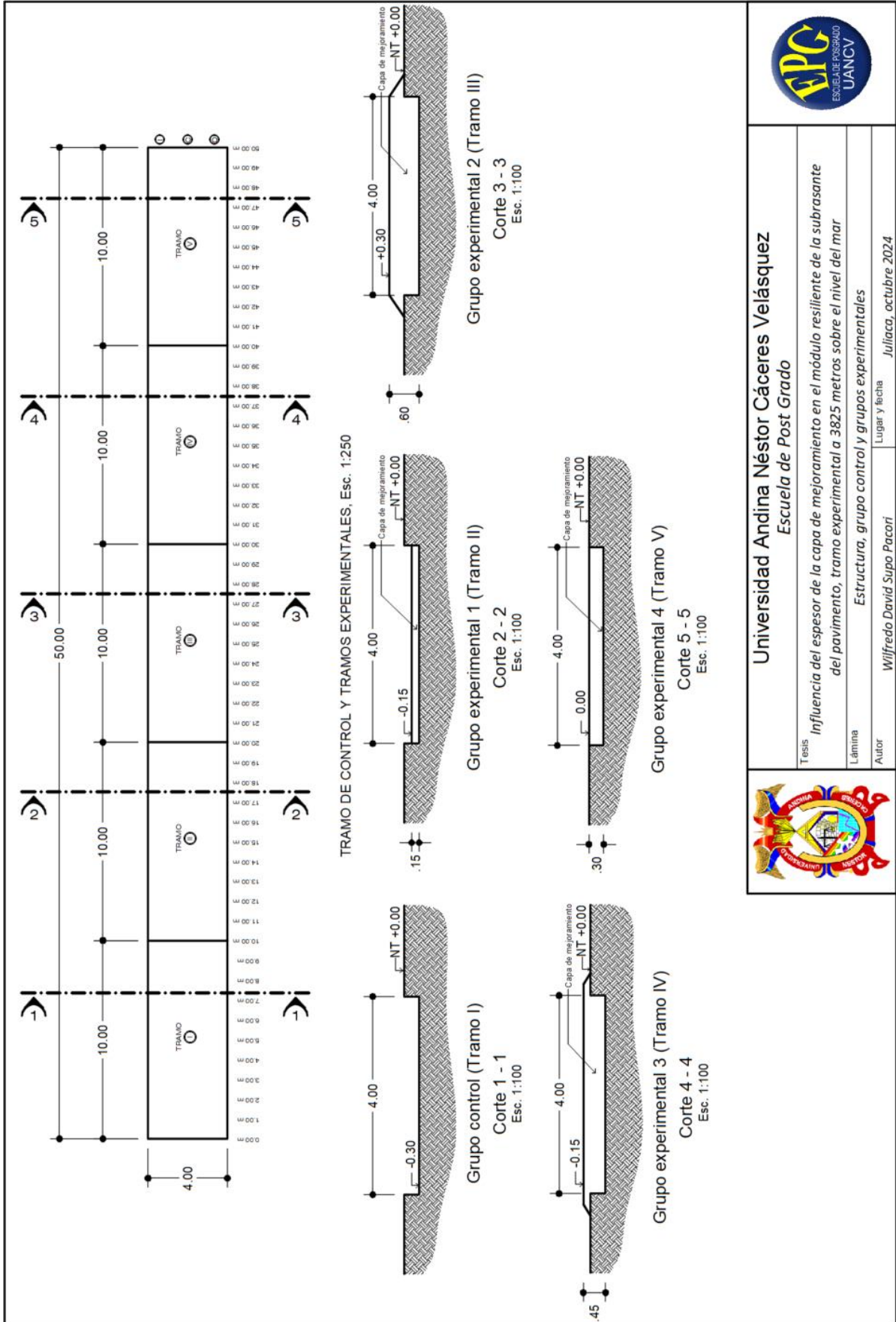
Fecha: Diciembre, 2023


LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN – P50

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	DEFINICIÓN	INDICADORES	ÍNDICE	POBLACIÓN Y MUESTRA
¿Cómo influye el espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante para diseño de pavimentos obtenidos por deflectometría con viga Benkelman y métodos analíticos de un tramo experimental en la ciudad de Juliaca a 3825 metros sobre el nivel del mar?	Explicar la influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante para diseño de pavimentos de un tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar.	El espesor de la capa de mejoramiento de la subrasante del tramo experimental a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca, influye en relación directa al módulo resiliente de diseño de la subrasante, correspondiendo a la regresión exponencial con mejor coeficiente de determinación para una adecuada profundidad de influencia.	<p>Variable Independiente</p> <p>1. Espesor de la capa de mejoramiento</p>	Espesor de la capa de mejoramiento conformada con material de préstamo colocado y compactado sobre el suelo natural, para mejorar la resistencia de la subrasante.	eCM	m	<p>Población Población infinita compuesta por subrasantes para pavimentos de la zona Sur de la ciudad de Juliaca.</p> <p>Muestra. La muestra fue determinada por procedimiento no probabilístico a conveniencia del investigador. Está compuesta por la subrasante del tramo de experimentación de 50m de longitud por 4m de ancho.</p>
<p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>PE1. ¿Qué propiedades físico-mecánicas presenta el suelo natural de la subrasante del tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar en la ciudad de Juliaca?</p> <p>PE2. ¿Qué propiedades físico-mecánicas presenta el suelo de mejoramiento de la subrasante del tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar en la ciudad de Juliaca?</p> <p>PE3. ¿Qué diferencias presentan las deflexiones medidas con viga Benkelman de la subrasante del tramo experimental a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca y las deflexiones teóricas obtenidas por métodos analíticos?</p> <p>PE4. ¿Cuál es el valor de diseño de la subrasante del tramo experimental ubicado a 3825 m.s.n.m. en la ciudad de Juliaca, obtenido mediante estudio deflectométrico con viga Benkelman?</p>	<p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>OE1. Evidenciar las propiedades físico-mecánicas del suelo natural de la subrasante de diseño.</p> <p>OE2. Evidenciar las propiedades físico-mecánicas del suelo de mejoramiento de la subrasante de diseño.</p> <p>OE3. Comparar las deflexiones medidas con viga Benkelman de la subrasante del tramo experimental a 3825 msnm en la ciudad de Juliaca y las deflexiones teóricas obtenidas por métodos analíticos.</p> <p>OE4. Determinar el valor de diseño de la subrasante del tramo experimental a escala real ubicado a 3825 m.s.n.m., mediante estudio deflectométrico con viga Benkelman.</p>	<p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p> <p>HE1. No corresponde</p> <p>HE2. No corresponde</p> <p>HE3. No corresponde</p> <p>HE4. No corresponde</p>	<p>Variable Dependiente</p> <p>2. Módulo resiliente de la subrasante</p> <p>VARIABLES INTERVINIENTES</p> <p>3. Nivel freático.</p> <p>4. CBR del suelo de mejoramiento</p>	<p>Esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable.</p> <p>Altura a la que se encuentra el agua en una perforación; posición de la superficie superior del agua en un acuífero. En los acuíferos libres, el nivel freático coincide con el nivel piezométrico.</p> <p>CBR del material de préstamo de cantera colocado y compactado en capas sobre el suelo natural.</p>	<p>M_R Suelo natural M_R Capa de mejoramiento</p> <p>h</p> <p>CBR</p>	<p>kPa</p> <p>m</p> <p>%</p>	<p>TÉCNICAS E INSTRUMENTOS</p> <p>1. Retrocálculo de módulos mediante ensayos NDT. <ul style="list-style-type: none"> ○ Método de Hogg modificado ○ Método de Huang - Kenlayer </p> <p>2. Deflectometría con viga Benkelman</p> <p>3. Laboratorio de mecánica de suelos.</p> <p>4. Análisis estadístico.</p> <p>Método: Deductivo</p> <p>Tipo <ul style="list-style-type: none"> • Según la intervención del investigador: Con intervención • Según el control de la medición de la variable de estudio: Con control de la medición • Según el número de mediciones de la variable de estudio: Longitudinal • Según el número de variables analíticas: Con más de una variable </p> <p>Nivel Explicativo</p> <p>Diseño: Cuasi-experimental</p>




Anexo B:
Tramo experimental





Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez
Escuela de Post Grado

<p>Tesis <i>Influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante del pavimento, tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar</i></p>	<p>Lugar y fecha Juliac, octubre 2024</p>
<p>Lámina Estructura, grupo control y grupos experimentales</p>	<p>Autor Wilfredo David Supo Pacori</p>





Anexo C:
**Certificados de ensayos de laboratorio en suelo
natural de subrasante**



REGISTRO DE ESTRATIGRAFÍA

PROYECTO	INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR		SONDAJE P1
SOLICITANTE	: WILFREDO DAVID SUPO PACORI		
UBICACIÓN	: CIUDAD UNIVERSITARIA UANCV JULIACA		
COORD. UTM	: 379573.62m E 8282396.75m S		
TÉCNICA INVEST.	: POZO A CIELO ABIERTO	DIMENSIÓN CALICATA	: 0.90m x 0.90m
PROFUNDIDAD	: 0.00 - 1.40 m	NIVEL FREÁTICO	: 1.10m
FECHA EXCAV.	: 12/09/2019	FECHA REGISTRO	: 12/09/2019
FECHA CERTIF.	: 26/09/2019	REGISTRADO POR	: C. Y.

PROF. (m)	NIVEL FREÁTICO	MUESTRA	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
0.10		M-1		DESBROCE	
0.20					
0.30					
0.40		M-2	CL A - 6 (10)	Arcilla inorgánica con arena, plasticidad media, consistencia blanda; de condiciones en el sitio: de color marrón oscuro, húmeda.	
0.50					
0.60					
0.70					
0.80					
0.90		M-3	CL A - 7 - 5 (8)	Arcilla inorgánica con arena, plasticidad media, consistencia blanda; de condiciones en el sitio: de color marrón claro, húmeda.	
1.00					
1.10	N.F. 1.10 m				
1.20					
1.30					
1.40					
1.50					
1.60					
1.70					
1.80					
1.90					
2.00					
2.10					
2.20					
2.30					
2.40					
2.50					

OBSERVACION:

UANCV - P. 001
 CAP INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS
 JULIACA
 Ing. Oscar V. Viamonte Calle
 CIP 32730



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 2

CANTERA : POZO 1

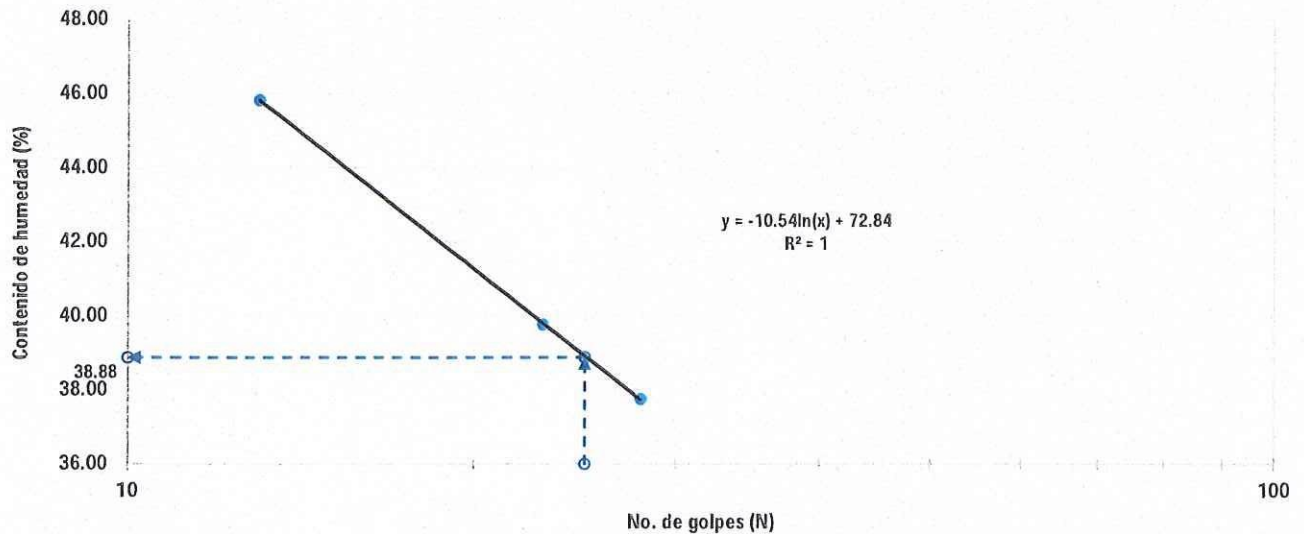
FECHA : 26 DE SETIEMBRE DEL 2019

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D-424

DESCRIPCIÓN		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
01. No. DE GOLPES	N	28	23	13		
02. TARRO No.		5	6	7	T3	T4
03. SUELO HÚMEDO * TARRO	g	27.03	30.01	28.50	12.83	15.89
04. SUELO SECO * TARRO	g	22.80	24.77	23.20	11.17	13.19
05. PESO DEL AGUA	g	4.22	5.24	5.30	1.66	2.70
06. PESO DEL TARRO	g	11.62	11.59	11.62	5.59	2.63
07. PESO DEL SUELO SECO	g	11.19	13.18	11.58	5.58	10.56
08. HUMEDAD	%	37.75	39.77	45.82	29.75	25.57

L.L. = 38.88 %	L.P. = 27.66 %	I.P. = 11.22 %
----------------	----------------	----------------

LÍMITE LÍQUIDO



UANCV - PUNO
 CAP INGENIERÍA CIVIL
 Ing. Oscar V. Viamonte Calla
 CIP 32730



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 3

CANTERA : POZO 1

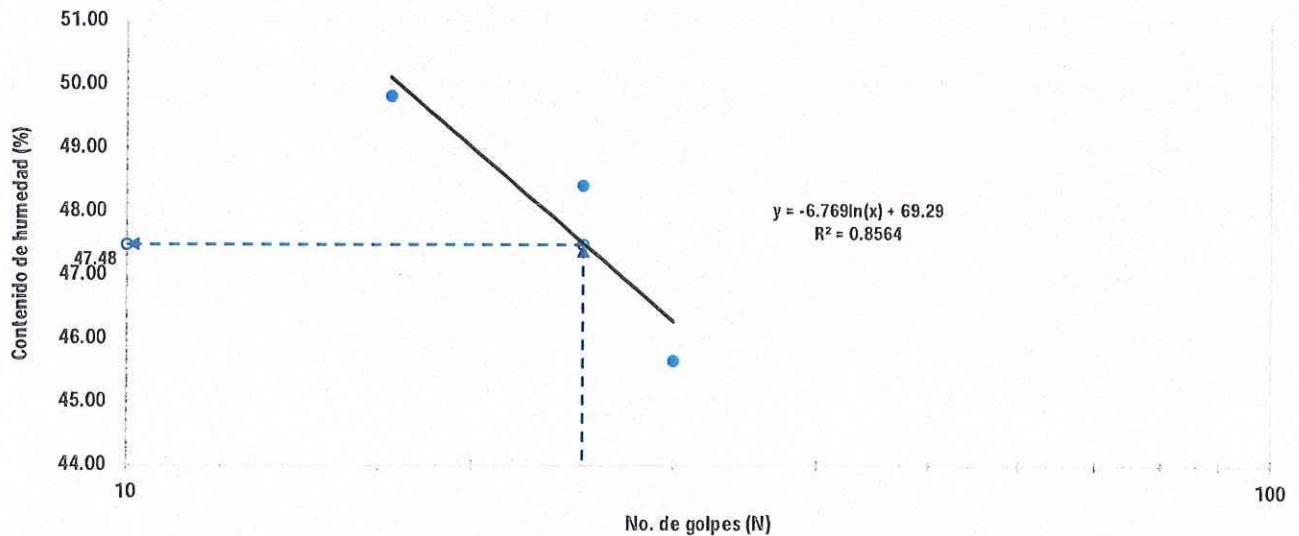
FECHA : 26 DE SETIEMBRE DEL 2019

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D-424

DESCRIPCIÓN		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
01. No. DE GOLPES	N	30	25	17		
02. TARRO No.		9	10	12	T7	T11
03. SUELO HÚMEDO * TARRO	g	12.67	17.62	18.11	13.21	18.72
04. SUELO SECO * TARRO	g	9.52	13.81	13.93	11.22	14.62
05. PESO DEL AGUA	g	3.15	3.81	4.18	1.99	4.10
06. PESO DEL TARRO	g	2.62	5.94	5.54	5.60	2.89
07. PESO DEL SUELO SECO	g	6.90	7.87	8.39	5.62	11.73
08. HUMEDAD	%	45.65	48.41	49.82	35.41	34.95

L.L. = 47.48 %	L.P. = 35.18 %	I.P. = 12.30 %
----------------	----------------	----------------

LÍMITE LÍQUIDO





PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO,
 TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR
 SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI
 UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO
 MUESTRA : MUESTRA 2
 CANTERA : POZO 1
 FECHA : 26 DE SETIEMBRE DEL 2019

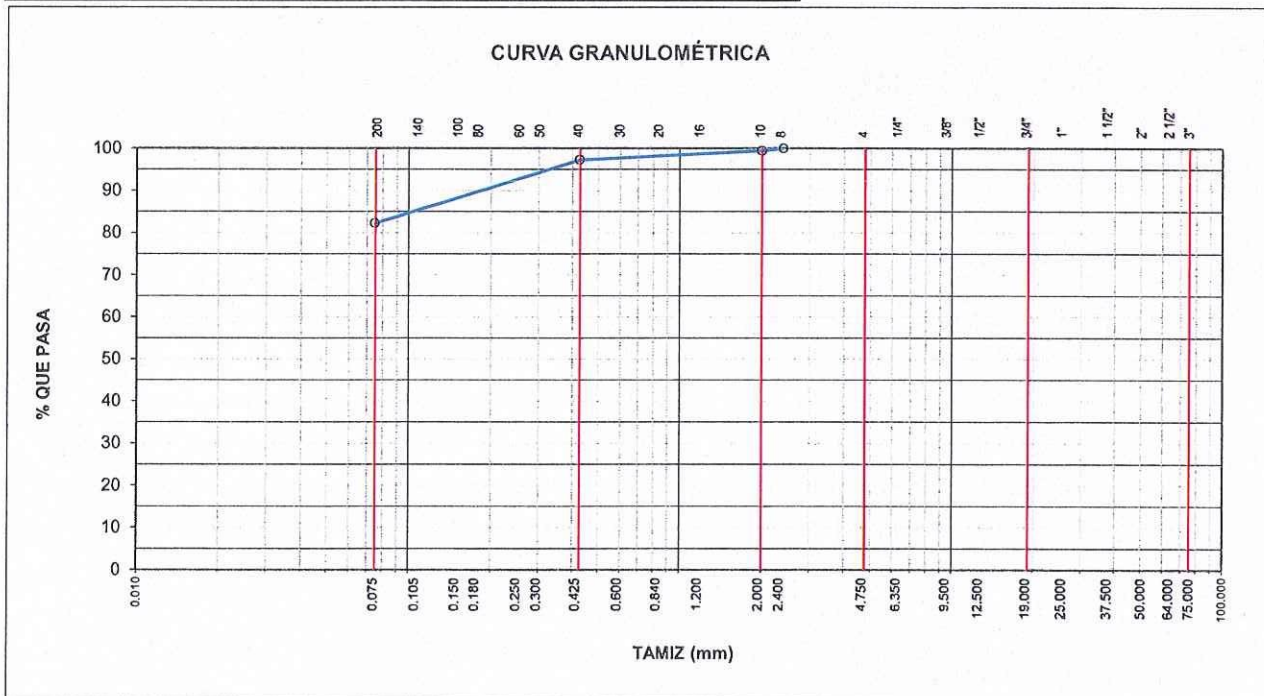
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D-422

TAMIZ (ASTM D-422)	Peso Retenido (g)	Corrección (g)	Peso Ret. Correg (g)	% Retenido	% Ret. Acum.	% Que Pasa
3	75.000					
2 1/2	64.000					
2	50.000					
1 1/2	37.500					
1	25.000					
3/4	19.000					
1/2	12.500					
3/8	9.500					
1/4	6.350					
Nº 4	4.750					
Nº 8	2.400	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 10	2.000	1.80	0.00	1.80	0.59	99.41
Nº 16	1.200					
Nº 20	0.840					
Nº 30	0.600					
Nº 40	0.425	6.60	0.00	6.60	2.15	97.27
Nº 50	0.300					
Nº 60	0.250					
Nº 80	0.180					
Nº 100	0.150					
Nº 140	0.105					
Nº 200	0.075	46.20	0.00	46.20	15.03	82.24
x Tamizado	0	252.80	0.00	252.80	82.24	100.00
x Lavado		0.00	0.00			
Total	307.40	0.00	307.40	100.00		

DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
PESO HUMEDO ANTES DE LAVADO	307.40	g
PESO SECO ANTES DE LAVADO	307.40	g
PESO RETENIDO ACUMULADO	307.40	g
ERROR EN EL ENSAYO	0.00	0.00%
MAT. QUE PASA LA MALLA #200 (g)	252.80	82.24%
Por tamizado	252.80	g
Por lavado	0.00	g
MATERIAL	%	COEFICIENTES
GRAVA	-	D10 = -
GRAVA GRUESA	-	D30 = -
GRAVA FINA	-	D60 = 0.05
ARENA	17.76	Cc = -
ARENA GRUESA	0.59	Cu = -
ARENA MEDIA	2.15	PLASTICIDAD
ARENA FINA	15.03	LL (%) = 38.88
FINO	82.24	LP (%) = 27.66
TAMAÑO MÁXIMO	Nº 8	IP (%) = 11.22

CLASIFICACIÓN	
SUCS	CL
AASHTO	A - 6 (10)

OBSERVACIONES: Según el SUCS el suelo es una arcilla magra arenosa (CL). Según AASHTO es un suelo malo para subrasante, con índice de grupo igual a 10, A - 6 (10).





PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 3

CANTERA : POZO 1

FECHA : 26 DE SETIEMBRE DEL 2019

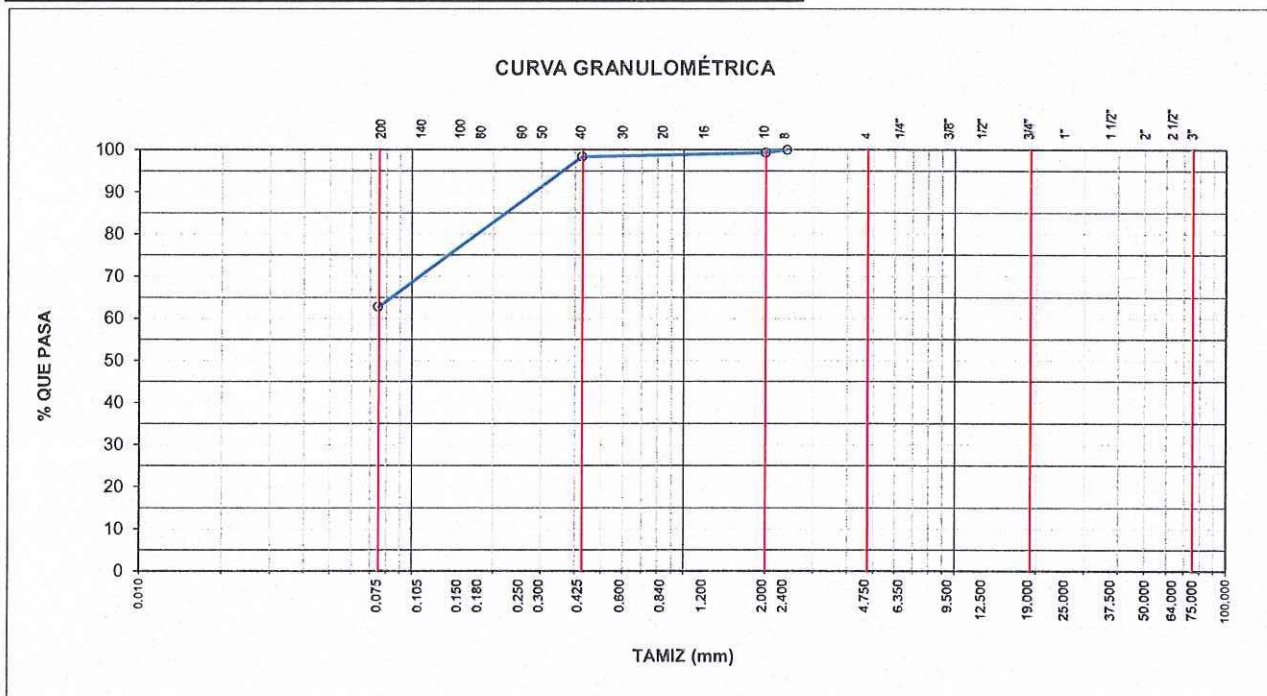
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D-422

TAMIZ (ASTM D-422)	Peso Retenido (g)	Corrección (g)	Peso Ret. Correg (g)	% Retenido	% Ret. Acum.	% Que Pasa
3	75.000					
2 1/2	64.000					
2	50.000					
1 1/2	37.500					
1	25.000					
3/4	19.000					
1/2	12.500					
3/8	9.500					
1/4	6.350					
Nº 4	4.750					
Nº 8	2.400	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 10	2.000	2.30	2.32	0.67	0.67	99.33
Nº 16	1.200					
Nº 20	0.840					
Nº 30	0.600					
Nº 40	0.425	3.30	3.33	0.97	1.64	98.36
Nº 50	0.300					
Nº 60	0.250					
Nº 80	0.180					
Nº 100	0.150					
Nº 140	0.105					
Nº 200	0.075	121.60	1.07	122.67	35.60	62.76
x Tamizado	0	214.40	1.88	216.28	62.76	100.00
x Lavado	0.00	0.00				
Total	341.60	3.00	344.60	100.00		

DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	
PESO HUMEDO ANTES DE LAVADO	344.60 g
PESO SECO ANTES DE LAVADO	344.60 g
PESO RETENIDO ACUMULADO	341.60 g
ERROR EN EL ENSAYO	3.00 0.87%
MAT. QUE PASA LA MALLA #200 (g)	216.28 62.76%
Por tamizado	216.28 g
Por lavado	0.00 g
MATERIAL	COEFICIENTES
GRAVA	D10 = -
GRAVA GRUESA	D30 = -
GRAVA FINA	D60 = 0.07
ARENA	Cc = -
ARENA GRUESA	Cu = -
ARENA MEDIA	PLASTICIDAD
ARENA FINA	LL (%) = 47.48
FINO	LP (%) = 35.18
TAMAÑO MÁXIMO	Nº 8 IP (%) = 12.30

CLASIFICACIÓN	
SUCS	CL
AASHTO	A - 7 - 5 (8)

OBSERVACIONES: Según el SUCS el suelo es una arcilla magra arenosa (CL). Según AASHTO es un suelo malo para subrasante, con índice de grupo igual a 8, A - 5 (8).



UANCV - FICP
 CAP INGENIERIA CIVIL
 Ing. Oscar V. Viamonte Calle
 CIP 32730



REGISTRO DE ESTRATIGRAFÍA

PROYECTO	INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR		SONDAJE
SOLICITANTE	: WILFREDO DAVID SUPO PACORI		P2
UBICACIÓN	: CIUDAD UNIVERSITARIA UANCV JULIACA		
COORD. UTM	: 379615.32m E 8282354.91m S		
TÉCNICA INVEST.	: POZO A CIELO ABIERTO	DIMENSIÓN CALICATA	: 0.90m x 0.90m
PROFUNDIDAD	: 0.00 - 1.30 m	NIVEL FREÁTICO	: 1.10m
FECHA EXCAV.	: 12/09/2019	FECHA REGISTRO	: 12/09/2019
FECHA CERTIF.	: 26/09/2019	REGISTRADO POR	: C. Y.

PROF. (m)	NIVEL FREÁTICO	MUESTRA	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
0.10		M-1		DESBROCE	
0.20					
0.30					
0.40		M-2	CL A - 6 (11)	Arcilla inorgánica con arena, plasticidad media, consistencia blanda; de condiciones en el sitio: de color marrón oscuro, húmeda.	
0.50					
0.60					
0.70		M-3	CL A - 7 - 5 (10)	Arcilla inorgánica con arena, plasticidad media, consistencia blanda; de condiciones en el sitio: de color marrón claro, húmeda.	
0.80					
0.90					
1.00					
1.10	N.F. 1.10 m				
1.20					
1.30					
1.40					
1.50					
1.60					
1.70					
1.80					
1.90					
2.00					
2.10					
2.20					
2.30					
2.40					
2.50					

OBSERVACION:



UANCV - FICP
CAP INGENIERIA CIVIL
Ing. Oscar V. Villante Calle
CIP 32730



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 2

CANTERA : POZO 2

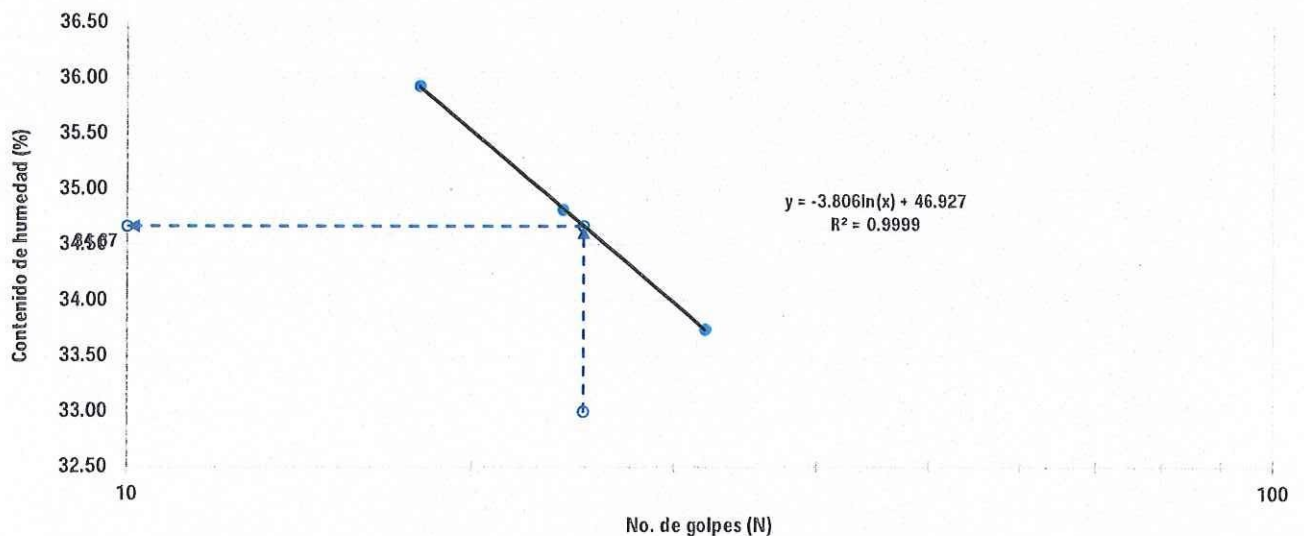
FECHA : 26 DE SETIEMBRE DEL 2019

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D-424

DESCRIPCIÓN		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
		32	24	18		
01. No. DE GOLPES	N	32	24	18		
02. TARRO No.		31	32	34	42	43
03. SUELO HÚMEDO * TARRO	g	14.85	16.88	18.52	13.10	16.00
04. SUELO SECO * TARRO	g	11.80	13.20	14.37	11.20	13.58
05. PESO DEL AGUA	g	3.05	3.68	4.15	1.90	2.42
06. PESO DEL TARRO	g	2.76	2.63	2.82	2.69	2.49
07. PESO DEL SUELO SECO	g	9.04	10.57	11.55	8.51	11.09
08. HUMEDAD	%	33.74	34.82	35.93	22.33	21.82

L.L. = 34.67 %	L.P. = 22.08 %	I.P. = 12.60 %
----------------	----------------	----------------

LÍMITE LÍQUIDO



UANCV - FICP
 CAP INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO M.S.C.A. JEFATURA
 Ing. Oscar V. Viamonte Calla
 CIP 32730



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 3

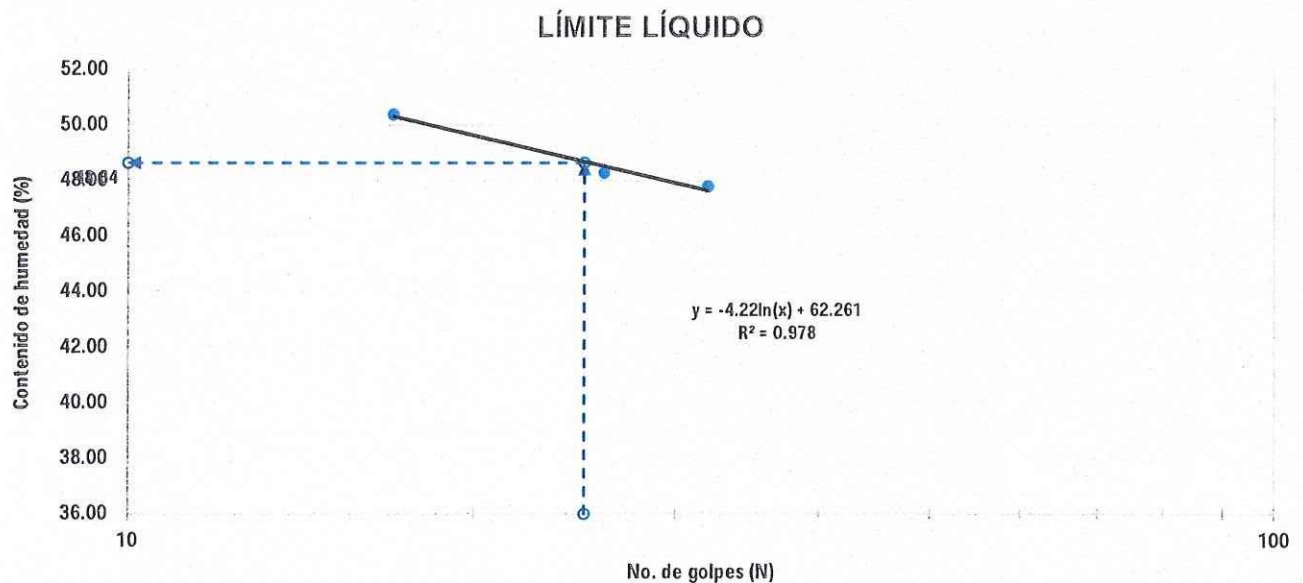
CANTERA : POZO 2

FECHA : 26 DE SETIEMBRE DEL 2019

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D-424

DESCRIPCIÓN		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
01. No. DE GOLPES	N	32	26	17		
02. TARRO No.		14	18	33	10	41
03. SUELO HÚMEDO * TARRO	g	19.99	24.90	26.28	13.29	16.46
04. SUELO SECO * TARRO	g	14.36	18.72	19.59	11.67	13.20
05. PESO DEL AGUA	g	5.63	6.18	6.69	1.62	3.26
06. PESO DEL TARRO	g	2.58	5.92	6.31	6.45	3.02
07. PESO DEL SUELO SECO	g	11.78	12.80	13.28	5.22	10.18
08. HUMEDAD	%	47.79	48.28	50.38	31.03	32.02

L.L. = 48.64 %	L.P. = 31.53 %	I.P. = 17.12 %
----------------	----------------	----------------




 UANCV - PUNO
 CAP INGENIERIA CIVIL
 Ing. Oscar V. Plamonte Calla
 CIP 32730



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 2

CANTERA : POZO 2

FECHA : 26 DE SETIEMBRE DEL 2019

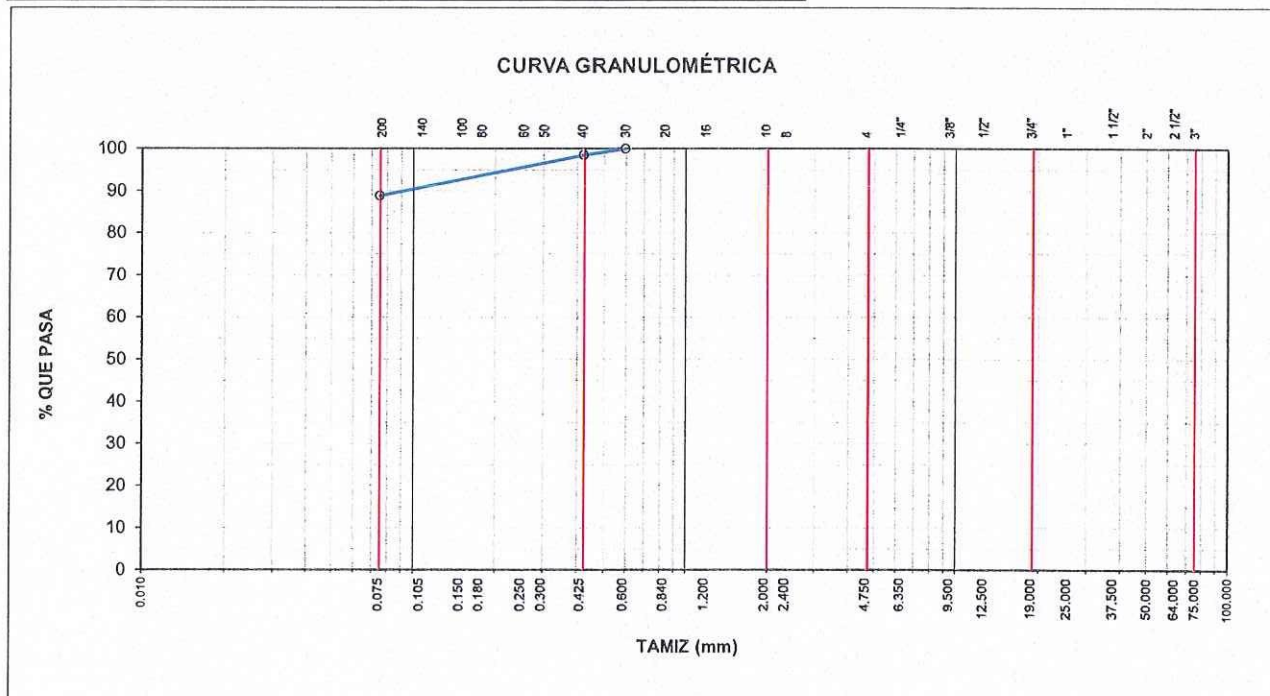
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D-422

TAMIZ (ASTM D-422)		Peso Retenido (g)	Corrección (g)	Peso Ret. Correg (g)	% Retenido	% Ret. Acum.	% Que Pasa
plg.	mm						
3	75.000						
2 1/2	64.000						
2	50.000						
1 1/2	37.500						
1	25.000						
3/4	19.000						
1/2	12.500						
3/8	9.500						
1/4	6.350						
Nº 4	4.750						
Nº 8	2.400						
Nº 10	2.000						
Nº 16	1.200						
Nº 20	0.840						
Nº 30	0.600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 40	0.425	4.80	0.05	4.85	1.51	1.51	98.49
Nº 50	0.300						
Nº 60	0.250						
Nº 80	0.180						
Nº 100	0.150						
Nº 140	0.105						
Nº 200	0.075	30.90	0.29	31.19	9.69	11.20	88.80
x Tamizado	0	283.10	2.66	285.76	88.80	100.00	0.00
x Lavado		0.00	0.00				
Total		318.80	3.00	321.80	100.00		

DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	
PESO HUMEDO ANTES DE LAVADO	321.80 g
PESO SECO ANTES DE LAVADO	321.80 g
PESO RETENIDO ACUMULADO	318.80 g
ERROR EN EL ENSAYO	3.00 0.93%
MAT. QUE PASA LA MALLA #200 (g)	285.76 88.80%
Por tamizado	285.76 g
Por lavado	0.00 g
MATERIAL	COEFICIENTES
GRAVA	D10 = -
GRAVA GRUESA	D30 = -
GRAVA FINA	D60 = 0.05
ARENA	Cc = -
ARENA GRUESA	Cu = -
ARENA MEDIA	1.51
ARENA FINA	9.69
FINO	88.80
TAMAÑO MÁXIMO	Nº 30
PLASTICIDAD	
LL (%) =	34.68
LP (%) =	22.08
IP (%) =	12.60

CLASIFICACIÓN	
SUCS	CL
AASHTO	A - 6 (11)

OBSERVACIONES: Según el SUCS el suelo es una arcilla magra arenosa (CL). Según AASHTO es un suelo malo para subrasante, con índice de grupo igual a 11, A - 6 (11).





PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 3

CANTERA : POZO 2

FECHA : 26 DE SETIEMBRE DEL 2019

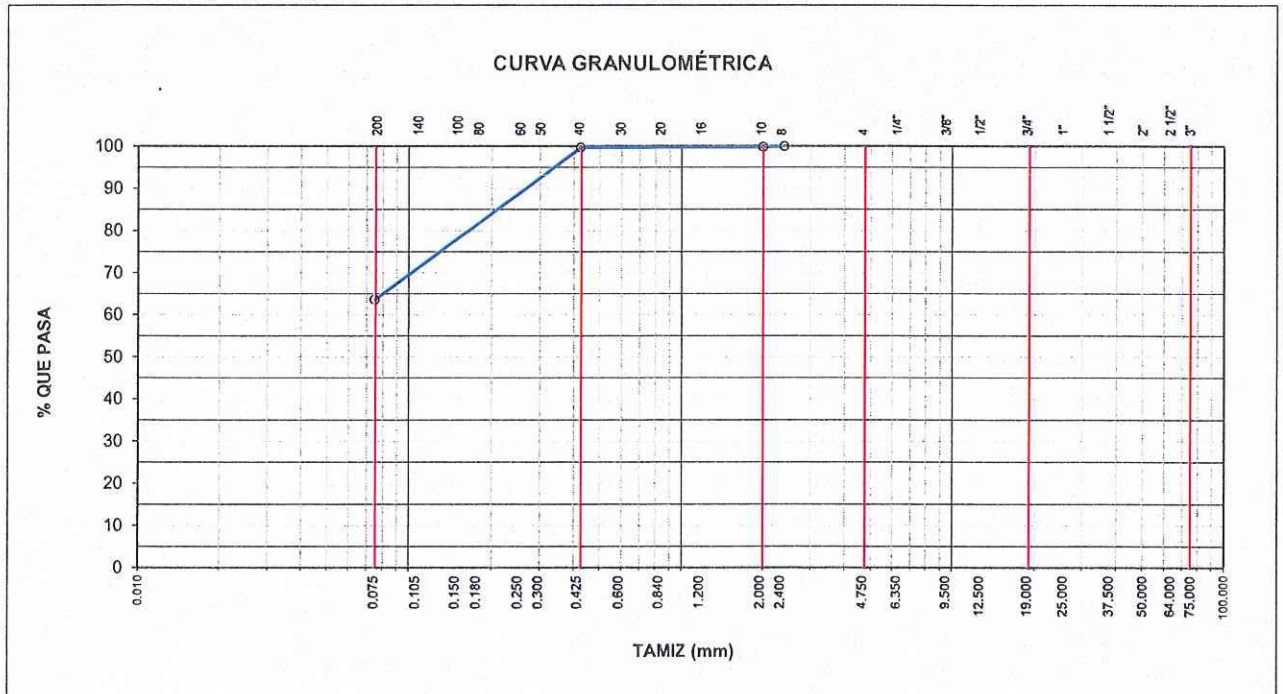
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D-422

TAMIZ (ASTM D-422)	Peso Retenido (g)	Corrección (g)	Peso Rel. Correg (g)	% Retenido	% Rel. Acum.	% Que Pasa
plg.						
mm						
3	75.000					
2 1/2	64.000					
2	50.000					
1 1/2	37.500					
1	25.000					
3/4	19.000					
1/2	12.500					
3/8	9.500					
1/4	6.350					
Nº 4	4.750					
Nº 8	2.400	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 10	2.000	0.50	0.00	0.50	0.15	99.85
Nº 16	1.200					
Nº 20	0.840					
Nº 30	0.600					
Nº 40	0.425	0.50	0.00	0.50	0.15	99.71
Nº 50	0.300					
Nº 60	0.250					
Nº 80	0.180					
Nº 100	0.150					
Nº 140	0.105					
Nº 200	0.075	121.60	0.88	122.48	36.08	63.62
x Tamizado	0	214.40	1.55	215.95	63.62	100.00
x Lavado		0.00	0.00			
Total		337.00	2.44	339.43	100.00	

DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
PESO HUMEDO ANTES DE LAVADO	339.44	g
PESO SECO ANTES DE LAVADO	339.44	g
PESO RETENIDO ACUMULADO	337.00	g
ERROR EN EL ENSAYO	2.44	0.72%
MAT. QUE PASA LA MALLA #200 (g)	215.95	63.62%
Por tamizado	215.95	g
Por lavado	0.00	g
MATERIAL	%	COEFICIENTES
GRAVA	-	D10 = -
GRAVA GRUESA	-	D30 = -
GRAVA FINA	-	D60 = 0.07
ARENA	36.38	Cc = -
ARENA GRUESA	0.15	Cu = -
ARENA MEDIA	0.15	PLASTICIDAD
ARENA FINA	36.08	LL (%) = 48.65
FINO	63.62	LP (%) = 31.53
TAMAÑO MÁXIMO	Nº 8	IP (%) = 17.12

CLASIFICACIÓN	
SUCS	CL
AASHTO	A - 7 - 5 (10)

OBSERVACIONES: Según el SUCS el suelo es una arcilla magra arenosa (CL). Según AASHTO es un suelo malo para subrasante, con índice de grupo igual a 10, A - 7 - 5 (10).



UANCV - FICP
 CAP INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO M.S.C. JEFATURA
 Ing. Oscar V. Mamoni Culla
 CIP 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

COORDENADA ESTE : 379586

COORDENADA NORTE : 8282405

PROFUNDIDAD DEL ENSAYO : 0.30 metros

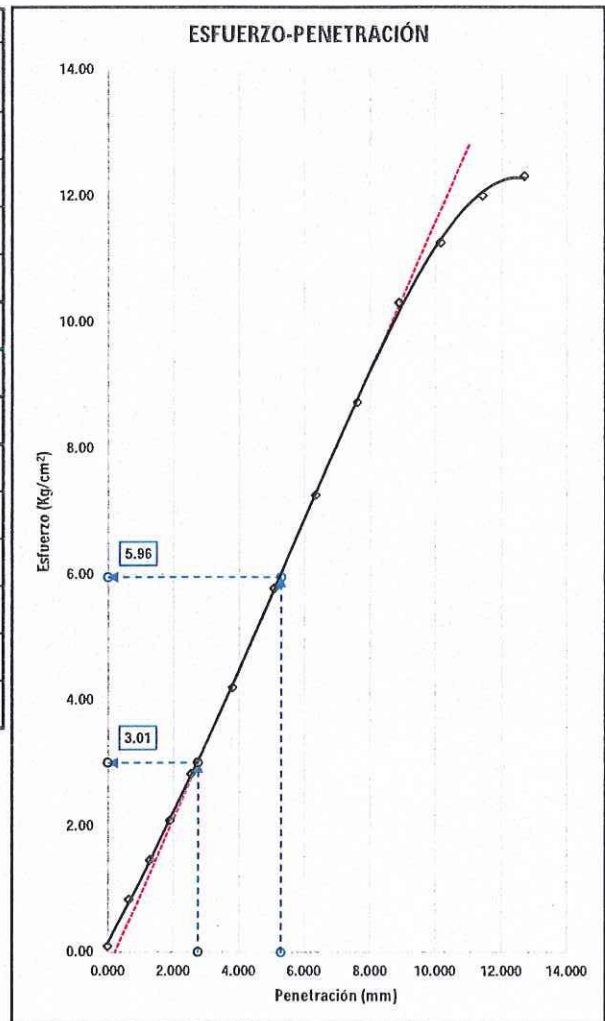
CAPA/SUPERFICIE : Suelo natural

FECHA DEL ENSAYO : 06 de setiembre, 2019

ENSAYO DE CBR IN SITU

METODO ASTM D - 4429

PENETRACIÓN			ESFUERZOS		
TIEMPO	mm.	pulg.	LECTURA DIAL	ESFUERZO kg/cm ²	ESF. CORREG. kg/cm ²
0.00	0.000	0.000	0	0.09	
0.30	0.635	0.025	7	0.83	
1.00	1.270	0.050	13	1.46	
1.30	1.905	0.075	19	2.09	
2.00	2.540	0.100	26	2.83	3.01
3.00	3.810	0.150	39	4.20	
4.00	5.080	0.200	54	5.78	5.96
5.00	6.350	0.250	68	7.26	
6.00	7.620	0.300	82	8.73	
7.00	8.890	0.350	97	10.31	
8.00	10.160	0.400	106	11.26	
9.00	11.430	0.450	113	12.00	
10.00	12.700	0.500	116	12.31	



CBR 0.1" (2.54mm) ⁽¹⁾	4.3 %
CBR 0.1" (2.54mm) ⁽²⁾	5.7 %
SOBRECARGA	13.6 kg

DATOS EN EL PUNTO DE ENSAYO	
HUMEDAD	8.21 %
DENSIDAD SECA	1.759 g/cm ³

CBR_{IN SITU} 5.7%

(1) Esfuerzo patrón para 0.1" = 70.31 Kg/cm² = 1,000 psi

(2) Esfuerzo patrón para 0.2" = 105.46 Kg/cm² = 1,500 psi





UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
 FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

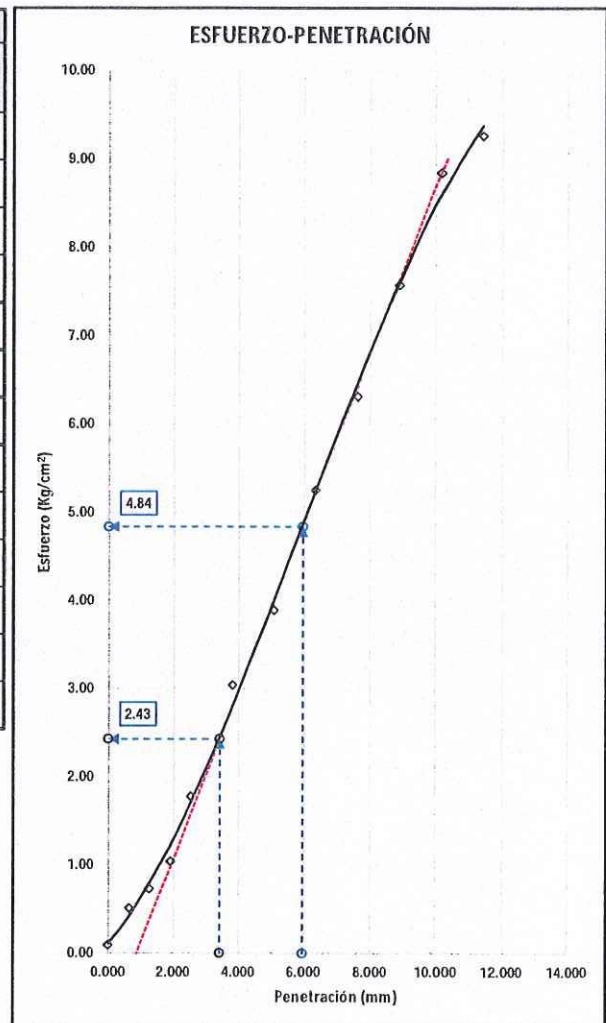
COORDENADA ESTE : 379595
 COORDENADA NORTE : 8282353
 PROFUNDIDAD DEL ENSAYO : 0.30 metros

CAPA/SUPERFICIE : Suelo natural
 FECHA DEL ENSAYO : 06 de setiembre, 2019

ENSAYO DE CBR IN SITU

METODO ASTM D - 4429

PENETRACIÓN			ESFUERZOS		
TIEMPO	mm.	pulg.	LECTURA DIAL	ESFUERZO kg/cm ²	ESF. CORREG. kg/cm ²
0.00	0.000	0.000	0	0.09	
0.30	0.635	0.025	4	0.51	
1.00	1.270	0.050	6	0.73	
1.30	1.905	0.075	9	1.04	
2.00	2.540	0.100	16	1.78	2.43
3.00	3.810	0.150	28	3.04	
4.00	5.080	0.200	36	3.89	4.84
5.00	6.350	0.250	49	5.25	
6.00	7.620	0.300	59	6.31	
7.00	8.890	0.350	71	7.57	
8.00	10.160	0.400	83	8.84	
9.00	11.430	0.450	87	9.26	
10.00	12.700	0.500			



CBR 0.1" (2.54mm) ⁽¹⁾	3.5 %
CBR 0.1" (2.54mm) ⁽²⁾	4.6 %
SOBRECARGA	13.6 kg

DATOS EN EL PUNTO DE ENSAYO	
HUMEDAD	8.70 %
DENSIDAD SECA	1.706 g/cm ³

CBR_{IN SITU} 4.6%

(1) Esfuerzo patrón para 0.1" = 70.31 Kg/cm² = 1,000 psi
 (2) Esfuerzo patrón para 0.2" = 105.46 Kg/cm² = 1,500 psi





Anexo D:
**Certificados de ensayos de laboratorio en suelo de
mejoramiento**



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : ING. WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 1

CANtera : TAPARACHI

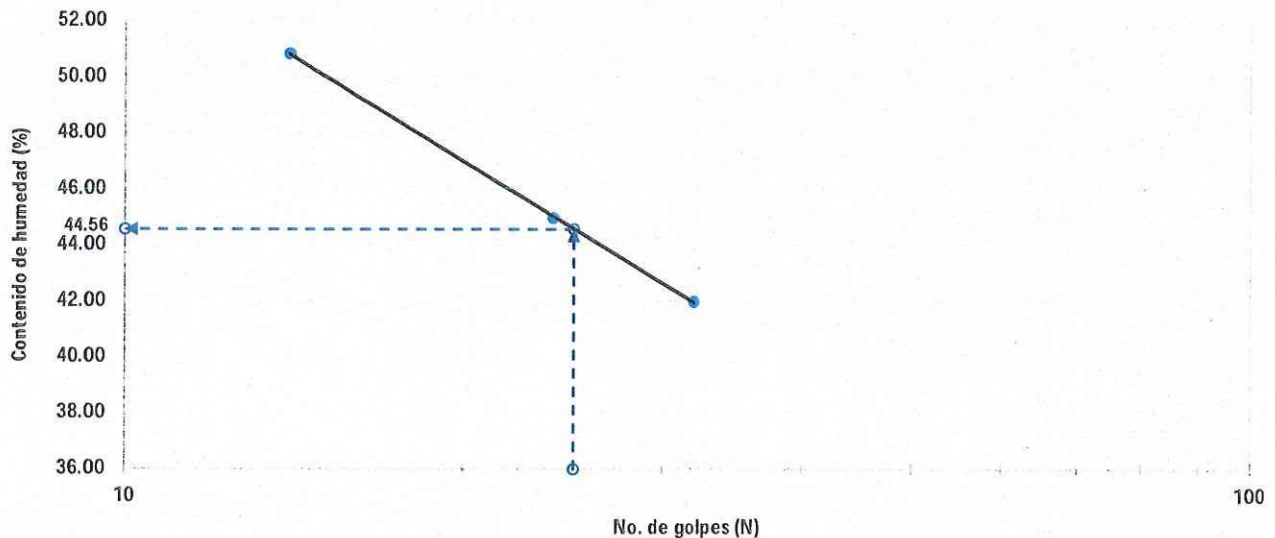
FECHA : 05 DE AGOSTO DEL 2019

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D-424

DESCRIPCIÓN		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
01. No. DE GOLPES	N	32	24	14		
02. TARRO No.		5	6	7	T3	T4
03. SUELO HÚMEDO * TARRO	g	27.50	30.70	29.08	11.59	11.3
04. SUELO SECO * TARRO	g	22.80	24.77	23.20	9.94	9.65
05. PESO DEL AGUA	g	4.70	5.93	5.88	1.65	1.65
06. PESO DEL TARRO	g	11.62	11.59	11.62	4.3775	4.4187
07. PESO DEL SUELO SECO	g	11.19	13.18	11.58	5.56	5.23
08. HUMEDAD	%	41.98	44.97	50.83	29.66	31.54

L.L. = 44.56 %	L.P. = 30.60 %	I.P. = 13.96 %
----------------	----------------	----------------

LÍMITE LÍQUIDO



UANCV - IICP
 CAP INGENIERIA CIVIL
 Ing. Oscar V. Valiente Coña
 CIP 32739



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : ING. WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 1

CANTERA : TAPARACHI

FECHA : 05 DE AGOSTO DEL 2019

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D-422

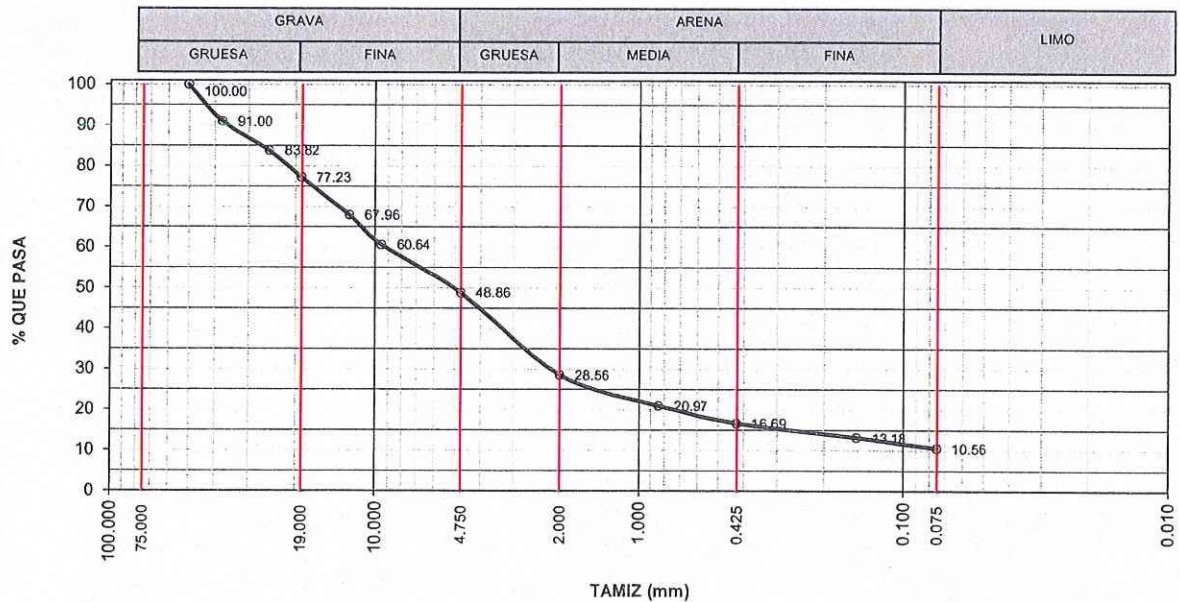
TAMIZ (ASTM D-422)	Peso Retenido (g)	Corrección (g)	Peso Ret. Correg (g)	% Retenido	% Ret. Acum.	% Que Pasa
3	75.000					
2	50.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2	37.500	440.00	3.96	443.96	9.00	91.00
1	25.000	351.00	3.16	354.16	7.18	83.82
3/4	19.000	322.00	2.90	324.90	6.59	77.23
1/2	12.500	453.00	4.08	457.08	9.27	67.96
3/8	9.500	358.00	3.22	361.22	7.32	60.64
Nº 4	4.750	576.00	5.18	581.18	11.78	48.86
Nº 10	2.000	992.00	8.93	1,000.93	20.30	28.56
Nº 20	0.840	371.00	3.34	374.34	7.59	20.97
Nº 40	0.425	209.00	1.88	210.88	4.28	16.69
Nº 100	0.150	172.00	1.55	173.55	3.52	13.18
Nº 200	0.075	128.00	1.15	129.15	2.62	10.56
Band. Proc. Tamiz.	99.00	0.89	520.64	10.56	100.00	0.00
Band. Proc. Lav.	417.00	3.75				
Total	4,888.00	44.00	4,931.99	100.00		

DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
PESO HUMEDO ANTES DE LAVADO	5,027.00	g	
PESO SECO ANTES DE LAVADO	4,932.00	g	
PESO RETENIDO ACUMULADO	4,888.00	g	
ERROR EN EL ENSAYO	44.00	0.89%	
MAT. QUE PASA LA MALLA #200 (g)	520.64	10.56%	
Por tamizado	520.64	g	
Por lavado	0.00	g	
MATERIAL	%	COEFICIENTES	
GRAVA	51.15	D10 = 0.07	
GRAVA GRUESA	22.77	D30 = 2.20	
GRAVA FINA	28.38	D60 = 9.24	
ARENA	38.30	Cc = 7.48	
ARENA GRUESA	20.30	Cu = 132.00	
ARENA MEDIA	11.87	PLASTICIDAD	
ARENA FINA	6.14		LL (%) = 44.56
FINO	10.56		LP (%) = 30.60
TAMAÑO MÁXIMO		IP (%) = 13.96	

CLASIFICACIÓN	
SUCS	GP - GC
AASHTO	A - 2 - 5 (0)

OBSERVACIONES: Según el SUCS el suelo es una grava mal graduada con arcilla limosa y arena (GP-GC). Según AASHTO es un suelo excelente para subrasantes, con índice de grupo igual a 0 [A-2-5 (0)].

CURVA GRANULOMÉTRICA



UANCV - FICP
CAP INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO M.S.C.A. JEFATURA
Ing. Oscar V. Villamonte Calle
CIF 32730



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : ING. WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 1

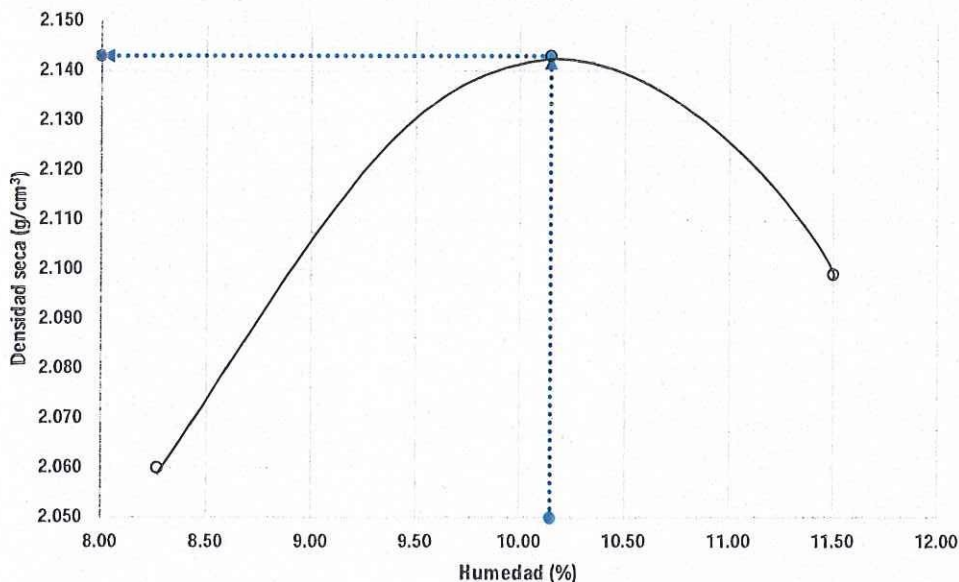
CANTERA : TAPARACHI

FECHA : 05 DE AGOSTO DEL 2019

PROCTOR MODIFICADO ASTM D-1557

ENSAYO No.		1	2	3	4	5
DENSIDAD						
PESO MOLDE + SUELO	g	10,841	11,125	11,078		
PESO MOLDE	g	6,322	6,322	6,322		
PESO SUELO SECO COMPACTADO	g	4,519	4,803	4,756		
VOLUMEN DEL MOLDE	cm ³	2,031	2,031	2,031		
DENSIDAD HUMEDA	g/cm ³	2.23	2.36	2.34		
CONTENIDO DE HUMEDAD						
RECIPIENTE No.		2	4	5		
SUELO HÚMEDO + RECIPIENTE	g	825.00	716.00	766.00		
SUELO SECO + RECIPIENTE	g	762.00	650.00	687.00		
PESO RECIPIENTE	g	0.00	0.00	0.00		
PESO DEL AGUA	g	63.00	66.00	79.00		
PESO DEL SUELO SECO	g	762.00	650.00	687.00		
CONTENIDO DE HUMEDAD	%	8.27	10.15	11.50		
SENSIDAD SECA	g/cm ³	2.060	2.143	2.099		

Curva de compactación Proctor



Máxima densidad seca
2.143 g/cm³

Contenido de humedad óptimo
10.15 %





PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

SOLICITANTE : ING. WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 1

CANTERA : TAPARACHI

FECHA : 05 DE AGOSTO DEL 2019

VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR) ASTM D-1883

COMPACTACIÓN

Molde No.	1		2		3	
	5		5		5	
No. golpes por capa	12		25		56	
Condición de la muestra	NO SATURADA	SATURADA	NO SATURADA	SATURADA	NO SATURADA	SATURADA
Peso molde + suelo humedo (g)	11678		12053		12201	
Peso del molde (g)	7233		7241		7139	
Peso del suelo humedo (g)	4445		4812		5062	
Volumen del suelo (cm ³)	2113		2129		2127	
Densidad humeda (g/cm ³)	2.10		2.26		2.38	
Humedad (%)	10.09		10.16		10.13	
Densidad seca (g/cm ³)	1.911		2.052		2.161	
Tara Nro.	3	6	7	8	1	11
Tara + suelo humedo (g)	752.00	760.50	760.00	662.00	618.00	534
Tara + suelo seco (g)	679.00	695.00	682.00	608.00	561.00	485
Peso del agua (g)	73.00	65.50	78.00	54.00	57.00	49.00
Peso de tara (g)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
Peso del suelo seco (g)	679.00	695.00	682.00	608.00	561.00	485.00
Humedad (%)	10.75	9.42	11.44	8.88	10.16	10.10
Humedad promedio (%)	10.09		10.16		10.13	

EXPANSIÓN

FECHA	HORA	TIEMPO	LECTURA		EXPANSION		LECTURA		EXPANSION		
			DIAL		mm.	%	DIAL	mm.	%	DIAL	mm.
		HRS.									

PENETRACIÓN

PENETRACION			(12G) MOLDE Nro.: 1			(25G) MOLDE Nro.: 2			(56G) MOLDE Nro.: 3		
			Lect. dial	Esfuerzo	Esf. correg.	Lect. dial	Esfuerzo	Esf. correg.	Lect. dial	Esfuerzo	Esf. correg.
TIEMPO	mm.	pulg.	Div.	psi	psi	Div.	psi	psi	Div.	psi	psi
0.00	0.000	0.000	0	15		0	15		0	15	
0.30	0.635	0.025	8	41		8	41		10	47	
1.00	1.270	0.050	18	73		23	89		27	102	
1.30	1.905	0.075	35	128		36	132		49	174	
2.00	2.540	0.100	59	206	225	67	232	265	72	248	323
3.00	3.810	0.150	70	242		84	287		102	346	
4.00	5.080	0.200	133	446	462	147	492	520	157	524	630
5.00	6.350	0.250	153	511		163	544		181	602	
6.00	7.620	0.300	190	631		227	751		272	897	
7.00	8.890	0.350									
8.00	10.160	0.400									

OBSERVACIONES: Corrección del anillo: $Y (lb) = (Lectura_dial \times 9.7327) + 44.249$



UAPA
CAP INGENIERIA CIVIL
Ing. Oscar V. Pacheco Calle
CIP 32730



PROYECTO : INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

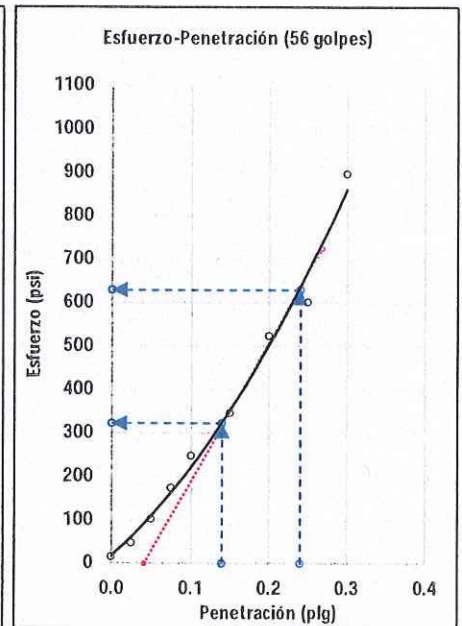
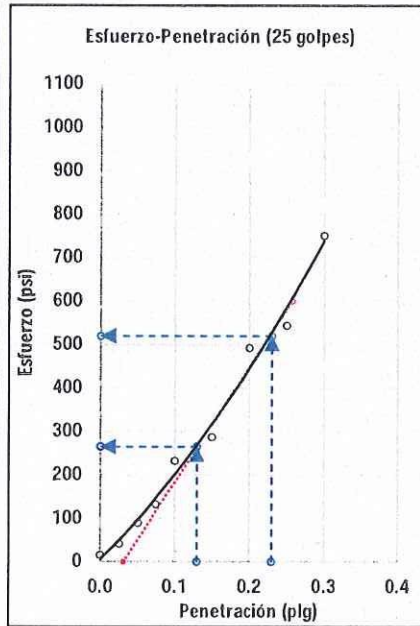
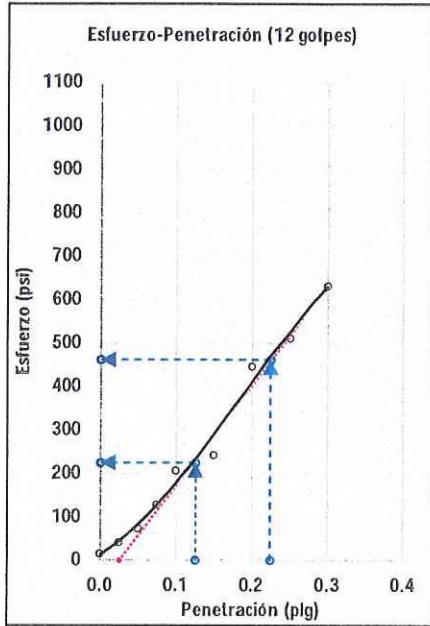
SOLICITANTE : ING. WILFREDO DAVID SUPO PACORI

UBICACIÓN : CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIACA - SAN ROMÁN - PUNO

MUESTRA : MUESTRA 1

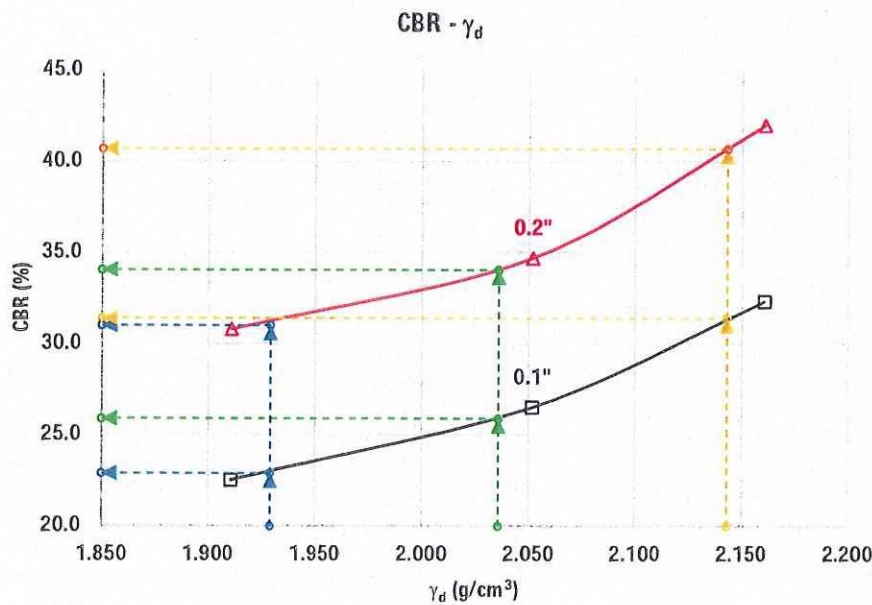
CANTERA : TAPARACHI

FECHA : 05 DE AGOSTO DEL 2019



Molde	γ_d (g/cm ³)	0.1"		0.2"	
		Esf.corr. (psi)	CBR (%)	Esf.corr. (psi)	CBR (%)
12G	1.911	225	22.5	462	30.8
25G	2.052	265	26.5	520	34.7
56G	2.161	323	32.3	630	42.0

%	γ_d (g/cm ³)
100%	2.143
95%	2.036
90%	1.929



% γ_d	CBR 0.1" (%)	CBR 0.2" (%)
100	31.4	40.7
95	25.9	34.1
90	22.9	31.0

CBR del suelo ensayado	
% γ_d	CBR (%)
100	40.7
95	34.1
90	31.0



UANCV - FICP
 CAP INGENIERIA CIVIL
 Ing. Oscar V. Vianque Calla
 CIP 32730



Anexo E:
Certificados de ensayos de deflectometría

UNIVERSIDAD ANDINA "NESTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
 FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS

Proyecto: **INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR**

Estructura: **SUBRASANTE NATURAL (Sin capa de mejoramiento)**

Progresiva: **0+000 - 10+000**

Carril: **I, C, D**

Solicita: **Ing. Wilfredo D. Supo P.**
 Operador: **C. Yanapa M.**
 Fecha: **17/10/2019**

Factor de conexión (Kv) **1,0**
 Deflexión admisible (D.M.A.)

EVALUACIÓN DEFLECTOMÉTRICA - VIGA BENKELMAN

Relación de longitudes de brazo **2**
 Unidad de lectura (1/100 mm) **0,01mm**

Carga por eje **8 200 Kg**
 Carga por ensayo **4 100 Kg**
 Presión de inflado **80 psi**

Progresiva (m)	Lado - Carril	Lectura de dial (div)					Lectura final L _{max}	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Pavimento °C	Lectura de deflexión (div)					Resultados - Deflexión (10 ⁻² mm)				
		L (25 cm)	L (50 cm)	L (75 cm)	L (100 cm)	L (150 cm)				L _{max}	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	D _{max} (D _n)	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀
1+000	I	10	80	110	125	145			145.00	135.00	65.00	35.00	20.00	280.00	270.00	130.00	70.00	40.00	
3+000	I	30	110	150	160	180			180.00	150.00	70.00	30.00	20.00	360.00	300.00	140.00	60.00	40.00	
5+000	I	40	80	98	115	146			146.00	106.00	66.00	48.00	31.00	292.00	212.00	132.00	96.00	62.00	
7+000	I	15	65	98	110	132			132.00	117.00	67.00	34.00	22.00	264.00	234.00	134.00	86.00	44.00	
9+000	I	20	40	70	80	90			90.00	70.00	50.00	20.00	10.00	180.00	140.00	100.00	40.00	20.00	
1+000	C	10	70	140	160	179			179.00	169.00	109.00	39.00	19.00	358.00	338.00	218.00	78.00	38.00	
3+000	C	30	110	160	180	213			213.00	183.00	103.00	53.00	33.00	426.00	366.00	206.00	106.00	66.00	
5+000	C	10	100	140	160	170			170.00	160.00	70.00	30.00	10.00	340.00	320.00	140.00	60.00	20.00	
7+000	C	18	55	100	128	154			154.00	136.00	99.00	54.00	26.00	308.00	272.00	198.00	108.00	52.00	
9+000	C	10	45	80	110	126			126.00	116.00	81.00	46.00	16.00	252.00	232.00	162.00	92.00	32.00	
1+000	D	15	115	270	280	300			300.00	285.00	185.00	30.00	20.00	600.00	570.00	370.00	60.00	40.00	
3+000	D	30	130	160	170	210			210.00	180.00	80.00	50.00	40.00	420.00	360.00	160.00	100.00	60.00	
5+000	D	25	120	153	173	200			200.00	175.00	80.00	47.00	27.00	400.00	350.00	160.00	94.00	54.00	
7+000	D	40	100	105	130	160			160.00	120.00	60.00	55.00	30.00	320.00	240.00	120.00	110.00	60.00	
9+000	D	10	80	130	160	178			178.00	168.00	98.00	48.00	18.00	356.00	336.00	196.00	96.00	36.00	
										Desviación estándar (σ)					96.74	97.83	64.83	21.65	16.85
										Promedio (x)					344.40	302.67	171.07	82.53	45.80
										Coeficiente de variación (V)					0.28	0.32	0.38	0.26	0.35
										Deflexión característica - MTC(D _{im} +1,645 x σ)					503.54				

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS
 VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
 Ing. César Villanueva Colón
 CAP INGENIERÍA CIVIL
 CIP 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
 FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS

Proyecto: INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Estructura: SUBRASANTE NATURAL + 0.15 m DE CAPA DE MEJORAMIENTO

Progresiva: 10+000 - 20+000 Observaciones: Grupo experimental 1, Tramo II

Carril: I, C, D Material de relleno de la cantera "Taparachi" - Jujfaca, suelo tamizado en cantera por malla de 2".

Solicita: Wilfredo D. Supo P.

Operador: C. Yanapa M.

Fecha: 17/10/2019

EVALUACIÓN DEFLECTOMÉTRICA - VIGA BENKELMAN

Carga por eje	8 200 Kg	Relación de longitudes de brazo	2	Factor de corrección (Kv)	1,0
Carga por ensayo	4 100 Kg	Unidad de lectura (1/100 mm)	0,01mm	Deflexión admisible (D.M.A.)	
Presión de inflado	80 psi				

Progresiva (m)	Lado - Carril	Lectura de dial (div)					L _{max}	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Pavimento °C	Lectura de deflexión (div)					Resultados - Deflexión (10 ⁻³ mm)				
		L (25 cm)	L (50 cm)	L (75 cm)	L (100 cm)	L _{max}				L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	D _{max} (D _n)	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀	
11+000	I	0.0	20	60	95	102	120			100.00	60.00	25.00	18.00	240.00	200.00	120.00	50.00	36.00	
13+000	I	0.0	25	55	80	102	125			100.00	70.00	45.00	23.00	250.00	200.00	140.00	90.00	46.00	
15+000	I	0.0	30	70	140	158	195			165.00	125.00	55.00	37.00	390.00	330.00	250.00	110.00	74.00	
17+000	I	0.0	22	65	120	135	162			140.00	97.00	42.00	27.00	324.00	280.00	194.00	84.00	54.00	
19+000	I	0.0	20	60	80	105	135			115.00	75.00	55.00	30.00	270.00	230.00	150.00	110.00	60.00	
11+000	C	0.0	15	50	98	110	130			115.00	80.00	32.00	20.00	260.00	230.00	160.00	64.00	40.00	
13+000	C	0.0	10	45	90	101	118			108.00	73.00	28.00	17.00	236.00	216.00	146.00	56.00	34.00	
15+000	C	0.0	22	58	90	110	145			123.00	87.00	55.00	35.00	290.00	246.00	174.00	110.00	70.00	
17+000	C	0.0	20	70	140	172	198			178.00	128.00	58.00	26.00	396.00	366.00	256.00	116.00	52.00	
19+000	C	0.0	20	40	60	100	148			128.00	108.00	88.00	48.00	296.00	256.00	216.00	176.00	96.00	
11+000	D	0.0	20	48	95	120	152			132.00	104.00	57.00	32.00	304.00	264.00	208.00	114.00	64.00	
13+000	D	0.0	13	45	72	91	112			99.00	67.00	40.00	21.00	224.00	196.00	134.00	80.00	42.00	
15+000	D	0.0	5	15	30	60	105			100.00	90.00	75.00	45.00	210.00	200.00	180.00	150.00	90.00	
17+000	D	0.0	10	40	80	115	165			175.00	145.00	105.00	70.00	370.00	350.00	290.00	210.00	140.00	
19+000	D	0.0	40	65	98	118	140			100.00	75.00	42.00	22.00	280.00	200.00	150.00	84.00	44.00	
										Desviación estándar (σ)					385.84				
										Promedio (x)					106.93				
										Coeficiente de variación (V)					0.2				
										Deflexión características - MTC(D _m +1.645 x σ)					0.27				

UANCV - FICP
 CAP INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS
 Ing. Oscar Velásquez Calle
 CIP 32730

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS

Proyecto: INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Estructura: SUBRASANTE NATURAL + 0.30 m DE MEJORAMIENTO

Progresiva: 40+000 - 50+000 Observaciones: Grupo experimental 4, Tramo V

Carril: I, C, D Material de relleno de la cantera "Aparachi" - Juliaca, suelo fertilizado en cantera por la malla de 2".

Solicita: Wilfredo D. Supo P.

Operador: C. Yanapa M.

Fecha: 17/10/2019

EVALUACIÓN DEFLECTOMÉTRICA - VIGA BENKELMAN

Carga por eje: 8 200 Kg

Carga por ensayo: 4 100 Kg

Presión de inflado: 80 psi

Relación de longitudes de brazo: 2

Factor de corrección (Kv): 1.0

Unidad de lectura (1/100 mm): 0.01mm

Deflexión admisible (D.M.A.):

Progresiva (m)	Lado - Carril	Lectura de dial (div)				Temperatura Ambiente °C	Temperatura Pavimento °C	Lectura de deflexión (div)				Resultados - Deflexión (10 ⁻² mm)					
		L (25 cm)	L (50 cm)	L (75 cm)	L (100 cm)			L _{max}	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	D _{max} (D ₀)	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀
41+000	I	11	33	44	61	92		92.00	81.00	59.00	48.00	31.00	184.00	182.00	118.00	96.00	62.00
43+000	I	10	39	53	79	108		108.00	98.00	69.00	55.00	29.00	216.00	196.00	138.00	110.00	59.00
45+000	I	11	44	78	91	120		120.00	109.00	76.00	42.00	29.00	240.00	218.00	152.00	84.00	58.00
47+000	I	9	37	56	80	117		117.00	106.00	80.00	61.00	37.00	234.00	216.00	160.00	122.00	74.00
49+000	I	13	39	67	86	116		116.00	103.00	77.00	49.00	30.00	232.00	206.00	154.00	98.00	60.00
41+000	C	9	28	34	53	83		83.00	74.00	55.00	49.00	30.00	166.00	148.00	110.00	98.00	60.00
43+000	C	11	39	55	68	91		91.00	80.00	52.00	36.00	23.00	182.00	160.00	104.00	72.00	46.00
45+000	C	14	45	66	86	119		119.00	105.00	74.00	53.00	33.00	238.00	210.00	148.00	106.00	66.00
47+000	C	13	44	86	108	132		132.00	119.00	88.00	46.00	24.00	264.00	238.00	176.00	92.00	48.00
49+000	C	17	31	84	97	121		121.00	104.00	90.00	37.00	24.00	242.00	208.00	160.00	74.00	48.00
41+000	D	9	29	33	51	69		69.00	60.00	40.00	36.00	18.00	138.00	120.00	80.00	72.00	36.00
43+000	D	11	24	45	75	119		119.00	108.00	95.00	74.00	44.00	238.00	216.00	190.00	148.00	92.00
45+000	D	6	25	37	50	74		74.00	68.00	49.00	37.00	24.00	148.00	136.00	98.00	74.00	48.00
47+000	D	11	32	46	64	88		88.00	77.00	56.00	42.00	24.00	176.00	154.00	112.00	84.00	48.00
49+000	D	12	33	46	75	94		94.00	82.00	61.00	48.00	19.00	188.00	164.00	122.00	96.00	38.00

Desviación estándar (σ): 39.00

Promedio (x̄): 205.73

Coefficiente de variación (V): 0.19

Deflexión característica - MTC ((Dm + 1.645 x σ): 269.89

UANCV - FICP
CAP INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS
JULIACA
Ing. César A. Pacheco Calle
CIP 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
 FACULTAD DE INGENIERIAS Y CIENCIAS PURAS
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS

Proyecto: INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Estructura: SUBRASANTE NATURAL + 0.45 m DE CAPA DE MEJORAMIENTO

Progresiva: 30+000 - 40+000

Carril: I, C, D

Observaciones: Grupo experimental 3, Tramo IV

Material de relleno de la cantera "Taparachi" - Juliaca, suelo tamizado en cantera por la malla de 2".

Solicita: Wilfredo D. Supo P.

Operador: C. Yanapa M.

Fecha: 17/10/2019

EVALUACIÓN DEFLECTOMÉTRICA - VIGA BENKELMAN

Carga por eje	8 200 Kg	Relación de longitudes de brazo	2	Factor de corrección (Kv)	1.0
Carga por ensayo	4 100 Kg	Unidad de lectura (1/100 mm)	0,01mm	Deflexión admisible (D.M.A.)	
Presión de inflado	80 psi				

Progresiva (m)	Lado - Carril	Lectura de dial (div)					Lectura final L _{max}	Temperatura Ambiente °C			Temperatura Pavimento °C			Lectura de deflexión (div)					Resultados - Deflexión (10 ⁻² mm)				
		L (25 cm)	L (50 cm)	L (75 cm)	L (100 cm)	L (150 cm)		L _{max}	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L _{max} (D ₀)	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀						
31+000	I	5	26	51	64	78	81						78.00	73.00	52.00	27.00	14.00	156.00	146.00	104.00	54.00	28.00	
33+000	I	12	40	55	64	81	81						81.00	69.00	41.00	26.00	17.00	162.00	138.00	82.00	52.00	34.00	
35+000	I	7	32	52	63	89	89						89.00	82.00	57.00	37.00	26.00	178.00	164.00	114.00	74.00	52.00	
37+000	I	9	30	45	64	90	90						90.00	81.00	60.00	45.00	26.00	180.00	162.00	120.00	90.00	52.00	
39+000	I	2	14	18	28	45	45						45.00	43.00	31.00	27.00	17.00	90.00	86.00	62.00	54.00	34.00	
31+000	C	8	21	40	58	81	81						81.00	73.00	60.00	41.00	23.00	162.00	146.00	120.00	82.00	46.00	
33+000	C	7	23	41	58	82	82						82.00	75.00	59.00	41.00	24.00	164.00	150.00	118.00	82.00	48.00	
35+000	C	2	19	48	62	84	84						84.00	82.00	65.00	36.00	22.00	168.00	164.00	130.00	72.00	44.00	
37+000	C	10	30	60	80	104	104						104.00	94.00	74.00	44.00	24.00	208.00	188.00	148.00	88.00	48.00	
39+000	C	10	28	58	81	102	102						102.00	92.00	74.00	44.00	21.00	204.00	184.00	148.00	88.00	42.00	
31+000	D	8	30	39	59	91	91						91.00	83.00	61.00	52.00	32.00	182.00	166.00	122.00	104.00	64.00	
33+000	D	2	11	30	48	76	76						76.00	74.00	65.00	46.00	28.00	152.00	148.00	130.00	92.00	56.00	
35+000	D	1	13	30	49	72	72						72.00	71.00	59.00	42.00	23.00	144.00	142.00	118.00	84.00	48.00	
37+000	D	5	34	49	79	103	103						103.00	98.00	69.00	54.00	24.00	206.00	196.00	138.00	108.00	48.00	
39+000	D	4	35	49	60	74	74						74.00	70.00	39.00	25.00	14.00	148.00	140.00	78.00	50.00	28.00	
													Desviación estándar (σ)					Promedio (x)					
													29.65					26.22					
													166.93					154.67					
													0.18					0.17					
													215.7					0.22					
													Deflexión característica - MTC (D _m +1.645 x σ)					Deflexión característica - MTC (D _m +1.645 x σ)					





UNIVERSIDAD ANDINA "MESTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTOS

Proyecto: INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO EN EL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE DEL PAVIMENTO, TRAMO EXPERIMENTAL A 3825 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Estructura: SUBRASANTE NATURAL + 0.60 m DE MEJORAMIENTO

Progresiva: 20+000 - 30+000 Observaciones: Grupo experimental 2, Tramo III

Carril: I, C, D Material de relleno de la cantera "Taparachi" - Juliaca, suelo tamizado en cantera por la malla de 2".

Solicita: Wilfredo D. Supo P.

Operador: C. Yanapa M.

Fecha: 17/10/2019

Carga por eje: 8 200 Kg

Carga por ensayo: 4 100 Kg

Presión de inflado: 80 psi

Relación de longitudes de brazo: 2

Unidad de lectura (1/100 mm): 0,01mm

Factor de corrección (Kv): 1.0

Deflexión admisible (D.M.A.):

EVALUACIÓN DEFLECTOMÉTRICA - VIGA BENKELMAN

Progresiva (m)	Lado - Carril	Lectura de dial (div)				Lectura de deflexión (div)		Resultados - Deflexión (10 ⁻² mm)												
		L (25 cm)	L (50 cm)	L (75 cm)	L (100 cm)	L _{max}	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	D _{max} (D _n)	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₁₀₀					
21+000	I	5	18	28	38	72	67.00	54.00	44.00	34.00	144.00	134.00	108.00	88.00	68.00					
23+000	I	8	20	30	42	74	74.00	54.00	44.00	32.00	148.00	132.00	108.00	88.00	64.00					
25+000	I	12	25	65	78	92	92.00	80.00	67.00	27.00	184.00	160.00	134.00	54.00	28.00					
27+000	I	5	18	40	63	80	80.00	75.00	62.00	40.00	180.00	150.00	124.00	80.00	34.00					
29+000	I	10	20	50	68	89	89.00	79.00	69.00	39.00	178.00	158.00	138.00	78.00	42.00					
21+000	C	10	30	44	56	78	78.00	68.00	48.00	34.00	156.00	136.00	96.00	68.00	44.00					
23+000	C	7	25	45	54	82	82.00	75.00	57.00	37.00	164.00	150.00	114.00	74.00	56.00					
25+000	C	5	19	38	48	70	70.00	65.00	51.00	32.00	140.00	130.00	102.00	64.00	44.00					
27+000	C	8	20	40	62	86	86.00	80.00	68.00	48.00	176.00	160.00	136.00	96.00	52.00					
29+000	C	10	50	80	95	115	115.00	105.00	65.00	35.00	230.00	210.00	130.00	70.00	40.00					
21+000	D	8	23	38	48	73	73.00	65.00	50.00	35.00	146.00	130.00	100.00	70.00	40.00					
23+000	D	7	28	42	38	80	80.00	73.00	52.00	38.00	160.00	146.00	104.00	76.00	40.00					
25+000	D	2	10	22	35	54	54.00	52.00	44.00	32.00	108.00	104.00	88.00	64.00	40.00					
27+000	D	5	22	29	35	53	53.00	48.00	31.00	24.00	106.00	96.00	62.00	48.00	36.00					
29+000	D	6	13	20	30	38	38.00	32.00	25.00	18.00	76.00	64.00	50.00	36.00	28.00					
											Desviación estándar (σ)		36.88		33.25		25.68		15.84	
											Promedio (x̄)		151.73		137.33		106.27		70.27	
											Coeficiente de variación (V)		0.24		0.24		0.24		0.23	
											Deflexión característica - MTC (D _{mt} + 1.645 x σ)		211.9		193.6		146.4		93.6	





Anexo F:
Hojas de cálculo método de Hogg modificado



METODO DE HOGG
CASO II (H/L0=10)
SUBRASANTE NATURAL + 0.00 m DE MEJORAMIENTO

a'= 1.98
b= 12.10

P = 4,100 Kg

v = 0.4
a = 10.79 cm

$D_0 (10^2 \text{ mm})$	$D_0 (\text{mm})$	$D_R (10^2 \text{ mm})$	$D_R (\text{mm})$	R	D_R/D_0	$1/\alpha$	$1/\beta$	B	R_{50}	Y_0	m	\bar{m}	L_0	a/L_0	S_0/S	I	$E_s (\text{Kg/cm}^2)$	$M_{hd} (\text{Kg/cm}^2)$
290	2.9	130	1.30	50	0.448	2.629	0.548	0	44.62	0.602	0.192	0.48	22.81	0.473	0.869	0.1689	148.59	306.31
360	3.6	140	1.40	50	0.389	2283.4	0.2004	3	39.65	0.602	0.192	0.48	19.70	0.548	0.833	0.1689	132.85	275.14
292	2.92	132	1.32	50	0.452	2.629	0.548	0	45.00	0.602	0.192	0.48	23.04	0.468	0.871	0.1689	146.43	302.03
264	2.64	134	1.34	50	0.508	2.629	0.548	0	50.84	0.602	0.192	0.48	26.65	0.405	0.902	0.1689	145.01	299.22
180	1.8	100	1.00	50	0.556	2.629	0.548	0	56.50	0.602	0.192	0.48	30.13	0.358	0.924	0.1689	192.70	393.65
358	3.58	218	2.18	50	0.609	2.629	0.548	0	63.73	0.602	0.192	0.48	34.54	0.312	0.946	0.1689	86.53	183.43
426	4.26	206	2.06	50	0.484	2.629	0.548	0	48.23	0.602	0.192	0.48	25.04	0.431	0.889	0.1689	94.26	198.73
340	3.4	140	1.40	50	0.412	2283.4	0.2004	3	41.53	0.602	0.192	0.48	20.88	0.517	0.848	0.1689	135.11	279.62
308	3.08	108	1.08	75	0.351	2283.4	0.2004	3	55.07	0.602	0.192	0.48	29.25	0.369	0.919	0.1689	115.38	240.55
252	2.52	92	0.92	75	0.365	2283.4	0.2004	3	56.69	0.602	0.192	0.48	30.24	0.357	0.925	0.1689	137.29	283.93
600	6	370	3.70	50	0.617	2.629	0.548	0	64.88	0.602	0.192	0.48	35.24	0.306	0.949	0.1689	50.77	112.62
420	4.2	160	1.60	50	0.381	2283.4	0.2004	3	39.02	0.602	0.192	0.48	19.30	0.559	0.828	0.1689	115.53	240.85
400	4	160	1.60	50	0.400	2283.4	0.2004	3	40.55	0.602	0.192	0.48	20.27	0.532	0.840	0.1689	117.18	244.12
320	3.2	120	1.20	50	0.375	2283.4	0.2004	3	38.55	0.602	0.192	0.48	19.00	0.568	0.823	0.1689	153.10	315.24
356	3.56	196	1.96	50	0.551	2.629	0.548	0	55.88	0.602	0.192	0.48	29.75	0.363	0.922	0.1689	98.47	207.07
Promedio																		
124.61																		
258.83																		



METODO DE HOGG

CASO II (H/L0=10)

SUBRASANTE NATURAL + 0.30 m DE MEJORAMIENTO

v = 0.4
a = 10.79 cm
P = 4,100 Kg

a = 2.16
b = 6.73

$D_0 (10^{-2} \text{ mm})$	$D_0 (mm)$	$D_R (10^{-2} \text{ mm})$	$D_R (mm)$	R	D_R/D_0	$1/\alpha$	$1/\beta$	B	R_{50}	V_0	m	\bar{m}	L_0	a/L_0	S_d/S	I	$E_s (Kg/cm^2)$	$M_{Rd} (Kg/cm^2)$
184	1.84	96	0.96	75	0.522	2.629	0.548	0	78.66	0.602	0.192	0.48	43.62	0.247	0.977	0.1689	137.68	304.12
216	2.16	110	1.10	75	0.509	2.629	0.548	0	76.54	0.602	0.192	0.48	42.33	0.255	0.974	0.1689	120.49	266.99
240	2.4	152	1.52	50	0.633	2.629	0.548	0	67.46	0.602	0.192	0.48	36.81	0.293	0.955	0.1689	122.27	270.83
234	2.34	122	1.22	75	0.521	2.629	0.548	0	78.60	0.602	0.192	0.48	43.58	0.248	0.977	0.1689	108.36	240.79
232	2.32	98	0.98	75	0.422	2283.4	0.2004	3	63.66	0.602	0.192	0.48	34.50	0.313	0.946	0.1689	133.68	295.48
166	1.66	98	0.98	75	0.590	2.629	0.548	0	91.63	0.602	0.192	0.48	51.47	0.210	0.995	0.1689	131.72	291.25
182	1.82	104	1.04	50	0.571	2.629	0.548	0	58.54	0.602	0.192	0.48	31.38	0.344	0.931	0.1689	184.38	404.99
238	2.38	106	1.06	75	0.445	2.629	0.548	0	66.51	0.602	0.192	0.48	36.24	0.298	0.953	0.1689	124.97	276.67
264	2.64	176	1.76	50	0.667	2.629	0.548	0	73.10	0.602	0.192	0.48	40.24	0.268	0.967	0.1689	102.96	229.12
242	2.42	74	0.74	75	0.306	2283.4	0.2004	3	50.28	0.602	0.192	0.48	26.31	0.410	0.899	0.1689	159.70	351.68
138	1.38	72	0.72	75	0.522	2.629	0.548	0	78.66	0.602	0.192	0.48	43.62	0.247	0.977	0.1689	183.58	403.26
238	2.38	148	1.48	75	0.622	2.629	0.548	0	98.50	0.602	0.192	0.48	55.63	0.194	1.000	0.1689	85.43	191.26
148	1.48	74	0.74	75	0.500	2.629	0.548	0	75.00	0.602	0.192	0.48	41.40	0.261	0.971	0.1689	179.24	393.89
176	1.76	84	0.84	75	0.477	2.629	0.548	0	71.35	0.602	0.192	0.48	39.18	0.275	0.964	0.1689	158.12	348.27
188	1.88	96	0.96	75	0.511	2.629	0.548	0	76.77	0.602	0.192	0.48	42.47	0.254	0.974	0.1689	137.98	304.77
Promedio																		
138.04																		



METODO DE HOGG

CASO II (H/L0=10)

SUBRASANTE NATURAL + 0.45 m DE MEJORAMIENTO

P = 4,100 Kg

v = 0.4

a = 10.79 cm

a = 2.25

b = 4.04

D_0 (10^2 mm)	D_0 (mm)	D_R (10^2 mm)	D_R (mm)	R	D_R/D_0	$1/\alpha$	$1/\beta$	B	R_{50}	y_0	m	\bar{n}	L_0	a/L_0	S_0/S	I	E_s (Kg/cm ²)	M_{Rd} (Kg/cm ²)
156	1.56	54	0.54	75	0.346	2283.4	0.2004	3	54.57	0.602	0.192	0.48	28.95	0.373	0.917	0.1689	229.66	520.78
162	1.62	82	0.82	50	0.506	2.629	0.548	0	50.68	0.602	0.192	0.48	26.56	0.406	0.901	0.1689	236.85	536.95
178	1.78	74	0.74	75	0.416	2283.4	0.2004	3	62.79	0.602	0.192	0.48	33.97	0.318	0.944	0.1689	176.58	401.35
180	1.8	90	0.90	75	0.500	2.629	0.548	0	75.00	0.602	0.192	0.48	41.40	0.261	0.971	0.1689	147.38	335.65
90	0.9	54	0.54	75	0.600	2.629	0.548	0	93.66	0.602	0.192	0.48	52.70	0.205	0.998	0.1689	237.99	539.52
162	1.62	82	0.82	75	0.506	2.629	0.548	0	76.02	0.602	0.192	0.48	42.02	0.257	0.973	0.1689	161.67	367.80
164	1.64	82	0.82	75	0.500	2.629	0.548	0	75.00	0.602	0.192	0.48	41.40	0.261	0.971	0.1689	161.76	368.00
168	1.68	72	0.72	75	0.429	2.629	0.548	0	64.06	0.602	0.192	0.48	34.74	0.311	0.947	0.1689	183.53	416.98
208	2.08	88	0.88	75	0.423	2283.4	0.2004	3	63.74	0.602	0.192	0.48	34.55	0.312	0.946	0.1689	148.89	339.04
204	2.04	148	1.48	50	0.725	2.629	0.548	0	85.17	0.602	0.192	0.48	47.56	0.227	0.987	0.1689	115.06	262.93
182	1.82	104	1.04	75	0.571	2.629	0.548	0	87.81	0.602	0.192	0.48	49.16	0.219	0.991	0.1689	125.28	285.92
152	1.52	92	0.92	75	0.605	2.629	0.548	0	94.80	0.602	0.192	0.48	53.39	0.202	0.999	0.1689	139.24	317.33
144	1.44	84	0.84	75	0.583	2.629	0.548	0	90.19	0.602	0.192	0.48	50.60	0.213	0.994	0.1689	154.30	351.22
206	2.06	48	0.48	100	0.233	2283.4	0.2004	3	57.38	0.602	0.192	0.48	30.67	0.352	0.927	0.1689	165.95	377.43
148	1.48	28	0.28	100	0.189	2283.4	0.2004	3	51.75	0.602	0.192	0.48	27.21	0.397	0.906	0.1689	254.46	576.58
Promedio																		
175.91																		
399.83																		



METODO DE HOGG MODIFICADO
CASO II (H/L0=10)
SUBRASANTE NATURAL + 0.60 m DE MEJORAMIENTO

$v = 0.4$ $P = 4,100 \text{ Kg}$ $q = 5.60 \text{ Kg/cm}^2$ $a' = 2.34$
 $a = 10.79 \text{ cm}$ $b = 1.35$

$D_0 (10^2 \text{ mm})$	$D_0 (\text{mm})$	$D_R (10^2 \text{ mm})$	$D_R (\text{mm})$	R	D_R/D_0	$1/\alpha$	$1/\beta$	B	R_{50}	γ_0	m	\bar{m}	L_0	a/L_0	S_0/S	I	$E_s (\text{Kg/cm}^2)$	$M_{red} (\text{Kg/cm}^2)$
144	1.44	68	0.68	100	0.472	2.629	0.548	0	94.09	0.602	0.192	0.48	52.96	0.204	0.998	0.1689	148.02	347.72
148	1.48	64	0.64	100	0.432	2.629	0.548	0	86.16	0.602	0.192	0.48	48.16	0.224	0.988	0.1689	156.78	368.22
184	1.84	134	1.34	50	0.728	2.629	0.548	0	85.82	0.602	0.192	0.48	47.96	0.225	0.988	0.1689	126.63	297.66
160	1.6	80	0.80	75	0.500	2.629	0.548	0	75.00	0.602	0.192	0.48	41.40	0.261	0.971	0.1689	165.80	389.32
178	1.78	78	0.78	75	0.438	2.629	0.548	0	65.45	0.602	0.192	0.48	35.59	0.303	0.950	0.1689	169.61	398.24
156	1.56	68	0.68	75	0.436	2.629	0.548	0	65.12	0.602	0.192	0.48	35.39	0.305	0.950	0.1689	194.63	456.78
164	1.64	74	0.74	75	0.451	2.629	0.548	0	67.37	0.602	0.192	0.48	36.76	0.294	0.955	0.1689	179.17	420.61
140	1.4	64	0.64	75	0.457	2.629	0.548	0	68.26	0.602	0.192	0.48	37.30	0.289	0.957	0.1689	207.28	486.39
176	1.76	96	0.96	75	0.545	2.629	0.548	0	82.88	0.602	0.192	0.48	46.18	0.234	0.984	0.1689	136.94	321.79
230	2.3	130	1.30	50	0.565	2.629	0.548	0	57.73	0.602	0.192	0.48	30.88	0.349	0.928	0.1689	147.79	347.18
146	1.46	70	0.70	75	0.479	2.629	0.548	0	71.70	0.602	0.192	0.48	39.39	0.274	0.965	0.1689	189.79	445.46
160	1.6	76	0.76	75	0.475	2.629	0.548	0	71.00	0.602	0.192	0.48	38.97	0.277	0.963	0.1689	174.69	410.12
108	1.08	64	0.64	75	0.593	2.629	0.548	0	92.09	0.602	0.192	0.48	51.75	0.209	0.996	0.1689	201.56	473.00
106	1.06	48	0.48	75	0.453	2.629	0.548	0	67.61	0.602	0.192	0.48	36.91	0.292	0.956	0.1689	276.37	648.06
76	0.76	36	0.36	75	0.474	2.629	0.548	0	70.79	0.602	0.192	0.48	38.84	0.278	0.963	0.1689	369.00	864.81
Promedio																		
																	189.60	445.02



METODO DE HOGG

CASO III (H/L0=∞)

SUBRASANTE NATURAL + 0.15 m DE MEJORAMIENTO

P = 4,100 Kg

v = 0.4

a = 10.79 cm

a = 2.07

b = 9.41

D_0 (10^2 mm)	D_0 (mm)	D_R (10^2 mm)	D_R (mm)	R	D_R/D_0	$1/\alpha$	$1/\beta$	B	R_{50}	V_0	m	\bar{m}	L_0	a/L_0	S_d/S	I	E_s (Kg/cm ²)	M_{Rd} (Kg/cm ²)
240	2.4	120	1.20	50	0.500	2.629	0.548	0	50.00	0.525	0.18	0.44	21.79	0.495	0.870	0.1925	214.46	453.34
250	2.5	140	1.40	50	0.560	2.629	0.548	0	57.06	0.525	0.18	0.44	25.63	0.421	0.903	0.1925	181.67	385.47
390	3.9	250	2.50	50	0.641	2.629	0.548	0	68.70	0.525	0.18	0.44	31.88	0.338	0.939	0.1925	97.36	210.95
324	3.24	194	1.94	50	0.599	2.629	0.548	0	62.27	0.525	0.18	0.44	28.44	0.379	0.921	0.1925	128.85	276.13
270	2.7	150	1.50	50	0.556	2.629	0.548	0	56.50	0.525	0.18	0.44	25.33	0.426	0.901	0.1925	169.83	360.96
260	2.6	160	1.60	50	0.615	2.629	0.548	0	64.69	0.525	0.18	0.44	29.74	0.363	0.928	0.1925	154.71	329.66
236	2.36	146	1.46	50	0.619	2.629	0.548	0	65.18	0.525	0.18	0.44	30.00	0.360	0.930	0.1925	169.33	359.92
290	2.9	174	1.74	50	0.600	2.629	0.548	0	62.44	0.525	0.18	0.44	28.53	0.378	0.922	0.1925	143.65	306.77
396	3.96	256	2.56	50	0.646	2.629	0.548	0	69.60	0.525	0.18	0.44	32.36	0.333	0.941	0.1925	94.66	205.36
296	2.96	176	1.76	75	0.595	2.629	0.548	0	92.51	0.525	0.18	0.44	44.53	0.242	0.981	0.1925	95.94	208.01
304	3.04	114	1.14	75	0.375	2283.4	0.2004	3	57.83	0.525	0.18	0.44	26.05	0.414	0.906	0.1925	147.48	314.69
224	2.24	134	1.34	50	0.598	2.629	0.548	0	62.19	0.525	0.18	0.44	28.40	0.380	0.921	0.1925	186.63	395.73
210	2.1	90	0.90	100	0.429	2.629	0.548	0	85.41	0.525	0.18	0.44	40.77	0.265	0.972	0.1925	146.35	312.35
370	3.7	210	2.10	75	0.568	2.629	0.548	0	87.05	0.525	0.18	0.44	41.64	0.259	0.974	0.1925	81.50	178.12
280	2.8	150	1.50	50	0.536	2.629	0.548	0	54.08	0.525	0.18	0.44	24.02	0.449	0.890	0.1925	170.59	362.53
Promedio																		
145.53																		
310.67																		



METODO DE HOGG

CASO III (H/L0=∞)

SUBRASANTE NATURAL + 0.30 m DE MEJORAMIENTO

v = 0.4
a = 10.79 cm
P = 4,100 Kg

a = 2.16
b = 6.73

$D_0 (10^{-2} \text{ mm})$	$D_0 (mm)$	$D_R (10^{-2} \text{ mm})$	$D_R (mm)$	R	D_R/D_0	$1/\alpha$	$1/\beta$	B	R_{50}	V_0	m	\bar{m}	L_0	a/L_0	S_d/S	I	$E_s (Kg/cm^2)$	$M_{Rd} (Kg/cm^2)$
184	1.84	96	0.96	75	0.522	2.629	0.548	0	78.66	0.525	0.18	0.44	37.19	0.290	0.960	0.1925	180.85	397.37
216	2.16	110	1.10	75	0.509	2.629	0.548	0	76.54	0.525	0.18	0.44	36.06	0.299	0.956	0.1925	158.22	348.49
240	2.4	152	1.52	50	0.633	2.629	0.548	0	67.46	0.525	0.18	0.44	31.22	0.346	0.936	0.1925	161.04	354.58
234	2.34	122	1.22	75	0.521	2.629	0.548	0	78.60	0.525	0.18	0.44	37.16	0.290	0.960	0.1925	142.32	314.14
232	2.32	98	0.98	75	0.422	2283.4	0.2004	3	63.66	0.525	0.18	0.44	29.19	0.370	0.925	0.1925	176.08	387.06
166	1.66	98	0.98	75	0.590	2.629	0.548	0	91.63	0.525	0.18	0.44	44.07	0.245	0.980	0.1925	172.69	379.74
182	1.82	104	1.04	50	0.571	2.629	0.548	0	58.54	0.525	0.18	0.44	26.43	0.408	0.908	0.1925	243.34	532.34
238	2.38	106	1.06	75	0.445	2.629	0.548	0	66.51	0.525	0.18	0.44	30.71	0.351	0.933	0.1925	164.56	362.18
264	2.64	176	1.76	50	0.667	2.629	0.548	0	73.10	0.525	0.18	0.44	34.23	0.315	0.949	0.1925	135.38	299.15
242	2.42	74	0.74	75	0.306	2283.4	0.2004	3	50.28	0.525	0.18	0.44	21.95	0.492	0.872	0.1925	211.62	463.83
138	1.38	72	0.72	75	0.522	2.629	0.548	0	78.66	0.525	0.18	0.44	37.19	0.290	0.960	0.1925	241.13	527.57
238	2.38	148	1.48	75	0.622	2.629	0.548	0	98.50	0.525	0.18	0.44	47.70	0.226	0.988	0.1925	112.19	249.06
148	1.48	74	0.74	75	0.500	2.629	0.548	0	75.00	0.525	0.18	0.44	35.24	0.306	0.953	0.1925	235.55	515.52
176	1.76	84	0.84	75	0.477	2.629	0.548	0	71.35	0.525	0.18	0.44	33.30	0.324	0.945	0.1925	207.86	455.71
188	1.88	96	0.96	75	0.511	2.629	0.548	0	76.77	0.525	0.18	0.44	36.18	0.298	0.957	0.1925	181.37	398.49
Promedio																		
181.61																		



METODO DE HOGG

CASO III ($H/L_0 = \infty$)

SUBRASANTE NATURAL + 0.45 m DE MEJORAMIENTO

$P = 4,100 \text{ Kg}$

$v = 0.4$

$a = 10.79 \text{ cm}$

$a = 2.25$

$b = 4.04$

D_0 (10^2 mm)	D_0 (mm)	D_R (10^2 mm)	D_R (mm)	R	D_R/D_0	$1/\alpha$	$1/\beta$	B	R_{50}	y_0	m	\bar{n}	L_0	a/L_0	S_d/S	I	E_s (Kg/cm^2)	M_{Rd} (Kg/cm^2)
156	1.56	54	0.54	75	0.346	2283.4	0.2004	3	54.57	0.525	0.18	0.44	24.28	0.444	0.892	0.1925	303.59	687.12
162	1.62	82	0.82	50	0.506	2.629	0.548	0	50.68	0.525	0.18	0.44	22.17	0.487	0.874	0.1925	313.70	709.87
178	1.78	74	0.74	75	0.416	2283.4	0.2004	3	62.79	0.525	0.18	0.44	28.72	0.376	0.923	0.1925	232.75	527.73
180	1.8	90	0.90	75	0.500	2.629	0.548	0	75.00	0.525	0.18	0.44	35.24	0.306	0.953	0.1925	193.68	439.82
90	0.9	54	0.54	75	0.600	2.629	0.548	0	93.66	0.525	0.18	0.44	45.14	0.239	0.983	0.1925	311.92	705.86
162	1.62	82	0.82	75	0.506	2.629	0.548	0	76.02	0.525	0.18	0.44	35.78	0.302	0.955	0.1925	212.39	481.92
164	1.64	82	0.82	75	0.500	2.629	0.548	0	75.00	0.525	0.18	0.44	35.24	0.306	0.953	0.1925	212.57	482.32
168	1.68	72	0.72	75	0.429	2.629	0.548	0	64.06	0.525	0.18	0.44	29.40	0.367	0.927	0.1925	241.94	548.41
208	2.08	88	0.88	75	0.423	2283.4	0.2004	3	63.74	0.525	0.18	0.44	29.23	0.369	0.926	0.1925	196.34	445.81
204	2.04	148	1.48	50	0.725	2.629	0.548	0	85.17	0.525	0.18	0.44	40.64	0.266	0.971	0.1925	150.98	343.75
182	1.82	104	1.04	75	0.571	2.629	0.548	0	87.81	0.525	0.18	0.44	42.04	0.257	0.975	0.1925	164.27	373.65
152	1.52	92	0.92	75	0.605	2.629	0.548	0	94.80	0.525	0.18	0.44	45.75	0.236	0.984	0.1925	182.41	414.46
144	1.44	84	0.84	75	0.583	2.629	0.548	0	90.19	0.525	0.18	0.44	43.30	0.249	0.978	0.1925	202.20	458.99
206	2.06	48	0.48	100	0.233	2283.4	0.2004	3	57.38	0.525	0.18	0.44	25.81	0.418	0.904	0.1925	219.18	497.20
148	1.48	28	0.28	100	0.189	2283.4	0.2004	3	51.75	0.525	0.18	0.44	22.75	0.474	0.879	0.1925	336.54	761.26
Promedio																		
231.63																		



METODO DE HOGG

CASO III ($H/L_0 = \infty$)

SUBRASANTE NATURAL + 0.60 m DE MEJORAMIENTO

P = 4,100 Kg

v = 0.4

a = 10.79 cm

a = 2.34

b = 1.35

D_0 (10^2 mm)	D_o (mm)	D_R (10^{-2} mm)	D_R (mm)	R	D_R/D_0	$1/\alpha$	$1/\beta$	B	R_{50}	γ_0	m	\bar{m}	L_0	a/L_0	S_0/S	I	E_s (Kg/cm ²)	M_{hd} (Kg/cm ²)
144	1.44	68	0.68	100	0.472	3.115	0.584	0	93.71	0.525	0.18	0.44	45.17	0.239	0.983	0.1925	194.82	457.23
148	1.48	64	0.64	100	0.432	3.115	0.584	0	85.32	0.525	0.18	0.44	40.72	0.265	0.971	0.1925	207.70	487.37
184	1.84	134	1.34	50	0.728	3.115	0.584	0	88.92	0.525	0.18	0.44	42.63	0.253	0.977	0.1925	160.56	377.06
160	1.6	80	0.80	75	0.500	3.115	0.584	0	75.00	0.525	0.18	0.44	35.24	0.306	0.953	0.1925	217.88	511.19
178	1.78	78	0.78	75	0.438	3.115	0.584	0	64.87	0.525	0.18	0.44	29.83	0.362	0.929	0.1925	225.54	529.11
156	1.56	68	0.68	75	0.436	3.115	0.584	0	64.52	0.525	0.18	0.44	29.65	0.364	0.928	0.1925	258.64	606.57
164	1.64	74	0.74	75	0.451	3.115	0.584	0	66.90	0.525	0.18	0.44	30.92	0.349	0.934	0.1925	237.44	556.96
140	1.4	64	0.64	75	0.457	3.115	0.584	0	67.84	0.525	0.18	0.44	31.42	0.343	0.937	0.1925	274.60	643.91
176	1.76	96	0.96	75	0.545	3.115	0.584	0	83.43	0.525	0.18	0.44	39.72	0.272	0.968	0.1925	178.50	419.04
230	2.3	130	1.30	50	0.565	3.115	0.584	0	58.28	0.525	0.18	0.44	26.29	0.410	0.907	0.1925	193.37	453.84
146	1.46	70	0.70	75	0.479	3.115	0.584	0	71.48	0.525	0.18	0.44	33.37	0.323	0.946	0.1925	250.31	587.08
160	1.6	76	0.76	75	0.475	3.115	0.584	0	70.74	0.525	0.18	0.44	32.97	0.327	0.944	0.1925	230.69	541.16
108	1.08	64	0.64	75	0.593	3.115	0.584	0	93.35	0.525	0.18	0.44	44.98	0.240	0.982	0.1925	260.59	611.13
106	1.06	48	0.48	75	0.453	3.115	0.584	0	67.15	0.525	0.18	0.44	31.05	0.348	0.935	0.1925	366.21	858.28
76	0.76	36	0.36	75	0.474	3.115	0.584	0	70.52	0.525	0.18	0.44	32.85	0.328	0.943	0.1925	486.91	1140.72
Promedio																		
249.58																		
585.38																		



Anexo G:
Reportes retrocálculo - Kenlayer

Figura 38

Datos de entrada para cálculo de deflexiones con Kenlayer

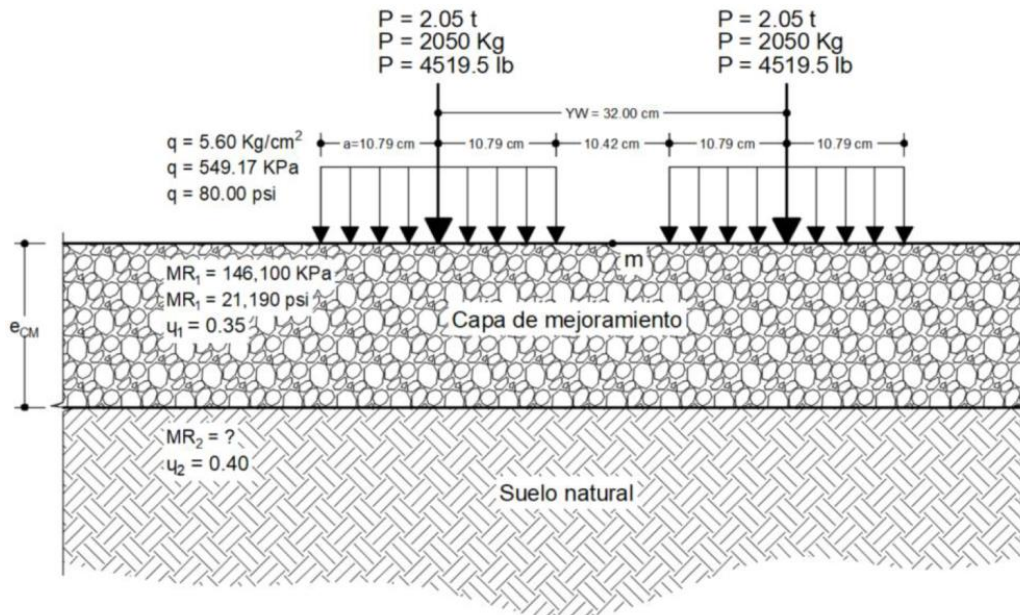
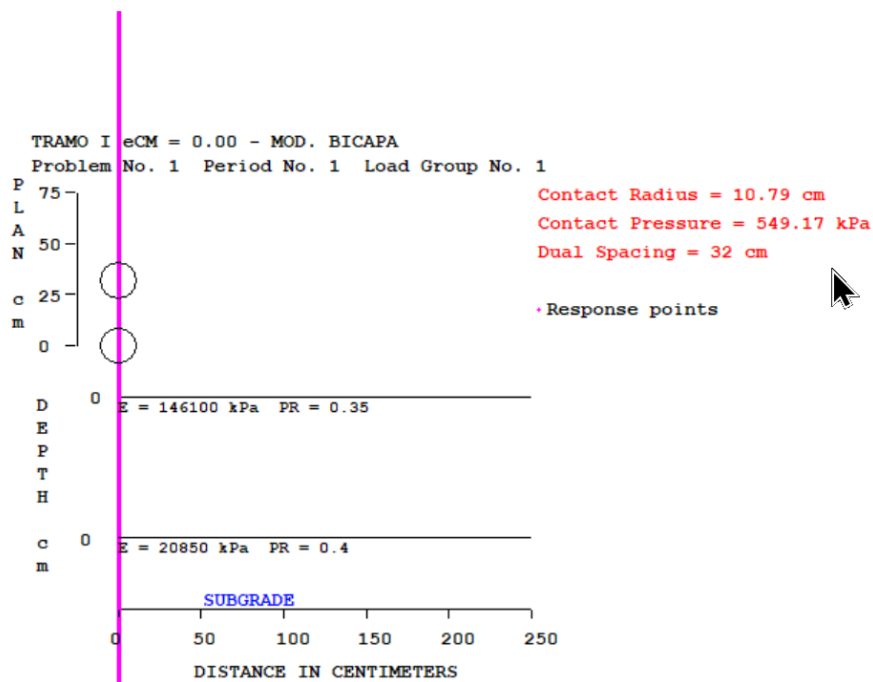


Figura 39

Gráfico del modelo generado por Kenlayer, previo al cálculo





INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\TESIS BICAPA eCM00.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -TRAMO I eCM = 0.00 - MOD. BICAPA

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 2
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 1
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 0.01
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.4
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.461E+05 2 2.085E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 10.79
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 549.17
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 22
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 32

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000-134.000 2 0.000 -84.000
3 0.000 -40.790 4 0.000 -33.290 5 0.000 -25.790 6 0.000 -18.290
7 0.000 -14.540 8 0.000 -12.670 9 0.000 -10.790 10 0.000 -9.440
11 0.000 -8.090 12 0.000 -5.400 13 0.000 -2.700 14 0.000 0.000
15 0.000 2.700 16 0.000 5.400 17 0.000 8.090 18 0.000 9.440
19 0.000 10.790 20 0.000 13.400 21 0.000 14.700 22 0.000 16.000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

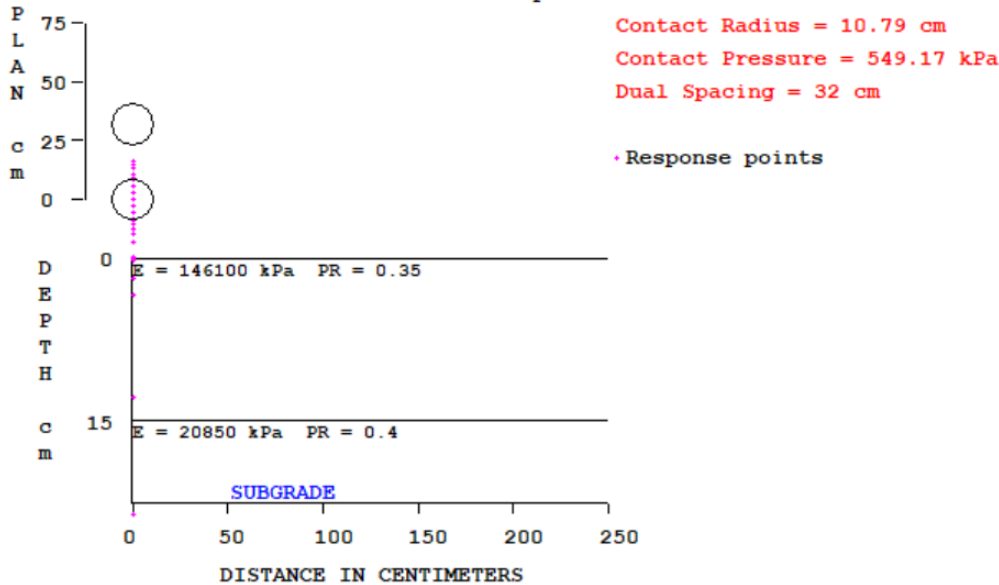
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.03467	0.000	3.047	-6.801	-0.972
	(STRAIN)		2.342E-06	3.947E-05	-5.152E-05	-5.152E-05
2	0.00000	0.05297	0.000	9.649	-10.789	-0.328
	(STRAIN)		4.881E-07	9.267E-05	-9.618E-05	-9.618E-05
3	0.00000	0.09921	0.000	37.520	-34.815	0.771
	(STRAIN)		-1.205E-06	3.384E-04	-3.300E-04	-3.300E-04
4	0.00000	0.11805	0.000	52.843	-52.248	0.071
	(STRAIN)		-9.380E-07	4.867E-04	-4.844E-04	-4.844E-04
5	0.00000	0.14703	0.000	84.467	-81.248	0.747
	(STRAIN)		-2.596E-06	7.710E-04	-7.603E-04	-7.603E-04
6	0.00000	0.19957	0.000	160.615	-146.990	3.199
	(STRAIN)		-1.074E-05	1.444E-03	-1.399E-03	-1.399E-03
7	0.00000	0.24876	0.000	243.390	-228.854	2.174
	(STRAIN)		-1.994E-05	2.209E-03	-2.155E-03	-2.155E-03
8	0.00000	0.28833	0.000	298.186	-324.892	-14.405
	(STRAIN)		-3.462E-05	2.854E-03	-2.904E-03	-2.904E-03
9	0.00000	0.36466	549.170	772.002	275.785	342.586
	(STRAIN)		-7.825E-04	3.803E-03	-7.825E-04	-1.652E-04
10	0.00000	0.42740	549.170	1107.264	527.488	1019.238
	(STRAIN)		-1.484E-03	3.873E-03	-1.484E-03	3.060E-03
11	0.00000	0.46558	549.170	1141.959	550.787	1081.696
	(STRAIN)		-1.557E-03	3.905E-03	-1.557E-03	3.349E-03
12	0.00000	0.51548	549.170	1149.182	550.099	1082.668
	(STRAIN)		-1.581E-03	3.954E-03	-1.581E-03	3.405E-03



13	0.00000	0.54499	549.170	1155.260	549.127	1077.619
	(STRAIN)		-1.591E-03	4.010E-03	-1.591E-03	3.293E-03
14	0.00000	0.55909	549.170	1163.204	550.258	1073.999
	(STRAIN)		-1.593E-03	4.071E-03	-1.593E-03	3.246E-03
15	0.00000	0.55931	549.170	1170.735	549.130	1062.245
	(STRAIN)		-1.591E-03	4.153E-03	-1.591E-03	3.151E-03
16	0.00000	0.54488	549.170	1183.900	552.124	1055.341
	(STRAIN)		-1.585E-03	4.252E-03	-1.585E-03	3.065E-03
17	0.00000	0.51141	549.170	1192.048	548.838	1025.912
	(STRAIN)		-1.557E-03	4.387E-03	-1.557E-03	2.851E-03
18	0.00000	0.48237	549.170	1166.938	523.695	947.376
	(STRAIN)		-1.481E-03	4.463E-03	-1.481E-03	2.434E-03
19	0.00000	0.42982	549.170	850.756	268.193	276.705
	(STRAIN)		-7.866E-04	4.518E-03	-8.653E-04	-8.653E-04
20	0.00000	0.35931	0.000	408.076	-349.044	13.147
	(STRAIN)		-5.143E-05	3.598E-03	-3.398E-03	-3.398E-03
21	0.00000	0.34819	0.000	382.158	-335.314	10.754
	(STRAIN)		-3.861E-05	3.393E-03	-3.236E-03	-3.236E-03
22	0.00000	0.34442	0.000	354.460	-368.879	-7.431
	(STRAIN)		-1.632E-05	3.328E-03	-3.356E-03	-3.356E-03

TRAMO II eCM = 0.15 - MOD. BICAPA

Problem No. 1 Period No. 1 Load Group No. 1



INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\TESIS BICAPA eCM15.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -TRAMO II eCM = 0.15 - MOD. BICAPA

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 2
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 1
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 15
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.4
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR EACH LAYER, NUMBER OF PERIODS, AND MODULUS ARE : 1 1.461E+05

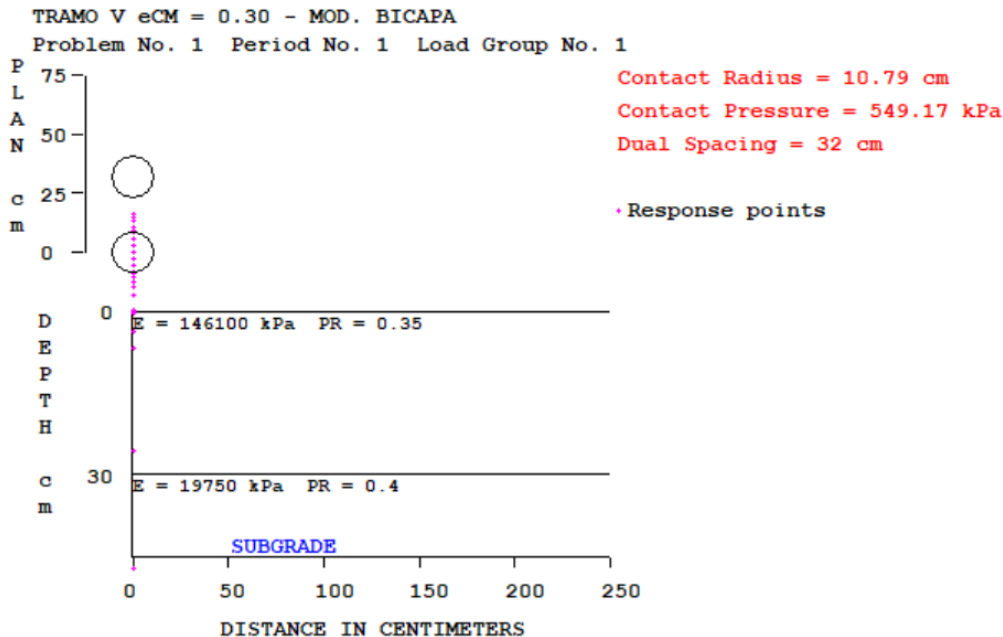


LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
 CONTACT RADIUS (CR)----- = 10.79
 CONTACT PRESSURE (CP)----- = 549.17
 NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 22
 WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
 WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 32

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000-134.000 2 0.000 -84.000
 3 0.000 -40.790 4 0.000 -33.290 5 0.000 -25.790 6 0.000 -18.290
 7 0.000 -14.540 8 0.000 -12.670 9 0.000 -10.790 10 0.000 -9.440
 11 0.000 -8.090 12 0.000 -5.400 13 0.000 -2.700 14 0.000 0.000
 15 0.000 2.700 16 0.000 5.400 17 0.000 8.090 18 0.000 9.440
 19 0.000 10.790 20 0.000 13.400 21 0.000 14.700 22 0.000 16.000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.03449	0.000 1.883E-06	2.257 2.579E-05	-3.987 -3.191E-05	-0.330 -3.191E-05
2	0.00000 (STRAIN)	0.05307	0.000 1.106E-05	1.507 7.361E-05	-21.159 -1.358E-04	-5.262 -1.358E-04
3	0.00000 (STRAIN)	0.10652	0.000 5.313E-05	42.732 3.949E-04	-48.487 -4.480E-04	5.748 -4.480E-04
4	0.00000 (STRAIN)	0.12592	0.000 9.209E-08	70.051 5.667E-04	-45.157 -4.978E-04	8.726 -4.978E-04
5	0.00000 (STRAIN)	0.14970	0.000 -2.231E-04	95.409 8.202E-04	-52.270 -5.444E-04	-17.498 -5.444E-04
6	0.00000 (STRAIN)	0.19138	0.000 -2.457E-04	260.910 1.170E-03	107.682 -2.457E-04	149.299 1.389E-04
7	0.00000 (STRAIN)	0.21076	0.000 -2.905E-04	345.369 1.477E-03	154.124 -2.905E-04	216.229 2.834E-04
8	0.00000 (STRAIN)	0.22197	0.000 -2.666E-04	407.954 1.661E-03	199.381 -2.666E-04	272.973 4.135E-04
9	0.00000 (STRAIN)	0.23502	549.170 -1.576E-04	498.727 1.875E-03	278.710 -1.576E-04	363.362 6.246E-04
10	0.00000 (STRAIN)	0.24422	549.170 -8.190E-05	568.664 2.084E-03	334.317 -8.191E-05	420.718 7.165E-04
11	0.00000 (STRAIN)	0.25438	549.170 6.803E-05	647.916 2.207E-03	416.415 6.803E-05	513.445 9.646E-04
12	0.00000 (STRAIN)	0.27393	549.170 4.192E-04	816.443 2.485E-03	592.922 4.192E-04	702.637 1.433E-03
13	0.00000 (STRAIN)	0.28963	549.170 6.870E-04	942.654 2.674E-03	727.629 6.870E-04	849.508 1.813E-03
14	0.00000 (STRAIN)	0.29927	549.170 7.623E-04	997.081 2.786E-03	778.099 7.623E-04	907.844 1.961E-03
15	0.00000 (STRAIN)	0.30230	549.170 6.203E-04	972.154 2.811E-03	735.106 6.203E-04	869.206 1.859E-03
16	0.00000 (STRAIN)	0.29884	549.170 2.410E-04	866.954 2.767E-03	593.621 2.410E-04	728.509 1.487E-03
17	0.00000 (STRAIN)	0.29112	549.170 -2.795E-04	709.031 2.640E-03	393.078 -2.795E-04	530.713 9.923E-04
18	0.00000 (STRAIN)	0.28749	549.170 -4.913E-04	643.930 2.600E-03	309.360 -4.913E-04	445.052 7.625E-04
19	0.00000 (STRAIN)	0.28494	549.170 -6.321E-04	589.265 2.481E-03	252.406 -6.321E-04	395.742 6.924E-04
20	0.00000 (STRAIN)	0.29051	0.000 -5.500E-04	607.178 2.293E-03	299.471 -5.500E-04	478.026 1.100E-03
21	0.00000 (STRAIN)	0.28958	0.000 -5.743E-04	593.603 2.267E-03	286.130 -5.743E-04	463.653 1.066E-03
22	0.00000 (STRAIN)	0.28927	0.000 -5.820E-04	589.152 2.258E-03	281.797 -5.820E-04	458.943 1.055E-03



INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\TESIS BICAPA eCM30.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -TRAMO V eCM = 0.30 - MOD. BICAPA

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 2
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 1
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 30
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.4
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.461E+05 2 1.975E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
 CONTACT RADIUS (CR)----- = 10.79
 CONTACT PRESSURE (CP)----- = 549.17
 NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 22
 WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
 WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 32

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000-134.000 2 0.000 -84.000
 3 0.000 -40.790 4 0.000 -33.290 5 0.000 -25.790 6 0.000 -18.290
 7 0.000 -14.540 8 0.000 -12.670 9 0.000 -10.790 10 0.000 -9.440
 11 0.000 -8.090 12 0.000 -5.400 13 0.000 -2.700 14 0.000 0.000
 15 0.000 2.700 16 0.000 5.400 17 0.000 8.090 18 0.000 9.440
 19 0.000 10.790 20 0.000 13.400 21 0.000 14.700 22 0.000 16.000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
-----------	---------------------	----------------	--------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---

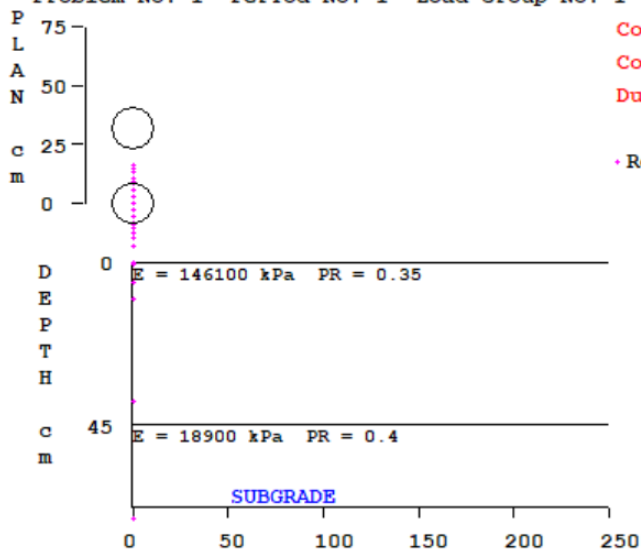
1	0.0000	0.03796	0.000	2.563	-8.68	
---	--------	---------	-------	-------	-------	--



	(STRAIN)		1.437E-05	3.844E-05	-6.546E-05	-6.546E-05
2	0.00000	0.06680	0.000	17.585	1.863	5.460
	(STRAIN)		-9.221E-06	1.028E-04	-4.245E-05	-4.245E-05
3	0.00000	0.11513	0.000	77.013	31.112	53.577
	(STRAIN)		-9.989E-05	3.242E-04	-9.989E-05	1.077E-04
4	0.00000	0.12664	0.000	101.826	44.486	74.199
	(STRAIN)		-1.172E-04	4.126E-04	-1.172E-04	1.574E-04
5	0.00000	0.14051	0.000	140.380	69.569	107.777
	(STRAIN)		-1.183E-04	5.360E-04	-1.183E-04	2.347E-04
6	0.00000	0.15823	0.000	210.076	126.033	170.037
	(STRAIN)		-4.796E-05	7.286E-04	-4.796E-05	3.587E-04
7	0.00000	0.16972	0.000	273.309	185.228	226.599
	(STRAIN)		7.023E-05	8.841E-04	7.023E-05	4.525E-04
8	0.00000	0.17653	0.000	319.592	231.357	268.141
	(STRAIN)		1.756E-04	9.909E-04	1.756E-04	5.155E-04
9	0.00000	0.18439	549.170	381.991	296.079	324.917
	(STRAIN)		3.330E-04	1.127E-03	3.331E-04	5.996E-04
10	0.00000	0.19036	549.170	428.013	350.706	378.077
	(STRAIN)		4.694E-04	1.184E-03	4.694E-04	7.223E-04
11	0.00000	0.19769	549.170	508.779	435.923	448.274
	(STRAIN)		6.911E-04	1.364E-03	6.910E-04	8.049E-04
12	0.00000	0.21179	549.170	658.681	613.604	615.609
	(STRAIN)		1.161E-03	1.564E-03	1.147E-03	1.152E-03
13	0.00000	0.22287	549.170	771.717	746.251	752.759
	(STRAIN)		1.521E-03	1.691E-03	1.456E-03	1.452E-03
14	0.00000	0.22887	549.170	819.593	800.643	807.541
	(STRAIN)		1.653E-03	1.757E-03	1.582E-03	1.578E-03
15	0.00000	0.22911	549.170	790.864	762.428	766.744
	(STRAIN)		1.519E-03	1.750E-03	1.487E-03	1.494E-03
16	0.00000	0.22435	549.170	698.403	641.421	649.493
	(STRAIN)		1.162E-03	1.688E-03	1.161E-03	1.235E-03
17	0.00000	0.21672	549.170	570.730	478.218	503.476
	(STRAIN)		6.999E-04	1.555E-03	6.998E-04	9.332E-04
18	0.00000	0.21274	549.170	502.316	402.339	444.361
	(STRAIN)		4.860E-04	1.410E-03	4.860E-04	8.743E-04
19	0.00000	0.21022	549.170	469.765	358.336	403.291
	(STRAIN)		3.612E-04	1.391E-03	3.612E-04	7.766E-04
20	0.00000	0.20662	0.000	418.242	299.472	356.210
	(STRAIN)		1.945E-04	1.292E-03	1.945E-04	7.188E-04
21	0.00000	0.20576	0.000	406.471	286.130	345.656
	(STRAIN)		1.566E-04	1.269E-03	1.566E-04	7.067E-04
22	0.00000	0.20548	0.000	402.643	281.797	342.234
	(STRAIN)		1.444E-04	1.261E-03	1.444E-04	7.028E-04

TRAMO IV eCM = 0.45 - MOD. BICAPA

Problem No. 1 Period No. 1 Load Group No. 1



Contact Radius = 10.79 cm
Contact Pressure = 549.17 kPa
Dual Spacing = 32 cm

• Response points

INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\TESIS BICAPA eCM45.DAT



TITLE -TRAMO IV eCM = 0.45 - MOD. BICAPA

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 2
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 1
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 45
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.4
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.461E+05 2 1.890E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
 CONTACT RADIUS (CR)----- = 10.79
 CONTACT PRESSURE (CP)----- = 549.17
 NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 22
 WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
 WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 32

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000-134.000 2 0.000 -84.000
 3 0.000 -40.790 4 0.000 -33.290 5 0.000 -25.790 6 0.000 -18.290
 7 0.000 -14.540 8 0.000 -12.670 9 0.000 -10.790 10 0.000 -9.440
 11 0.000 -8.090 12 0.000 -5.400 13 0.000 -2.700 14 0.000 0.000
 15 0.000 2.700 16 0.000 5.400 17 0.000 8.090 18 0.000 9.440
 19 0.000 10.790 20 0.000 13.400 21 0.000 14.700 22 0.000 16.000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

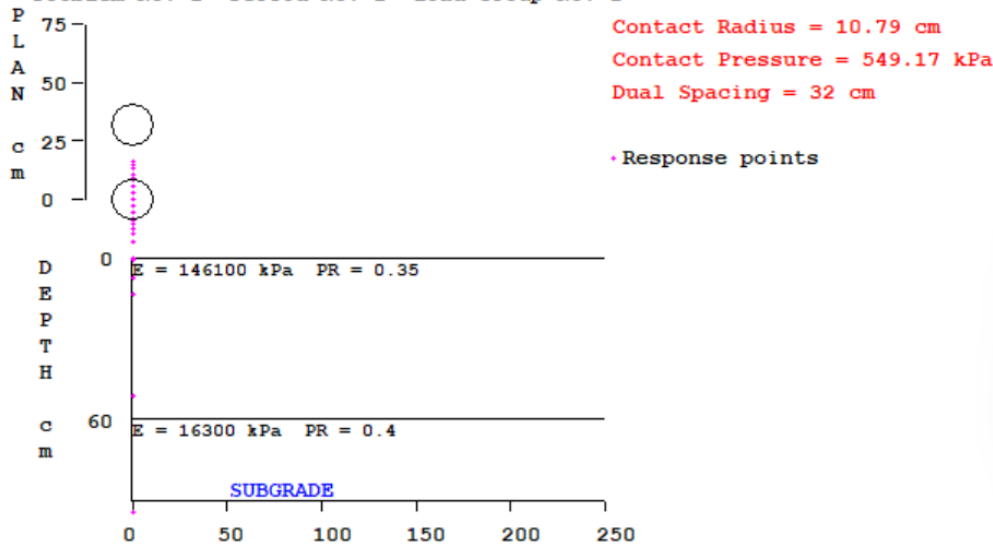
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.05070	0.000	9.894	3.667	5.962
	(STRAIN)		-1.289E-05	4.465E-05	-1.289E-05	8.323E-06
2	0.00000	0.07018	0.000	23.537	8.596	15.220
	(STRAIN)		-3.401E-05	1.040E-04	-3.401E-05	2.720E-05
3	0.00000	0.10066	0.000	66.256	31.112	50.251
	(STRAIN)		-6.615E-05	2.586E-04	-6.615E-05	1.107E-04
4	0.00000	0.10790	0.000	79.208	41.078	65.324
	(STRAIN)		-6.508E-05	2.873E-04	-6.508E-05	1.590E-04
5	0.00000	0.11759	0.000	106.739	64.111	90.742
	(STRAIN)		-3.428E-05	3.596E-04	-3.428E-05	2.118E-04
6	0.00000	0.13072	0.000	160.163	116.215	140.170
	(STRAIN)		7.597E-05	4.821E-04	7.597E-05	2.973E-04
7	0.00000	0.14106	0.000	230.668	185.227	193.822
	(STRAIN)		2.509E-04	6.708E-04	2.509E-04	3.303E-04
8	0.00000	0.14682	0.000	274.174	231.375	231.959
	(STRAIN)		3.710E-04	7.666E-04	3.712E-04	3.767E-04
9	0.00000	0.15365	549.170	333.878	285.458	296.072
	(STRAIN)		5.428E-04	8.921E-04	4.447E-04	4.447E-04
10	0.00000	0.15892	549.170	378.036	336.346	350.714
	(STRAIN)		6.890E-04	9.416E-04	5.564E-04	5.564E-04
11	0.00000	0.16397	549.170	420.612	385.719	403.546
	(STRAIN)		8.304E-04	9.882E-04	6.657E-04	6.657E-04
12	0.00000	0.17746	549.170	591.401	548.674	581.100
	(STRAIN)		1.342E-03	1.341E-03	9.466E-04	9.467E-04
13	0.00000	0.18757	549.170	750.120	694.027	708.240
	(STRAIN)		1.775E-03	1.775E-03	1.257E-03	1.257E-03
14	0.00000	0.19253	549.170	804.684	745.663	752.809
	(STRAIN)		1.918E-03	1.918E-03	1.373E-03	1.373E-03



15	0.00000	0.19185	549.170	761.623	706.662	721.612
	(STRAIN)		1.791E-03	1.791E-03	1.284E-03	1.283E-03
16	0.00000	0.18539	549.170	612.739	573.804	603.725
	(STRAIN)		1.372E-03	1.373E-03	1.013E-03	1.013E-03
17	0.00000	0.17646	549.170	459.641	425.900	439.551
	(STRAIN)		8.874E-04	1.073E-03	7.610E-04	7.609E-04
18	0.00000	0.17382	549.170	426.258	385.082	395.371
	(STRAIN)		7.629E-04	1.048E-03	6.674E-04	6.671E-04
19	0.00000	0.17108	549.170	392.271	343.595	350.655
	(STRAIN)		6.371E-04	1.022E-03	5.720E-04	5.721E-04
20	0.00000	0.16716	0.000	337.786	289.912	295.776
	(STRAIN)		4.666E-04	9.089E-04	4.666E-04	5.207E-04
21	0.00000	0.16726	0.000	338.522	286.115	288.917
	(STRAIN)		4.554E-04	9.395E-04	4.552E-04	4.810E-04
22	0.00000	0.16696	0.000	334.640	281.789	285.495
	(STRAIN)		4.432E-04	9.315E-04	4.431E-04	4.773E-04

TRAMO III eCM = 0.60 - MOD. BICAPA

Problem No. 1 Period No. 1 Load Group No. 1



INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\TESIS BICAPA eCM60.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -TRAMO III eCM = 0.60 - MOD. BICAPA

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 2
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 1
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3 , and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 60
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.4
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.461E+05 2 1.630E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS

CONTACT RADIUS (CR) = 10.79

CONTACT PRESSURE (CP) = 549.17

RESULTS ARE DESIRED (NPT) -- = 22



WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 32

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000-134.000 2 0.000 -84.000
3 0.000 -40.790 4 0.000 -33.290 5 0.000 -25.790 6 0.000 -18.290
7 0.000 -14.540 8 0.000 -12.670 9 0.000 -10.790 10 0.000 -9.440
11 0.000 -8.090 12 0.000 -5.400 13 0.000 -2.700 14 0.000 0.000
15 0.000 2.700 16 0.000 5.400 17 0.000 8.090 18 0.000 9.440
19 0.000 10.790 20 0.000 13.400 21 0.000 14.700 22 0.000 16.000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.05490	0.000 -1.823E-05	11.154 5.096E-05	3.667 -1.823E-05	6.932 1.194E-05
2	0.00000 (STRAIN)	0.07225	0.000 -3.788E-05	23.859 1.031E-04	8.596 -3.788E-05	16.515 3.529E-05
3	0.00000 (STRAIN)	0.09559	0.000 -4.738E-05	53.598 1.887E-04	28.051 -4.738E-05	46.325 1.215E-04
4	0.00000 (STRAIN)	0.10194	0.000 -3.054E-05	67.841 2.253E-04	40.153 -3.054E-05	59.629 1.494E-04
5	0.00000 (STRAIN)	0.10996	0.000 1.546E-05	91.616 2.805E-04	62.935 1.546E-05	81.745 1.893E-04
6	0.00000 (STRAIN)	0.12142	0.000 1.423E-04	141.040 3.860E-04	114.671 1.423E-04	127.184 2.579E-04
7	0.00000 (STRAIN)	0.12983	0.000 2.870E-04	191.589 4.894E-04	169.679 2.870E-04	173.408 3.214E-04
8	0.00000 (STRAIN)	0.13518	0.000 4.038E-04	231.014 5.686E-04	209.532 3.701E-04	213.159 3.699E-04
9	0.00000 (STRAIN)	0.14164	549.170 5.723E-04	286.819 6.786E-04	260.907 4.391E-04	275.323 4.392E-04
10	0.00000 (STRAIN)	0.14780	549.170 7.725E-04	354.475 8.281E-04	318.657 4.972E-04	348.448 4.971E-04
11	0.00000 (STRAIN)	0.15260	549.170 9.162E-04	401.115 9.159E-04	367.343 6.038E-04	396.397 6.038E-04
12	0.00000 (STRAIN)	0.16103	549.170 1.167E-03	493.228 1.167E-03	452.742 7.926E-04	469.448 7.928E-04
13	0.00000 (STRAIN)	0.17416	549.170 1.742E-03	702.074 1.742E-03	634.045 1.113E-03	644.912 1.113E-03
14	0.00000 (STRAIN)	0.18059	549.170 2.022E-03	804.696 2.022E-03	725.061 1.287E-03	729.882 1.285E-03
15	0.00000 (STRAIN)	0.17771	549.170 1.766E-03	713.565 1.766E-03	644.922 1.132E-03	656.525 1.132E-03
16	0.00000 (STRAIN)	0.16825	549.170 1.219E-03	517.164 1.219E-03	475.249 8.317E-04	493.496 8.319E-04
17	0.00000 (STRAIN)	0.16368	549.170 1.002E-03	439.583 1.002E-03	403.080 6.647E-04	434.615 6.647E-04
18	0.00000 (STRAIN)	0.16095	549.170 8.787E-04	400.919 9.295E-04	362.007 5.699E-04	395.481 5.700E-04
19	0.00000 (STRAIN)	0.15697	549.170 7.022E-04	342.614 8.003E-04	312.836 5.251E-04	332.006 5.251E-04
20	0.00000 (STRAIN)	0.15298	0.000 5.426E-04	292.039 7.030E-04	266.278 4.650E-04	274.661 4.649E-04
21	0.00000 (STRAIN)	0.15202	0.000 5.069E-04	280.698 6.809E-04	255.890 4.517E-04	261.882 4.517E-04
22	0.00000 (STRAIN)	0.15171	0.000 4.953E-04	277.033 6.738E-04	252.554 4.476E-04	257.711 4.475E-04



Anexo H:
Prueba de normalidad a datos de deflexión
registrados en campo



Demostración de normalidad – por grupos

Planteamiento: Las deflexiones registradas en la superficie de la subrasante son variables numéricas y requieren de distribución normal, para que se pueda aplicar una prueba estadística paramétrica. El análisis se realiza para cada grupo experimental y el grupo de control:

Grupo de control:	Espesor de la capa de mejoramiento = 0.00 m
Grupo de experimental 1:	Espesor de la capa de mejoramiento = 0.15 m
Grupo de experimental 2:	Espesor de la capa de mejoramiento = 0.30 m
Grupo de experimental 3:	Espesor de la capa de mejoramiento = 0.45 m
Grupo de experimental 4:	Espesor de la capa de mejoramiento = 0.60 m

¿La distribución de la variable aleatoria es distinta a la distribución normal?

Medidas	Espesor de la capa de mejoramiento (m)				
	0.00	0.15	0.30	0.45	0.60
Media	344.40	289.33	205.73	166.93	151.73
Error estándar de la media	24.98	15.15	10.07	7.66	9.45
IC 95% Límite inferior	295.44	259.64	184.14	151.93	133.22
IC 95% Límite superior	393.36	319.02	227.33	181.94	170.25

Significancia estadística, grupos experimentales y de control

Hipótesis

1 Ho: La distribución de la variable aleatoria **NO ES DISTINTA** a la distribución normal

H1: La distribución de la variable aleatoria **ES DISTINTA** a la distribución normal

2 Nivel de significancia

Nivel de Significancia (alfa) $\alpha = 5\% = 0.05$

3 Estadístico de prueba

3 Kolmogorov-Smirnov Lilliefors (útil en el análisis de datos pequeños a moderados en tamaño)

4 **Valor de P = 0,200 = 20.0%**

Lectura del p-valor



Con una probabilidad de error del 20.0%, la distribución de la variable aleatoria **ES DISTINTA** a la distribución normal

5 Conclusión

La distribución de la variable aleatoria **NO ES DISTINTA** a la distribución normal

Entonces siguiendo el procedimiento para todos los grupos experimentales y el de control se tiene: Según la prueba de Kolmogorov-Smirnov, corregido por Lilliefors

Medidas	Espesor de la capa de mejoramiento (m)				
	0.00	0.15	0.30	0.45	0.60
Media	344.40	289.33	205.73	166.93	151.73
Error estándar de la media	24.98	15.15	10.07	7.66	9.45
IC 95% Límite inferior	295.44	259.64	184.14	151.93	133.22
IC 95% Límite superior	393.36	319.02	227.33	181.94	170.25
Nivel de significancia (α)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
p-valor (%)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00

El p-valor (%) = 20.00 indica que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula a un nivel de confianza del 95%. Esto sugiere que, con base en la prueba de Kolmogorov-Smirnov corregida por Lilliefors, no se puede afirmar que los datos se desvíen significativamente de una distribución normal.



Anexo I:
Tablas referenciales



Tabla 25

Valores típicos de relación de Poisson

Material	Rango	Típico
Mezcla asfáltica en caliente	0.30-0.40	0.35
Concreto de cemento Portland	0.15-0.20	0.15
Materiales granulares no tratados	0.30-0.40	0.35
Materiales granulares tratados con cemento	0.10-0.20	0.15
Suelos de grano fino tratados con cemento	0.15-0.35	0.25
Materiales estabilizados con cal	0.10-0.25	0.20
Mezclas de cal y cenizas volantes	0.10-0.15	0.15
Arena suelta o arena limosa	0.20-0.40	0.30
Arena densa	0.30-0.45	0.35
Suelos de grano fino	0.30-0.50	0.40
Arcillas blandas saturadas	0.40-0.50	0.45

Nota. Adaptada y traducida de (Huang, 2004)

**Tabla 26***Valores típicos del M_R para materiales no ligados*

Clasificación del Material	Rango de M_R (KPa)	Valor típico de M_R (KPa)
A-1-a	38,500-42,000	40,000
A-1-b	35,500 - 40,000	38,000
A-2-4	28,000-37,500	32,000
A-2-5	24,000 - 33,000	28,000
A-2-6	21,500-31,000	26,000
A-2-7	21,500-28,000	24,000
A-3	24,500 - 35,500	29,000
A-4	21,500-29,000	24,000
A-5	17,000-25,500	20,000
A-6	13,500-24,000	17,000
A-7-5	8,000- 17,500	12,000
A-7-6	5,000 - 13,500	8,000
CH	5,000 - 13,500	8,000
MH	8,000- 17,500	11,500
CL	13,500-24,000	17,000
ML	17,000-25,500	20,000
SW	28,000-37,500	32,000
SP	24,000-33,000	28,000
SW-SC	21,500-31,000	25,500
SW-SM	24,000 - 33,000	28,000
SP-SC	21,500-31,000	25,500
SP-SM	24,000-33,000	28,000
SC	21,500-28,000	24,000
SM	28,000-37,500	32,000
GW	39,500 - 42,000	41,000
GP	35,500-40,000	38,000
GW-GC	28,000 - 40,000	34,500
GW-GM	35,500-40,500	38,500
GP-GC	28,000 - 39,000	34,000
GP-GM	31,000-40,000	36,000
GC	24,000-37,500	31,000
GM	33,000-42,000	38,500

Nota. M_R al contenido óptimo de humedad, de (NCHRP, 2004b)



Anexo J:
Panel Fotográfico

Figura 40

Vista panorámica del tramo experimental, se observa el suelo natural sin la capa orgánica superficial



Figura 41

Conformación y riego de la primera capa de mejoramiento antes de la compactación



Figura 42

Conformación y riego de la segunda capa de mejoramiento antes de la compactación



Figura 43

Compactación de la segunda capa de mejoramiento, se utilizó un rodillo liso vibratorio de 9 toneladas.





ANEXO 1
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital

Fecha de entrega: 7 de noviembre del 2024

1. Datos del (de los) autor (es):

Nombres y Apellidos: Wilfredo David Supo Pacori

Dirección: Urbanización San Apolinar Mz. E1, Lt. 28 - Juliaca

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: DNI N° 02428673

Teléfono: 951995560 email: dsupo4@gmail.com

Nombres y Apellidos: _____

Dirección: _____

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: _____

Teléfono: _____ email: _____

Facultad y/o Escuela de Posgrado: Maestría en Ingeniería Civil

Escuela Profesional o Mención: Geotecnia y Transportes

Título o Grado Académico a optar: Magister

Asesor: Mgtr. Fritz Willy Mamani Apaza

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones :

Trabajo de Investigación Tesis Trabajo de Suficiencia Profesional Trabajo Académico

Título: Influencia del espesor de la capa de mejoramiento en el módulo resiliente de la subrasante del pavimento, tramo experimental a 3825 metros sobre el nivel del mar

Palabras claves, (3 a 5 términos): capa de mejoramiento, deflectometría, retrocálculo, valor de diseño

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV ^{1,2}?

2

¹ Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entré otros relacionados.

² Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el repositorio de manera obligatoria



2. Referencia de tesis:

Bachiller Título 2da Especialidad Maestría Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o el (los) autor (es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

- Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.
- Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____
- No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.



No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

Sí autorizo

No autorizo

Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción "internacional" o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción "internacional" emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

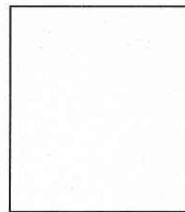
En consecuencia, **la opción "internacional" goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

Internacional

Nacional

Línea de investigación: Tecnología de la construcción - P50

Firma del Autor



Huella digital

7 de noviembre 2024
Fecha