

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Análisis comparativo de parámetros geo mecánicos en la subrasante, con
ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), residencial Posada del Sol, distrito de San
Sebastián – Cusco, 2024**

Asesor:

Ph.D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autor:

Mendoza Pillco, Raúl

Para optar el Título Profesional de: Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac – Perú

2025



Universidad Tecnológica de los Andes



Transformando vidas
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 035

En la ciudad de Abancay, a los 06 días del mes de marzo del 2025, siendo las 06:00 pm horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0226-2025- EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 28 de febrero del 2025, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	MSc. Ing. Maldonado Mendivil, Angel
Dictaminante :	Mag. Zegarra Molina, Wilbert Ernesto
Replicante :	Ing. Silva Noriega, Fanny

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Análisis comparativo de parámetros geo mecánicos en la subrasante, con ensayos (CBR,PDL y viga Benkelman), residencial Posada del Sol, Distrito de San Sebastián- Cusco,2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: Mendoza Pillco, Raul

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Mendoza Pillco, Raul	Aprobado

Siendo las 19:15pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: MSc. Ing. Maldonado Mendivil, Angel

(.....)

Dictaminante: Mag. Zegarra Molina, Wilbert Ernesto

(.....)

Replicante: Ing. Silva Noriega, Fanny

(.....)

Abancay 16 de mayo del 2025

20% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 20%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Mendoza Pillco Raúl
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	23933228
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0004-0321-5573
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Ph.D. Abbon Alex Vásquez Ramírez.
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó La presente tesis	:	2023-2024
Fuente de financiamiento	:	Propia
Porcentaje de similitud	:	20 %
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Dedico esta investigación con mucha gratitud a nuestro Señor por el infinito y maravilloso amor que derrama sobre todos los seres humanos, el cual nos guía en todo espacio de nuestra vida.

También dedico esta tesis a mi madre por siempre apoyarme en todo lo que realizo, por el esfuerzo y cariño que fortalece mi vida profesional y personal.

A mis hermanos quienes son parte importante de mi vida y siempre están presentes en mi corazón.

A la Universidad Tecnológica de los Andes por darme la posibilidad de desarrollarme profesionalmente en la facultad de Ingeniería, escuela académica profesional de ingeniería Civil.

A mi asesor de tesis Ph.D. Abbon Alex Vásquez Ramírez, por su apoyo y guía incondicional durante el proceso de construcción y presentación del informe de tesis.

Agradecimientos

A todos los que me apoyaron, con inmenso respeto doy a conocer mi agradecimiento a los señores miembros del jurado, por su contribución y estimables sugerencias para el desarrollo de esta tesis, en la escuela académico profesional de ingeniería Civil de la universidad tecnológica de los Andes - Apurímac, para compartir saberes que en el tiempo dan sus frutos, para la mejora del desempeño en la ingeniería, que contribuyen al desarrollo del país.

Un sincero agradecimiento a mi asesor de Tesis Ph.D. Abbon Alex Vásquez Ramírez, por brindarnos su tiempo y aportes basados en experiencias invaluableles y juicio de expertos durante la formulación de la tesis.

Por último, al laboratorio de mecánica de suelos INGELAB, que integro parte de este proyecto, en virtud de contar con la paciencia de escuchar e intercambiar ideas, reconociendo de cuanto hay por aprehender, y conocer cómo usarlo durante el la elaboración del informe de tesis, concluido a pesar de los distintos percances que se presentaron; pero, que nos hicieron más eficaces.

Resumen

El propósito de esta tesis fue determinar la correlación entre los parámetros geomecánicos en la subrasante mediante la aplicación de cargas estáticas y cargas de impacto, utilizando la teoría de correlación entre los datos obtenidos a través de métodos empíricos mecánicos (Viga Benkelman) y empíricos (PDL), en relación al (CBR).

Los terrenos en las áreas de investigación se componen de arcillas inorgánicas de escasa plasticidad, arcillas areno limosas (CL) y arenas arcillosas (SC), clasificadas de acuerdo al sistema de clasificación AASHTO, utilizado para la construcción de carreteras y terraplenes con características como A-6 y A-7-6 (suelo arcilloso).

El CBR (%) al 95% de MDS de las muestras inalteradas en estado natural de la población de la zona de estudio está conformado entre 7.1 y 7.8 %.

A través del método empírico (PDL) se analizó una ecuación a nivel de correlación definitiva entre los datos de PDL (mm/golpe) y CBR (%) natural. $CBR = (10.985) / (PDL)^{(0.116)}$, obteniendo un CBR (%) entre un rango de 6.98 y 7.76 para la población de la zona de estudio.

A través del método empírico mecánico (Viga Benkelman) se consolidó una ecuación de asociación definitiva entre los datos de la deflexión máxima (D_o) de la (Viga Benkelman) y CBR (%) natural. $CBR (\%) = 19.251 - 0.297 D_o$, obteniendo un CBR (%) entre un rango de 6.87 y 9.52 para el grupo de la zona de estudio.

Palabras clave.

Subrasante, parámetros geomecánicos, métodos empíricos, métodos empíricos mecánicos, resistencia al corte.

Abstract

The purpose of this thesis was to determine the correlation between the geomechanical parameters in the subgrade through the application of static loads and impact loads, using the correlation theory between the data obtained through empirical mechanical (Benkelman Beam) and empirical (PDL) methods, in relation to the (CBR).

The soils in the research areas are composed of inorganic clays of low plasticity, silty sandy clays (CL) and clayey sands (SC), classified according to the AASHTO classification system, used for the construction of roads and embankments with characteristics such as A-6 and A-7-6 (clayey soil).

The CBR (%) at 95% of MDS of the undisturbed samples in natural state of the population of the study area is conformed between 7.1 and 7.8 %.

Through the empirical method (PDL) an equation was analyzed at the level of definitive correlation between PDL (mm/stroke) and natural CBR (%) data. $CBR = (10.985) / (PDL)^{0.116}$, obtaining a CBR (%) between a range of 6.98 and 7.76 for the study area population.

Through the empirical mechanical method (Benkelman Beam) a definitive association equation was consolidated between the maximum deflection (D_o) data of the (Benkelman Beam) and natural CBR (%). $CBR (\%) = 19.251 - 0.297 D_o$, obtaining a CBR (%) between a range of 6.87 and 9.52 for the study area group.

Key words.

Subgrade, geomechanical parameters, empirical methods, mechanistic empirical methods, cut resistance.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Índice	ix
Índice de tablas.....	xiii
Índice de figuras.....	xvi
Índice de anexos.....	xvii
I. Introducción.....	18
II. Planteamiento del problema	21
2.1. Descripción y formulación del problema.	21
2.2. Objetivos.....	25
2.2.1 Objetivo general.....	25
2.2.2 Objetivos específicos	25
2.3. Justificación e importancia.	25
Justificación tecnológica.....	25
Justificación práctica	27
2.4. Hipótesis.....	27
Hipótesis general.....	27
Hipótesis específicas.....	28

2.5. Variables	28
Variable independiente (VI): Subrasante.	28
Variable dependiente (VD): Parámetros geomecánicos	28
III. Marco Teórico	31
3.1. Antecedentes	31
3.2. Bases teóricas.	44
3.2.1 Subrasante	44
Correlación de resultados (ensayo de CBR, DPL, viga Benkelman)	44
Parámetros geomecánicos	50
Propiedades físicas	51
3.3. Definición de términos.	55
3.3.1 Índice de plasticidad:	55
3.3.2 Contenido de humedad óptimo:	55
3.3.3 Grado de compactación:	56
3.3.4 Succión en el suelo:	56
3.3.5 Plasticidad:	56
3.3.6 Gravedad específica:	56
3.3.7 Esfuerzos:	56
3.3.8 Límite líquido:	56
3.3.9 Límite plástico:	56
3.3.10 Compactación:	57
3.3.11 Curva granulométrica:	57
3.3.12 Densidad:	57
IV. Metodología	58
4.1. Tipo y nivel de investigación	58

Tipo	58
Nivel de investigación	58
4.2. Ámbito temporal y espacial	58
Ámbito temporal	58
Espacial	58
4.3. Población y muestra	59
Población	59
Muestra	59
4.4. Instrumentos	59
Instrumento de recolección de datos.	59
4.5. Procedimientos	60
4.6. Análisis de datos	60
4.7. Consideraciones éticas	60
V. Resultados y Discusión	62
5.1. Resultados	62
Ensayos y resultados de límites de consistencia.	62
Ensayos y resultados de granulometría.	64
Resultados de clasificación de suelos.	66
Ensayos y resultados (CBR) con muestras inalteradas.	68
Ensayo y resultados del método empírico (PDL).	71
Ensayo y resultados del método mecánico empírico (viga Benkelman).	94
- Modelo de carga.	94
- Determinación de R5.	96
- Determinación de la Longitud Elástica (L0).	97
- Determinación del módulo de elasticidad de la subrasante (E0).	98

-	Parámetros de evaluación.....	100
-	Cálculo de los parámetros.....	109
-	Método mecanístico empírico (VIGA BENKELMAN).....	110
5.2.	Discusión de resultados.....	127
VI.	Conclusiones.....	135
VII.	Recomendaciones.....	139
VIII.	Referencias.....	140
IX.	Anexos.....	145

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de variables</i>	28
Tabla 2 <i>Valores que son deducidos para el ángulo de resistencia al corte ϕ'</i>	45
Tabla 3 <i>Correlación de DCP - CBR</i>	47
Tabla 4 <i>Parámetros del modelo de Hogg</i>	50
Tabla 5 <i>Clasificación de suelos según tamaños de partículas</i>	52
Tabla 6 <i>Resultados de límite líquido de las calicatas en estudio</i>	62
..... Tabla 7 <i>Resultados de límite plástico de las calicatas en estudio</i>	63
Tabla 8 <i>Resultados de Índice de Plasticidad de las calicatas en estudio</i>	63
Tabla 9 <i>Resultados de granulometría de las 4 calicatas en estudio</i>	65
Tabla 10 <i>Perfil estratigráfico del suelo</i>	66
Tabla 11 <i>Clasificación de suelos según SUCS/ AAHSTO</i>	67
Tabla 12 <i>Resultados de contenido de humedad de la calicata en estudio</i>	68
Tabla 13 <i>Resultado de Ensayo de Penetración de la calicata N° 01, en estado natural</i> ..	69
Tabla 14 <i>CBR en muestras inalteradas en estado natural</i>	71
Tabla 15 <i>Datos y cálculo del PDL y CBR natural en la calle N° 01</i>	72
Tabla 16 <i>Datos y cálculo del PDL y CBR natural en la calle N° 07</i>	73
Tabla 17 <i>Datos y cálculo del PDL y CBR natural en la calle N° 08</i>	73
Tabla 18 <i>Datos y cálculo del PDL y CBR natural en la calle N° 11</i>	74
Tabla 19 <i>Datos y correlación definitiva de las calicatas en estudio</i>	77
Tabla 20 <i>Valores de los parámetros de correlación</i>	80
Tabla 21 <i>Coeficiente de Pearson</i>	81
Tabla 22 <i>Datos y cálculo del PDL y CBR con la Ecuación de correlación para la calicata N° 01 (calle N° 01)</i>	83

Tabla 23 Datos y cálculo del PDL y CBR con la ecuación de correlación para la calicata N° 02 (calle N° 07).	86
Tabla 24 Datos y cálculo del PDL y CBR con la Ecuación de correlación para la calicata N° 03 (Calle N° 08).	88
Tabla 25 Cuadro de datos y cálculo del PDL y CBR con la ecuación de correlación para la calicata N° 04 (Calle N° 11).	91
Tabla 26 Resultados de correlación de CBR (%) Tesis.	93
Tabla 27 Coeficiente de correlación para el cálculo de R5 en el modelo de Hogg.	97
Tabla 28 Coeficiente de correlación para la determinación de L0 en el modelo de Hogg.	98
Tabla 29 Resumen de cálculo de Deflexiones y Radio de curvatura de cada prueba de la Residencial Posada del Sol.	105
Tabla 30 Lecturas de deflexión con la Viga Benkelman.	111
Tabla 31 Pares ordenados de CBR (%) natural y Deflexión Máxima (Do) de la Viga Benkelman.	113
Tabla 32 Cuadro de datos para el cálculo de la Correlación Definitiva en las zonas de estudio.	115
Tabla 33 Cuadro de valores de los parámetros de correlación.	119
Tabla 34 Cálculo de Homogeneización, Tramificación, Zona Débil – Fuerte, de la calle N° 01, carril derecho de la asociación Posada del Sol.	126
Tabla 35 Correlación entre el número PDC Y CBR	128
Tabla 36 Cuadro Resumen de CBR. Según Transport Road Research TRRL (1986).	129
Tabla 37 Cuadro Resumen de CBR. Según Webster S.L. et. al. (1994)	129
Tabla 38 Cuadro Resumen de CBR. Según NORMA VUUREN 1969	129
Tabla 39 Cuadro Resumen de CBR. Según MOPT Colombia (1992)	130

Tabla 40 <i>Cuadro Resumen de CBR. Según Kleyn y Van Heerden</i>	130
Tabla 41 <i>Clasificación de los suelos en función de la subrasante.</i>	131
Tabla 42 <i>Comparación de los CBR (%) Natural, CBR (%) tesis y otras investigaciones (Ec. de Correlación)</i>	132
Tabla 43 <i>Cuadro resumen de resultados de CBR (%) según la metodología de Hogg.</i> ...	133
Tabla 44 <i>Cuadro Resumen de Resultados de CBR (%) según la Ec. Correlación de Tesis.</i>	134
Tabla 11 <i>Clasificación de suelos según SUCS/ AAHSTO</i>	136
Tabla 14	137
<i>Cuadro de Resumen de CBR en muestras inalteradas en estado natural.</i>	137
Tabla 26	137
<i>Cuadro Resumen de Resultados de Correlación de CBR (%) Tesis.</i>	137
Tabla 43	138
<i>Cuadro resumen de resultados de CBR (%) según la metodología de Hogg.</i>	138

Índice de figuras

Figura 1 Estados de consistencia de un suelo	53
Figura 2 <i>Curva granulométrica de la calicata N° 01.</i>	64
Figura 3 <i>Penetraciones Vs Carga/ Esfuerzo, en estado natural calicata N° 01.</i>	70
Figura 4 <i>Densidad Seca Vs CBR al 95% MDS, en estado natural calicata N° 01.</i>	70
Figura 5 Ecuación de correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) Natural. ..	83
Figura 6 Índice de penetración IP (mm/golpe) para la calicata N° 01, (calle N° 01).	84
Figura 7 <i>Ecuación de Correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) con la ecuación de correlación para la calicata N° 01, (calle N° 01).</i>	85
Figura 8 <i>Índice de penetración IP (mm/golpe) para la calicata N° 02, (calle N° 07).</i>	87
Figura 9 <i>Ecuación de correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) con la ecuación de correlación para la calicata N° 02 (calle N° 07).</i>	87
Figura 10 <i>Índice de penetración IP (mm/golpe) y CBR (%) para la calicata N° 03, (calle N° 08).</i>	89
Figura 11 <i>Ecuación de correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) con la ecuación de correlación para la calicata N° 03 (Calle N° 08).</i>	90
Figura 12 <i>Índice de penetración IP (mm/golpe) y CBR (%) para la calicata N° 04, (calle N° 11).</i>	92
Figura 13 <i>Ecuación de correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) con la ecuación de correlación para la calicata N° 04 (Calle N° 11).</i>	92
Figura 14 <i>Esquema y parámetros del Modelo matemático de Hogg.</i>	95
Figura 15 <i>Significado cualitativo de los diferentes tipos de curvas de deflexiones.</i>	103
Figura 16 <i>Diagrama de Dispersión CBR (%) natural Vs Deflexión Máxima (Do).</i>	115
Figura 17 <i>Deflectograma de la calle N° 01, carril derecho de la asociación Posada del Sol.</i>	125

Índice de anexos

Anexo 1: Matriz de consistencia	146
Anexo 2: Cuadro de operación de variable	148
Anexo 3: Resultados de laboratorio de mecánica de suelos (INGELAB).	149
Anexo 4: Ensayos in situ con PDL y capacidad de carga (Qa) en las calles N° 01, 07, 08 y 11.	173
Anexo 5: Ensayos in situ con viga Benkelman y CBR (%) en las calles N° 01, 07, 08 y 11.	205
Anexo 6: RNE CE 010: Pavimentos Urbanos “capítulo 3.00, ítem 3.2.1: tabla 1” y el ítem 3.5.1 tabla 23”.....	225
Anexo 7: Certificados de calibración de equipos de laboratorio.	227

I. Introducción.

Esta tesis presenta como propósito la exposición de nuevas experiencias asociadas al uso de equipos empíricos (PDL) y mecánicos empíricos (Viga BENKELMAN), además de establecer la resistencia de la subrasante mediante la teoría de correlación entre los métodos empíricos y mecánicos empíricos. Para ello, se utiliza el Penetrómetro dinámico ligero (PDL), Viga Benkelman y CBR (%) natural, en terrenos cuyos factores geotécnicos se parecen a los suelos inalterados.

Es de conocimiento su extenso manejo de estos equipos en diversos países europeos y latinoamericanos, que tienen una fuerte utilización en asociación a los pavimentos de costo económico, En el Perú se ha generado un uso de tipo incipiente, debido a que carece de bases establecidas o sistemáticas para que se puedan transferir la tecnología; el aspecto de no existir una base normativa a nivel universal para el equipo y su uso, lo cual marca lo necesario para que sean cuidadosos en su utilización y el proceso interpretativo de los resultados.

La inclinación a emplear tablas y ábacos de asociación, por lo que se necesita realizar su comprobación de los factores del tipo de suelo y las condiciones ambientales nacionales, el cual representa una práctica de alto riesgo. Por lo tanto, se ha presentado la necesidad de implementar un método de estudio sistemático que facilite una adecuada caracterización de los suelos y, si se puede, lograr un uso seguro del ensayo el cual aporte a la valía de práctica en la Ingeniería. Para definir el valor de resistencia de la subrasante.

La resistencia al corte es particularmente relevante en relación con la fuerza de soporte o la capacidad de carga de un terreno empleado como subrasante bajo una carretera, pista u otra construcción.

Esta aplicación que tiene como meta primaria el contactarse con el equipo empírico, mecánico empírico y además existen otras aplicaciones resaltantes de los mismos.

Esto constituyó una primera experiencia en relación al uso de equipos empíricos (PDL) y empíricos mecánicos (Viga Benkelman) para la determinación de la resistencia de la subrasante in situ.

Se presenta aquí una breve descripción general del PDL y viga BENKELMAN, también existen casos que se pueden aplicarse y la metodología aplicada a cada uno de los procesos, desarrollados en varias publicaciones durante diversos años como son Boussinesq, Burmister, Jones, Ulery, Hogg, Odemark, Huang, además de otros muchos, solucionar los aspectos que necesitan ser atendidos en el momento que se dan y estos sean vigentes, en el contexto por lo cual es importante seguir y desarrollar soluciones y estudiar.

Además, se presentan y se revisan lo hallado en los resultados de la aplicación. Por lo último, después de hacer el análisis de los resultados hallados, se consideran al final las conclusiones de la investigación.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema.

- Descripción

A nivel mundial, el estudio de los suelos comenzó hace noventa años. En Asia, particularmente, se han enfrentado a problemas significativos debido a las intensas lluvias. Los suelos cohesivos, que presentan un grado mínimo de saturación, tienden a aumentar de volumen al ingresar al contacto con el agua. Sin embargo, este aumento no ocurre de manera uniforme, lo que puede provocar variaciones en el terreno y, como consecuencia, asentamientos. El contenido de humedad es un factor clave en este proceso, por lo que es fundamental realizar las pruebas necesarias en el lugar donde se planea cimentar. Para propiciar el cálculo de cuanto de humedad contiene, el valor asociado al límite de Atterberg es igualmente indispensable, así como para prevenir estos problemas en el futuro.

La ingeniería vial en función a las condiciones necesarias de tráfico que pasan las carreteras, lo cual se ha debido a resistir las carreteras, que se vienen realizando en diversos estudios principalmente en el carácter a nivel teórico el cual debe ser práctico y poder obtener los resultados en función a un criterio establecido, el cual es técnico y sirve para la modificación de la metodología existente esta puede ser de control y también de diseño para que de esta forma se establezca una línea de base que sea común y se puede comparar los suelos de manera distinta. (Ortiz, 2021).

En la actualidad, para estudiar los suelos es fundamental en el ámbito de la ingeniería. Utilizando diversos equipos, debido en el campo o en el laboratorio, se considera que evaluar cómo está el estado y clasificar los pavimentos. De acuerdo a los resultados obtenidos, se decide si es necesario llevar a cabo la reposición o el sostenimiento del suelo. En la investigación es esencial para desarrollar el proyecto civil. Sin embargo, es lamentable que en muchas obras civiles no se lleve a cabo un estudio de suelos adecuado ni

se evalúe la resistencia del terreno que debe soportarlas. Sin embargo, es de suma importancia determinar la resistencia de la subrasante. Están planteados diversos métodos y aplicación de equipos de laboratorio, para poder analizar las características mecánicas y las físicas del paquete que esta estructura en los suelos. (Avila & García García, 2017).

En Bogotá, existe diversos problemas entre los cuales se considera principales la ausencia de estudios previos de suelos, lo cual resulta ser muy perjudicial para alcanzar y lograr cualquier obra propia de la ingeniería. Realizar el estudio de suelos es esencial, ya que proporciona información valiosa los cuales se refieren a las propiedades mecánicas y físicas propias del terreno. El ingeniero civil debe desafiarse a una variedad de retos que surgen del terreno. Casi todas las estructuras de ingeniería civil requieren establecer una base, ya sea sobre la superficie terrestre o en sus profundidades. Para que una estructura se desarrolle de manera satisfactoria esta debe tener una cimentación bien establecida, este se puede transferir las diferentes formas de hacer una manera que sea viable y que este estructurado de manera estable, ello se ha visto en Colombia debido a la existencia normas vigentes para que la realización del ensayo de los suelos se asume mediante las normas a nivel internacional. (Ávila & García García, 2017).

En Perú, los problemas relacionados con suelos cohesivos de bajo grado de saturación son una preocupación creciente, ya que han generado las fallas en la realización de las cimentaciones que fueron hechas durante los últimos años. Sin embargo, estas dificultades no se deben únicamente a las características del suelo, sino también a la falta de saberes del grupo poblacional sobre cuáles eran los efectos que generaban los suelos y que pueden ocasionar. En la mayoría del territorio, los terrenos presentaban predominancia en los suelos a ser colapsables, rellenos con soltura y expansivos, lo que subraya la importancia de un estudio y análisis adecuados antes de iniciar cualquier proyecto de ingeniería. Estos suelos impactan directamente a la comunidad, afectando no solo las

carreteras y edificaciones, sino también las obras de saneamiento. Para realizar una investigación de manera adecuada a nivel internacional, se establecieron estándares a través de la Asociación Americana de Ensayo de Materiales. Esta organización considera una serie de pruebas para el análisis de los suelos, incluyendo consideraciones específicas para generar la prueba de penetración dinámica ligera (DPL), que se aplica principalmente en suelos cohesivos. Perú se ubica en una región propensa a sismos. No obstante, entre el principal desafío en el ámbito del proceso de construir, que es ejecutar el proyecto sin realizar el estudio previo, ni el proceso de ser supervisado por un profesional competente y calificado, lo que implica posterior a ello a deficiencias en la seguridad estructural. La razón primordial por lo que las personas no realizan investigaciones es debido a los costos adicionales que generan y el tiempo que generan los diseños y análisis. Por ello en el Perú se muestran construcciones que presentan pésimo estado que, al generarse un sismo, están pueden colapsar y generar grandiosas pérdidas humanas y económicas. (Bazán Galarreta, 2020).

En la actualidad, en la construcción denominada como Posada del Sol, ubicada en San Sebastián, se pueden apreciar construcciones de diversas índoles. Sin embargo, se estima que mayormente estas obras, tanto viales como estructurales, carecen de un adecuado estudio de suelos y no han sido sometidas a una valoración de la resistencia. Considerando la situación problemática expuesta, surge el inconveniente de realizar la investigación que nos permita determinar la resistencia del suelo en el condominio Posada del Sol, situada en San Sebastián. Tradicionalmente, la resistencia del suelo se determina mediante la metodología conocida como C. B. R. (California Bearing Ratio), que es una de las pruebas más ampliamente usados en el ámbito de la ingeniería. Este ensayo nos permite evaluar el comportamiento mecánico del suelo, midiendo su resistencia al esfuerzo cortante. Para ello, se compacta el suelo a una humedad óptima en modelos normalizados, aplicando

la realización de lo denominado pistón normalizado que golpea al número de la muestra. Por lo cual, el C. B. R. se emplea ampliamente para estudiar la asociación con otra prueba de resistencia, denominada como P. D. L. (Printed Direct Laminate). Esta herramienta permite evaluar el proceso de compactación, la resistencia mecánica del suelo y la capacidad de carga. Este estudio se utiliza ampliamente para evaluar las cimentaciones superficiales de pavimentos, especialmente en suelos de grano fino y blando. Aunque la metodología presentada se centra en los ensayos con la Viga Benkelman, es posible adaptarla a comprobaciones realizadas con otros instrumentos o métodos para determinar deflexiones.

Formulación del problema

Problema general.

- ¿Cuál es la relación de los parámetros geomecánicos en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), residencial Posada del Sol distrito de San Sebastián – Cusco, 2024?

Problemas específicos.

- ¿Cuál es la correlación de los resultados en los parámetros geomecánicos en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), residencial Posada del Sol distrito de San Sebastián – Cusco, 2024?
- ¿Cuál es la relación de las propiedades físicas en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), residencial Posada del Sol distrito de San Sebastián – Cusco, 2024?
- ¿Cuál es la relación de las propiedades mecánicas en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), residencial Posada del Sol distrito de San Sebastián – Cusco, 2024?

2.2. Objetivos.

2.2.1 Objetivo general

- Determinar la relación de los parámetros geomecánicos en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), Residencial Posada del Sol, distrito de San Sebastián – Cusco, 2024.

2.2.2 Objetivos específicos

- Analizar la correlación de los resultados en los parámetros geomecánicos en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), Residencial Posada del Sol, distrito de San Sebastián – Cusco, 2024.
- Encontrar las propiedades físicas en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y viga Benkelman), residencial Posada del Sol, distrito de San Sebastián – Cusco, 2024.
- Evaluar las propiedades mecánicas en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), Residencial Posada del Sol, distrito de San Sebastián – Cusco, 2024.

2.3. Justificación e importancia.

- **Justificación tecnológica.**

En la región del Cusco, no se cuentan con registros de ensayos empíricos de densidad de partículas (PDL) ni de ensayos mecánicos empíricos (Viga Benkelman) realizadas in situ. Sin embargo, se hace necesario que este tipo de pruebas tanto los empíricos de campo (PDL) como los mecánicos (Viga Benkelman), se utilizan en diversas localidades, a nivel internacional (donde están normalizados) y nacional (donde aún no lo están), como es el caso de Lima. Estos ensayos permiten lograr datos de manera inmediata sobre los factores mecánicos del suelo.

Dado el contexto de la región de Cusco no existe un registro de ensayos empíricos (PDL) ni de ensayos mecánicos empíricos (Viga Benkelman) realizadas in situ, se logró

establecer una asociación con el CBR de laboratorio para aquellos suelos analizados de la Asociación Posada del Sol.

El Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) NTE CE 0. 10, que se ocupa de los Pavimentos Urbanos, establece la necesidad de lograr la medición de CBR en laboratorio. Para ello, se recomienda seguir las pautas de la normatividad NTP 339. 175 del 2002, ASTM D 4429-93, MTC E 133-2000 y AASHTO T 193-2003. Esta medición es crucial para controlar la resistencia de la subrasante, así como de las capas base y subbase, y garantiza que el CBR de diseño se cumpla durante la ejecución del proyecto. Sin embargo, tanto el ensayo empírico (PDL) como el mecánico empírico (Viga Benkelman) aún no están normalizados en Perú. Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de establecer una Norma Técnica Peruana (NTP) para normalizar el Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL), al igual que en Estados Unidos, donde se utiliza la norma ASTM D 6951- (03), tal como se menciona y recomienda en el RNE CE 010: Pavimentos Urbanos, en el capítulo 3. 00, ítem 3. 2. 1 y tabla 1, así como en el ítem 3. 5. 1 y tabla 23 (ver Anexo N° 06). Colombia, entre otros países, ha adoptado una norma similar, la INV E172 (2013). Uno de los propósitos del estudio es contribuir a la normalización de los ensayos empíricos (PDL) y mecánicos empíricos (Viga Benkelman) en nuestro país, aprovechando las experiencias adquiridas en otras naciones.

Respecto a las exigencias del RNE en cuanto a los puntos de revisión y las tolerancias relacionadas con Técnicas de Estudio de Campo, asimismo los ensayos de laboratorio, como también los requerimientos de materiales y las pruebas de control, es fundamental subrayar la importancia de contar con equipos empíricos como el PDL y equipos mecánicos, como la Viga Benkelman, en el lugar de la obra. Estos equipos proporcionan resultados casi instantáneos, lo que permite realizar numerosas auscultaciones no destructivas de manera rápida y económica. Esta capacidad resulta

especialmente crucial para la Residencia y la Supervisión de obras, ya que facilita la aprobación de cada sector o etapa del trabajo, especialmente en lo que respecta a la resistencia de la subrasante y además de otras capas in situ. También la tesis se enfoca exclusivamente en la relación entre el Penetrómetro Dinámico Ligero y la Viga Benkelman con la subrasante o el terreno donde se ha realizado el pavimento. Esta delimitación responde a la relevancia fundamental de dicho soporte en el pavimento, a pesar de que, pasaron los años, se hicieron diversos estudios y experimentos sobre el PDL y la Viga de Benkelman en diferentes etapas de la estructura propia del pavimento y en la construcción de los terraplenes.

- **Justificación práctica**

Esta tesis demuestra que el PDL y la Viga Benkelman pueden ser utilizados por una parte importante de los pobladores en las ciudades, regiones y los países en vías de desarrollo, gracias a su bajo costo de construcción y su eficacia operativa, especialmente en entornos rurales, como se ha evidenciado en la construcción de la Posada del Sol, ubicada en San Sebastián, de la provincia de Cusco, del departamento de Cusco. Además, el estudio revela una asociación del 97% con otros instrumentos de su categoría que presentan montos más elevados, lo que convierte al PDL y la Viga de Benkelman en opciones confiables, económicas y sostenibles.

2.4. Hipótesis.

- **Hipótesis general**

La relación de los parámetros geomecánicos en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y viga Benkelman), residencial Posada del Sol distrito de San Sebastián – Cusco, 2024.

- **Hipótesis específicas**

- La correlación de los resultados en los parámetros geomecánicos en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y viga Benkelman), residencial Posada del Sol distrito de San Sebastián – Cusco, 2024.
- La relación de las propiedades físicas en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y viga Benkelman), residencial Posada del Sol distrito de San Sebastián – Cusco, 2024.
- La relación de las propiedades mecánicas en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y viga Benkelman), residencial Posada del Sol distrito de San Sebastián – Cusco, 2024.

2.5. Variables.

- **Variable independiente (VI): Subrasante.**
- **Variable dependiente (VD): Parámetros geomecánicos**

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable Independiente: subrasante	El ensayo de Penetración Dinámica del Tipo Ligero – DPL: Ideado en Alemania para evaluar la capacidad portante del subsuelo de manera directa, se realiza mediante la medición de la resistencia que ofrece el suelo al avance del aparato llamado penetómetro, mediante	El ensayo de penetración dinámica ligero, tiene la peculiaridad de poder realizar el ensayo en campo in situ, reduciendo el	correlación de los resultados (ensayo de CBR y ensayo de DPL y viga Benkelman)	Ensayo de CBR: -Capacidad de soporte del suelo bajo condiciones de humedad y densidad. Ensayo de CBR -Relaciones de penetración - carga	Guía de Observación Método de CBR de laboratorio. mm/ kg Guía de Observación Método de

	golpes (penetrómetro dinámico) (Riveros Lizana & Taípe Matamoros, "Análisis comparativo de parámetros geomecánicos a partir de ensayos DPL y Triaxial en suelos cohesivos de la ciudad universitaria de la universidad nacional de Huancavelica", 2019) el método de la viga Benkelman con ello se determina las deflexiones colocando diferentes cargas en un camión de tipo C que es estandarizado por el manual de viga Benkelman, la obtención de deflexiones se realizó a cada 100 metros siendo así un total de 16 unidades de medición, el camión debe contar con el peso de 8.2 toneladas y que las llantas que este a presión de 80 PSI, luego estos resultados obtenidos en campo (Julca Rodríguez, "Análisis de la confiabilidad del ensayo de viga benkelman para establecer la condición estructural del pavimento de la Av. El Sol del distrito de Ate, 2019", 2019)	tiempo de ejecución del ensayo.	mm/ kg MTC (E-132)	CBR de laboratorio.
			Ensayo de DPL: Resistencia a la penetración del suelo por medio de golpes.	mm/ kg mm / #golpes Guía de observación Penetrómetro Dinámico de Cono
			Ensayo de DPL: Relaciones de penetración – número de golpes ASTM D6951-03	mm / #golpes Guía de observación. Método PDC in situ.
			Ensayo viga Benkelman; Medición de la deflectometría, módulo de elasticidad de la subrasante	CBR- MTCE1002- Metodo HOGG
Variable Dependiente:	Son aquellas propiedades que tienen los suelos,	Los parámetros geomecánicos	Ensayo de granulometría	

parámetros geomecánicos	en especial de los suelos cohesivos Los suelos cohesivos son suelos arcillosos o limosos. Por lo tanto, se compactan mejor por amasado e impacto. La tendencia de los suelos es combinarse, formando laminaciones continuas con espacio de aire entre ellas, impidiendo que caigan partículas en los vacíos por vibración (Bruno, "Zonificación de suelos para el diseño de cimentaciones superficiales en el sector choc choc, distrito de Moche, Trujillo, La Libertad", 2022)	son imprescindibles para la realización y diseño de una súper estructura para lo cual se deben calcular realizando procedimiento estandarizados de acuerdo a norma.	Propiedades físicas Propiedades mecánicas	Ensayo de Contenido de humedad % Límites de Atterberg:(Limite líquido, Limite plástico, Índice de plasticidad) -Proctor Modificado:(Optimo contenido de humedad (%) y Máxima densidad seca: (gr/cm³)) -Resistencia a la penetración (%): CBR 6 % min. (material apto para capas de subrasante según MTC)	Manual de Carreteras Sección Suelos y Pavimentos-MTC/14
----------------------------	--	--	---	--	--

Fuente: Elaboración propia

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

Borja (2021) en su tesis titulada "Correlación entre el CBR, DCP, de las propiedades índice y mecánicas en los suelos granulares de la Parroquia San José de la zona de Poaló del Cantón Píllaro, Provincia de Tungurahua", se tuvo como propósito de establecer la relación entre el CBR, el DCP y las propiedades establecidas como mecánicas y el índice de suelos granulares de esta región. Para alcanzar este objetivo, empleó una metodología basada en un diseño a nivel experimental y el enfoque analítico y cuantitativo. Como resultado, se establecieron 22 asociaciones en total, considerando entre dos y tres variables a la vez. La fiabilidad de estas asociaciones fluctúa entre un 50. 25% y un 97. 53%, lo que indica un nivel de confianza considerado bueno. En relación con la caracterización del CBR, se observa una variación mínima, evidenciando una buena asociación con errores reducidos. Esto se debe a que los valores reales obtenidos a través de pruebas de laboratorio reflejan el grosor igual en distintas capas del pavimento flexible. En conclusión, la correspondencia entre los valores del CBR de laboratorio y los del DCP in situ, representada en la gráfica obtenida, se considera buena, ya que presenta un porcentaje del 51. 72%. Este resultado permite hacer lo posible estimar un valor del CBR a partir del índice de penetración también conocido mediante la utilización de dicho gráfico. Sin embargo, es importante resaltar que esta correlación no reemplaza la necesidad de realizar el ensayo CBR. Al confrontar la ecuación propuesta por la ASTM D 6951, se observa que el factor de determinación alcanzado es del 52% en los valores obtenidos del CBR, a excepción de los suelos comparados como CL con un $CBR < 10$ y suelos tipo CH, por cuyos motivos se menciona que la ecuación de tiende a alcanzar los diferentes tipos de suelos lo cual se vuelven en general y además poco confiable, debido a que presenta un error considerado en un 48% del valor hallado del CBR. Asimismo, de las especificaciones

que se dan en el MTOP – 2012 se asume que el CBR al 80% que es mínimo para la base y el CBR al 40% para el proceso de subbase, lo cual demuestra que existe de forma directa como se obtiene los valores estructurales de las capas realizadas en los pavimentos.

Morejón, Mena Garzón y Guerrero Cuasapaz (2020) en su artículo de estudio titulado "Correlación entre el penetrómetro dinámico de cono y la asociación de soporte de California en campo para el suelo de subrasante de la vía de Portoviejo-Manta". De acuerdo a Torres Merino, Castillo se propusieron evaluar qué condiciones presentan en el terreno que tiene que soportar la pista. Para lo cual se utilizó dos formas o métodos, como son el penetrómetro dinámico de cono y la asociación denominada de soporte de California, con el fin de determinar si existe una correlación entre ambos. Utilizando la metodología de diseño experimental con un enfoque cuantitativo y analítico, se alcanzaron los siguientes resultados: en un primer análisis se encontró la existencia de una asociación a nivel directo de los dos métodos, lo que dio lugar a una ecuación con una formulación de coeficiente de asociación de 0.80 y una significatividad de 7.246×10^{-5} . Posteriormente, se realizó un segundo nivel de ecuación denominado de regresión múltiple que reveló un valor de correlación de 0.82 el cual se dio entre los parámetros físicos del suelo y los métodos, teniendo como p-valor de 0.0091, de esta manera se valida el nivel de fiabilidad de lo hallados. En conclusión, se asume que la utilización de las funciones múltiples y directas que corresponden a una penetración de 0.2", en base a ello se generó el mayor nivel de significancia en la ecuación.

Ávila y García (Colombia, Bogotá 2017); "Correlación del penetrómetro dinámico de cono (P.D.C.) con estudio de asociación de soporte de california (C.B.R.) para suelos en la localidad de Engativá de la ciudad de Bogotá, utilizando la norma del Instituto Nacional de Vías", el propósito de la investigación de la determinación de la asociación entre el uso del penetrómetro dinámico de cono (P. D. C.) y la utilización del ensayo de Relación de

Soporte de California (C. B. R.) dentro del subrasante de la ciudad de Engativá de Bogotá D.C., de acuerdo a la normatividad del Instituto Nacional de Vías. En el estudio que se realizó mediante el diseño experimental teniendo el enfoque analítico y cuantitativo. Lo que se halló de acuerdo al ensayo en el estudio, es que el CBR se mostró la subrasante el cual tiene como clasificación de regular a muy pobre, cuyos valores se asumen entre los valores de 0.01% hacia el 9%. Los resultados que se hallaron mencionan que la subrasante tiene la habilidad de generar una resistencia regular o baja, lo cual compromete el soporte de cualquier estructura pavimental. Siendo los datos hallados para el CBR, en correlación con el PDC a través de las ecuaciones propuestas por el Congreso de Ingeniería, revelan cifras más bajas. Esta situación podría resultar en un sobre diseño o en la necesidad de mejorar el suelo, lo que conllevaría un incremento de los costos del proyecto. En el transcurso de esta investigación, se determinó que la ecuación lineal (potencial) es la que mejor se ajusta a la correlación entre PDC y CBR, utilizando los datos recopilados en la investigación de los suelos en el distrito de Engativá. Además, esta ecuación presenta el valor de R^2 más elevado. No obstante, en los cuatro muestreos realizados en el área del proyecto, se obtuvo una exactitud de $R^2 = 1$, lo que indica una certeza del 100% en la correlación realizada y que los valores de CBR son muy similares a los obtenidos en los ensayos previos. En conclusión, la asociación que existe entre el CBR y aquellos parámetros físicos del suelo no siempre son lineales; en ciertas situaciones, puede adoptar una forma potencial o exponencial, dependiendo del parámetro en cuestión. Este hallazgo se acerca al cien por ciento (100%) en términos de confiabilidad. Sin embargo, a la luz de lo hallado en el estudio, se menciona que no es adecuadamente confiable para el uso de la asociación entre el P. D. C. y C. B. R. que actualmente emplean algunos ingenieros en los estudios de suelos en Colombia.

Lupita, Delgado Romero Moserate, Ortiz Hernandez, & Delgado (2019), en el informe “Estudio para determinar la capacidad portante del suelo que tiene como parámetro geotécnico, utilizando el ensayo de cono dinámico de penetración (DCP)”, el propósito de la investigación fue determinar la habilidad portante para el suelo usando el equipo del penetrómetro dinámico liviano (DPL). Teniendo en cuenta, que se utilizó como método el diseño de carácter no experimental, que tiene como enfoque cuantitativo, lo que permitió llegar a conclusiones analíticas. Entre los hallazgos que se encontraron en el estudio revelaron la existencia de parámetros que cuentan con una composición del suelo en el lugar de la investigación, donde se determinó un valor de CBR que clasifica la calidad de la subrasante como "pobre para regular". Asimismo, la textural del material usado se identificó la naturaleza de los suelos limosos, con un rango de plasticidad que varía de baja a alta. A lo largo de cinco sondeos, se llevó a cabo el ensayo in situ con el DCP, con el propósito de hallar la valoración de CBR. Para ello, se utilizó una fórmula experimental propuesta por la norma ASTM D6951M09 (2009), que se validó y demostró su efectividad en suelos con características limo-arcillosas. En conclusión, la evaluación del DCP se presenta como un estudio complementario que permite verificar como es el suelo o sus condiciones del área estudiada.

Pérez (2016), en el informe “Estudio de asociación entre los ensayos (DCP) penetrómetro dinámico de cono y (CBR) relación de soporte de california en diversos suelos”, el objetivo de este estudio es analizar la asociación entre las pruebas usando el penetrómetro dinámico de cono (DCP) y la asociación del soporte California (CBR) de las diversas clasificaciones de los suelos. Para lograrlo, se emplea como método el basado en el diseño experimental de enfoque analítico y cuantitativo. Los resultados indican que el CBR de laboratorio que no presentará fallas, ya que existe una similitud en la habilidad de soporte que se obtiene del suelo mediante las pruebas del CBR y DCP.

En el contexto de la Zona Oriental, se observa que la estructura del diseño del pavimento que solo considere el CBR de laboratorio puede tener inconvenientes, porque existe una baja densidad que tenga la portabilidad del suelo asociada a su alta humedad. En esta región, el contenido de humedad varía siendo los valores del 44% y el otro el 105%, en comparación con la Zona Central, donde fluctúa los valores de 21% y el otro el 34%. Asimismo, en cuanto al Índice Plástico de la Zona Oriental se sitúa entre NP y 24, debido a que en la Zona Central oscila entre 2 y el 10.

En cuanto al CBR en laboratorio, en la Zona Oriental se registra un rango desde el 7% hasta el 22%, lo que no sucedía en la Zona Central se encuentra entre el 12% y el 16%. Los índices DCP, medidos en la Zona Oriental por medio del equipo correspondiente, varían entre los valores de 50 y el valor de 105 mm/golpe, lo cual sucede en la Zona Central se encuentran entre 16 y el valor de 24 mm/golpe. Esta diferencia se atribuye a las condiciones naturales en las que se realizaron los ensayos, lo que sugiere que los suelos de la Sierra presentan una mayor resistencia.

Finalmente, se concluye que no se ha logrado establecer una asociación directa entre el valor de CBR y el DPL en la Zona Oriental, a diferencia de la Zona Central, donde los resultados muestran una mayor correlación. El valor orientado al porcentaje de variabilidad entre el CBR propio del laboratorio y el CBR in situ para que se desarrollen las especificaciones propias en la Vía Misahuallí – Atacapi siendo el 11,82%. La utilización del equipo DCP de 8 kg proporcionó un mejor entendimiento de las condiciones reales de la vía, lo que es fundamental para el diseño de estructuras del pavimento. Si se considerara únicamente el CBR in situ, el diseño estructural en la Zona Oriental sería adecuado bajo las condiciones naturales, aunque resultaría en un sobredimensionamiento del espesor de las capas, lo que incrementaría los costos de construcción. Al integrar los resultados de ambos

métodos de ensayo, DPL y CBR, se logró identificar mejoras en la subrasante, recomendándose así la colocación de un pedraplén.

Rojas y Palacios (2023), en su tesis “Análisis de la capacidad portante en función al suelo aplicando el penetrómetro dinámico liviano (DPL) en el AA HH, ampliación primavera III del distrito de la Esperanza, de la provincia de Trujillo de la región de la Libertad”, el propósito fue llevar a cabo el proceso de analizar la capacidad la importancia del suelo mediante el uso del penetrómetro dinámico ligero (DPL) en el AA. HH. Para ello, se utilizó como metodología establecida en un diseño de tipo experimental teniendo el enfoque analítico y cuantitativo. Los resultados se obtuvieron de acuerdo con la Norma E 0. 50 sobre cimentaciones y los suelos. Siendo la unidad estudiada consistió en muestras del suelo, siendo cada una con un peso de diez kilogramos, extraídas de las calicatas realizadas. Siendo los suelos que se hallaron los que son predominantemente arenosos y presentan capacidades portantes los que oscilan entre 0.90 kg/cm^2 y el valor de 1.08 kg/cm^2 , lo que los clasifica como aptos para la realización de los fundamentos. En todo el espacio denominado como profundidad, se observa que la capacidad portante se considera mayor cuando se emplean cimentaciones cuadradas en comparación con las corridas.

El procedimiento para el análisis en función a la capacidad portante del tipo de suelo, se utilizó un exhaustivo mapeo de calicatas, seguido de la estratigrafía del suelo y ensayos de penetración utilizando el penetrómetro dinámico liviano (DPL). A partir de estos datos, se establecieron correlaciones entre los resultados obtenidos del DPL y el SPT.

Los resultados muestran que, debido a la naturaleza arenosa del terreno, la destreza de carga que se percibe que debe ser baja. Para que los cimientos sean corridos en un piso, se registraron valores de carga admisible que varían de 0.63 hasta 0.65 kg/cm^2 , teniendo un asentamiento el cual se calcula entre 0.398 cm y el valor de 0.421 cm . Para el levantamiento de la construcción el cual constan de dos pisos, la carga admisible aumentó

a un rango de 0.88 a 0.90 kg/cm², considerando un asentamiento estimado entre 0.506 cm y 0.592 cm.

En el caso de cimentaciones cuadradas, se logró tener una carga admisible de entre 0.64 y 0.69 kg/cm² para edificaciones de un piso, con un asentamiento calculado de 0.396 cm a 0.405 cm. Por otro lado, teniendo cimentaciones de dos pisos, los valores de carga admisible fluctuaron entre 0.91 y 0.95 kg/cm², presentando un asentamiento calculado entre 0.548 cm y el valor de 0.560 cm.

Fernández (2022), en la investigación “Zonificación de suelos para el diseño de cimentaciones superficiales en el espacio denominado Choc Choc, distrito de Moche, Trujillo, La Libertad”, cuyo propósito primordial de la investigación donde se realizó la zonificación de los suelos para diseñar las diversas cimentaciones que no sean superficiales dentro del espacio Choc Choc, ubicado en Moche, Trujillo, en la región La Libertad. Para ello, se empleó una metodología que incluyó diseño experimental y un enfoque cuantitativo, y se realizó en tres etapas, las cuales fueron: trabajo de campo, análisis de laboratorio y estudio de gabinete. Durante el trabajo de campo, se ejecutaron seis calicatas a cielo abierto y tres ensayos de auscultación dinámica ligera (DPL), siguiendo lo estipulado en la Norma E. 050 sobre suelos y cimentaciones, las cuales se organizaron de manera estratégica por todo el contexto estudiado.

En cuanto a la estratigrafía del suelo, se observó que la profundidad de la napa freática varía de acuerdo a los puntos denominados de exploración, oscilando entre 0.80 m y 2.50 m desde la superficie del terreno natural. También se determinó que el suelo presenta condiciones de humedad media a las profundidades analizadas. Según la clasificación SUCS, el denominado tipo de suelo se caracteriza por SP, y de acuerdo con AASHTO, tiene un índice de grupo 0. Esto indica que la calidad del suelo denominado

como fundación es entre habitual y buena, teniendo en cuenta el impacto de la napa freática.

Finalmente, los resultados obtenidos sobre la compacidad relativa, con ciertas profundidades denominados desplantes superiores a un 1.50 m, que muestran que el suelo de tipo granular que se refiere a las condiciones consideradas muy densas. Entre los valores que se obtuvieron en relación a los coeficientes de permeabilidad, los cuales cambian entre los valores de 0.160 cm/s y el 0,187 cm/s, indican que el suelo se caracteriza como un adecuado drenaje. En cuanto a los asentamientos mediatos los cuales son medidos mediante la teoría denominada de elasticidad y contrastados con aquellos valores los cuales son de distorsión angular que fueron determinados mediante la normatividad, lo cual se puede concluir que entre las distorsiones angulares observadas se encuentran dejando de los límites que son permisibles, sugiriendo que no se anticipan hacia lo que viene hacer daños estructurados en edificios clásicos.

En relación de los factores propios del suelo de fundación, los que se han tomado en cuenta factores como la afectación de la napa freática y lo que se conoce como profundidad del desplante recomendado el cual es 1.50 m. Para zapatas cuadradas de al menos 2.00 m, se determina que la alternativa adecuada para lograr la cimentación es establecer las zapatas cuadrada que tengan conexión mediante las vigas denominadas de cimentación, apoyados sobre una capa de materiales para que funcionen como un sistema denominado como subdrenaje. Además, el espesor de esta capa el cual será calculado a través de un estudio de esfuerzos adecuado.

Pérez (2021); en su tesis “Estudio sobre la correlación de resultados de los ensayos SPT, DPL; DPL y cono de arena en suelos arcillosos aplicado en las edificaciones de la urbanización Villa del Norte, Chiclayo, Lambayeque 2021”, el propósito de la investigación es relacionar los ensayos SPT y DPL, así como su relación con el grado de

compactación en suelos arcillosos. Para lo cual, se usó como método basado en el diseño experimental y un enfoque cuantitativo y analítico.

Se realizaron ensayos en 30 puntos, que incluyeron 5 ensayos SPT, 5 ensayos DPL, 10 ensayos DPL y 10 ensayos con Cono de Arena. Durante este proceso, se consideró la situación variable a nivel freático y el tipo de relleno presente en el medio.

Las correlaciones obtenidas revelaron que en relación al suelo CL, la relación que existe entre los ensayos SPT y el DPL se describe mediante la ecuación $N_{spt} = 0.4403 N_{dpl} + 11.995$, que cuenta con un coeficiente para la determinación del $R^2 = 0.8594$. Asimismo, la relación entre las pruebas DPL y el Cono de Arena, el cual se considera que $N_{dpl} = 0.4406 (\%Comp.) + 83.201$, que tiene como coeficiente para la determinación de $R^2 = 0.6907$.

Por lo tanto, se concluye que existen limitaciones en la aplicación de estos ensayos. En particular, si se realizan nuevas mediciones usando el penetrómetro dinámico ligero (DPL), es fundamental que se realicen en suelos arcillosos que contiene baja plasticidad que contengan una cierta cantidad de arena o que presenten características adecuadas, como una consistencia blanda y escasa presencia de bolonerías o fragmentos de roca.

Bazan y Prado (2020); en el estudio “Correlación entre el CBR y el PDC para la determinación de la resistencia del suelo en la ciudad de Moche”, cuyo propósito de la investigación fue la determinación de la asociación que existe entre las pruebas de CBR (California Bearing Ratio) y también PDC (Penetrómetro Dinámico de Cono). Para ello se utilizó como diseño el experimental, teniendo como enfoque analítico cuantitativo, Además se halló como resultados del proceso, que se logró obtener los datos gráficos de la curva de penetración en las muestras compactadas con 12, 25 y 56 golpes, distribuidas en cinco capas.

En particular, de acuerdo a lo graficado en función a la Densidad – CBR de la calicata N° 06 revelaron que el CBR el valor de 95% de su máxima densidad seca fue a los 19.26% existiendo una profundidad a nivel de penetración de 0.1 pulgadas, lo que se considera el más perjudicial. Además, el valor máximo de densidad seca se alcanzó a 1.729 g/cm³, mientras que la contención de la humedad óptima se estableció en 8.16%.

A partir de estos hallazgos, se concluye que es recomendable aplicar las ecuaciones derivadas como un cálculo CBR de diseño para la tipología de los suelos SP-SM (arena mal graduada mezclada con limo), con un rango de humidificación ponderable comprendido entre el 6% y 10%, siendo un número considerado de P. D. C. que oscila entre 2 y 47 mm por golpe. Asimismo, se considera importante el uso del Penetrómetro dinámico de cono (P. D. C.) debido a su ligereza, manejabilidad y facilidad de transporte, siendo por ello una herramienta que es eficaz y económico para explorar, valorar y realizar el estudio de suelos, incluso en lugares de difícil acceso. Además, su aplicación no es destructiva, lo que añade valor a su utilización en este tipo de estudios.

Riveros Lizana & Taipe Matamoros (2019), en la tesis "Análisis a nivel comparativo de parámetros geomecánicos mediante ensayos DPL y Triaxial en la tipología de suelos cohesivos en la universidad nacional de la ciudad de Huancavelica, 2018", el propósito de la investigación fue comparar de cuanto varían los parámetros de tipo geo mecánico entre las pruebas denominadas DPL y Triaxial en los suelos cohesivos los cuales están ubicados en la ciudad universitaria en la muestra en estudio. Para ello, se empleó un método de diseño experimental, además cuenta con el enfoque a nivel cuantitativo, permitiendo realizar un análisis detallado de lo hallado. Del conjunto de muestras que fueron 20 las cuales tuvieron parámetros más relevantes como son el ángulo de fricción (Φ) y la cohesión (c), donde se mostraron una asociación del 97% entre las pruebas Triaxial y DPL. Además, se obtuvieron coeficientes de correlación que indicaron una variación del 3% en

los ángulos de fricción y del 10% en la prueba de cohesión. El ensayo DPL se destacó como la opción más recomendable en términos de tiempo y costo. En conclusión, el coeficiente de variabilidad relacionados con el aspecto de cohesión y el ángulo de fricción también permiten determinar el índice de compresión y por otro lado el índice de plasticidad en estos suelos cohesivos.

Julca (2019), en su tesis “Análisis del proceso de confiabilidad del ensayo de viga Benkelman con la intención de establecer la condición estructural del pavimento de la Av. El Sol ubicado en el distrito de Ate, 2019”, cuyo propósito fue evaluar las condiciones estructurales existente en el piso pavimentado de la Avenida El Sol, ubicado en la localidad de Ate, empleándose como método el experimental y aplicativa. Para su realización se aplicó el método de la viga Benkelman para generar las deflexiones propias del suelo pavimentado, sometiendo a pruebas un camión de tipo C, conforme a lo establecido en el manual de dicho método. Las mediciones de deflexión se realizaron en función a los 100 metros, abarcando un nivel de 16 puntos de comprobación. El móvil utilizado debía tener un 8.2 toneladas de peso y en cuanto a las llantas debían estar infladas tomando en cuenta a 80 PSI de presión.

Una vez conseguidos los resultados en el espacio experimental, se procedió a interpretar los datos utilizando el denominado modelo Hogg, permitiendo determinar el módulo denominado de elasticidad y el CBR de la capa asfáltica. Esto también nos proporcionó información sobre el estado del pavimento flexible.

Los resultados del análisis estructural indican que el suelo pavimentado el que se presenta en condiciones imperfectas, con evidentes fallas a nivel estructural. En vista de esto, se recomienda llevar a cabo una reconstrucción total de la vía, con el fin de mejorar la infraestructura para la comunidad de la Avenida El Sol, en Ate.

Llanos Sanchez y Reyes Perez (2017), en su artículo de investigación “Estudio comparativo de las pruebas California Bearing Ratio (CBR) de laboratorio y de penetración dinámica de cono (PDC) en el contexto de PICSÍ”, en la investigación se tiene como finalidad determinar las valoraciones mediante las pruebas de California Bearing Ratio (CBR) en la utilización de la penetración dinámica de cono (PDC) y del laboratorio. Por cuya razón se utiliza como método el diseño a nivel experimental con un enfoque cuantitativo y analítico, logrando resultados a partir de la utilización de las ecuaciones de asociación para el CBR. La otra ecuación SM, identificada como (1) dentro de la tabla de percepciones, exhibiéndose un nivel de confiabilidad del 99%. Lo cual, en contraste, las ecuaciones aplicadas a la tipología de suelo fue CL y CL-ML presentan una confiabilidad del 97,65%, lo que implica un margen de error del 2,35% en el total de las muestras.

Asimismo, se constató que la utilización del Penetrómetro Dinámico del Cono (PDC) in situ resulta ser una alternativa más económica, con un costo que representa solo el 42% del ensayo CBR de laboratorio. Además, este método es más ágil, lo que facilita la obtención rápida de resultados. Por ello, se recomienda utilizar estas ecuaciones como estimaciones del CBR el que permite diseñar el suelo cuanto es de arena limosa (SM), la arcilla limo arenoso que tiene bajo nivel de plasticidad (CL-ML) y la arcilla arenosa de bajo nivel de plasticidad dentro de un rango de humedad de entre 3% y 20%, presentado además un rango de N PDC de 2 a 12 mm/golpe. Por último, la prueba mediante P.D.C. in situ, este permitió la obtención de los resultados del C.B.R. del laboratorio, del diseño a un nivel de confiabilidad el cual varía entre el 97,65% y el valor de 99,00%.

Mescoco y Reyes (2022); en su tesis “Comparación de la resistencia haciendo uso del PDC y CBR en suelos de subrasante ubicado en el circuito del Valle de Salcca de Cusco 2021”, el propósito primordial del estudio es generar una caracterización a nivel comparativo de la resistencia del tipo de suelo que se está utilizando, el California Bearing

Ratio (CBR) y el Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) para suelos de subrasante. Para lo cual, se utilizó el método de diseño experimental, además bajo el enfoque analítico y cuantitativo. Los resultados obtenidos indicaron que, en el suelo arcillo-arenoso el que presenta un bajo nivel de plasticidad (CL) el cual es la subrasante en el contexto del Valle de Salcca, el que está localizado en la zona de Combapata, localidad de Canchis de Cusco, la resistencia medida por PDC in situ fue del 18. 58%, mientras que el CBR de laboratorio presentó un valor de 14. 50% con un 100% de material drenado de compactación (M. D. C). Esta comparación revela una similitud del 95. 92% entre ambos métodos de evaluación.

La presente tesis se clasifica como un trabajo aplicado, para dicho estudio se asumió el enfoque cuantitativo, utilizando el diseño no experimental, asimismo a nivel transversal comparativo. Teniendo como población para estudiar el circuito del valle Salcca y se tiene como muestra desde el kilómetro 0+000 hasta el 4+000, con un enfoque en el CBR correspondiente al suelo de subrasante de esta área. Las mediciones con PDC se realizaron cada 200 metros, sumando un total de 21 ensayos, complementados por 4 calicatas para el análisis del CBR en prueba de laboratorio. Teniendo como unidad de análisis se define como el porcentaje de CBR.

A partir de realizar comparaciones entre el valor de CBR obtenidos en laboratorio y los del PDC en el contexto, se concluye que lo hallado en el campo superaron a los de laboratorio. Este hallazgo se atribuye a otros aspectos, siendo el nivel de compacidad, el porcentaje de fragmentos rocosos y el contenido de la humedad, especialmente, la tipología de suelos presente. En consecuencia, el valor de CBR utilizado para el diseño se considera más una referencia estadística que una medida exacta, derivada de una serie de ensayos sobre el suelo en cuestión.

3.2. Bases teóricas.

3.2.1 Subrasante

La superficie final de una vía, que ha sido trabajada mediante el corte y a nivel del relleno, está compuesta el tipo de suelos con propiedades admisibles, los cuales han sido afirmados en diversas capas para lograr un cuerpo sólido en óptimas condiciones. Esto garantiza que no impacte negativamente en los diseños derivadas del coeficiente medio diario anual (MTC, 2013).

- **Correlación de resultados (ensayo de CBR, DPL, viga Benkelman)**

Osorio & Casas (Colombia, Bogotá 2011); considera una asociación entre la prueba de P.D.C. y la otra C.B.R. haciendo uso de la ecuación:

$$y = 4,2553X \text{ con } R^2 = 0,4134$$

Siendo:

x = Número de los golpes P. D. C

Y = C. B. R. (%)

Esto comprende que no existe la homogeneidad de los aspectos que sean representativos. En otras palabras, se observan valores de CBR medidos en laboratorio que son considerablemente más altos en comparación con aquellos obtenidos a través de la correlación. Adicionalmente, se han establecido correlaciones entre la prueba PDL y del suelo la densidad relativa, utilizando a continuación la expresión:

$$ID = a_1 + a_2 \log N_{10}$$

Donde.

ID = Densidad denominado como relativa en decimal.

$a_1 + a_2$ = Coeficiente adimensional

N_{10} = Número de golpes del DPL 10cm de penetración

Atala (2011); en cual se asume como referencia la asociación entre los valores de PDL y SPT (Ensayo de Penetración Estándar) en él se tiene el siguiente valor $n_{10} = N_{60}$ de Germán Vivar (1993).

$$ID = 0.15 + 0.26 \log N_{10}$$

De acuerdo a Huanca & Núñez (2006), señala que “existen referencias de correlaciones entre el Índice de penetración (IP mm/golpe) y CBR, entre ella el cono de penetración dinámica (DCP)”, se utilizó un equipo que llevó a cabo diversos estudios para asociar el Índice de Plasticidad (IP) y el Índice de CBR, con el objetivo de valorar las características y propiedades de la estructura del pavimento, incluyendo la base, la subbase y la subrasante. A continuación, se presenta un resumen de los esfuerzos investigativos realizados para hallar asociaciones entre el CBR y el PDL.

Tabla 2

Tipo de suelo	Degradación	Intervalo de Ip (%)	Angulo de resistencia al corte
Arena de grano ligeramente fino, arenas, gravas	Ligeramente degradada($U < 6$)	15-35(suelto)	30
		35-65(densidad media)	32.5
		>65(denso)	35
Arenas, arenas gravas, grav	Muy degradada ($5 \leq U \leq 15$)	15-35(suelto)	30
		35-65(densidad media)	34
		>65(denso)	38

Valores que son deducidos para el ángulo de resistencia al corte ϕ'

Nota. Fuente: Atala (2011).

Kleyn (1975), teniendo en cuenta las pruebas DCP, que generan de manera directa las muestras que se tiene de aquellos materiales para el pavimento usando los moldes que son normales en CBR. Para todo ello se basó el resultado, mediante el valor obtenido en la asociación, el cual fue establecido así:

$$\log \text{CBR} = 2,62 - 1,27 \log I_p$$

Cuando transcurría el año 1983, donde se consideró como base la investigación de campo, de acuerdo a Pratt y Smith, quienes determinaron la asociación establecida así:

$$\log \text{CBR} = 2,56 - 1,15 \log I_p$$

En ese sentido, existe una diversidad de materiales cohesivos y granulares, de acuerdo al Cuerpo del Ejército Americano de los Ingenieros ellos hallaron la asociación siguiente:

$$\log \text{CBR} = 2,465 - 1,12 \log I_p$$

$$\text{CBR} = 296 / I_p^{1,12}$$

Considerando los valores obtenidos en investigaciones antiguas, se asume que existe asociaciones entre CBR y DCP considerando lo establecido se asume:

$$\log (\text{CBR}) = a + b \log (I_p)$$

Donde:

I_p = Valor del índice de penetración (mm/golpe).

a = Valor de la Constante varía de 2.44 a 2.60

b = Valor de la Constante varía de $-1,07$ a $-1,16$

Tabla 3

Ecuación de correlación	Muestra de ensayo	Referencia
$\log \text{CBR} = 2,56 - 1,16 \log I_p$	Suelo granular cohesivo	y Liveneh (1978)
$\log \text{CBR} = 2,55 - 1,14 \log I_p$	Suelo granular cohesivo	y Harison (1987)

$\text{Log CBR} = 2,45 - 1,12 \log \text{IP}$	Suelo granular cohesivo	y Livench (1992)
$\text{Log CBR} = 2,46 - 1,12 \log \text{IP}$	Varios tipos de suelo	Webster (1992)
$\text{Log CBR} = 2,62 - 1,27 \log \text{IP}$	Desconocido	Kleyn (1975)
$\text{Log CBR} = 2,44 - 1,07 \log \text{IP}$	Agregado en Base	Ese et. Al (1995)
$\text{Log CBR} = 2,60 - 1,07 \log \text{IP}$	Agregado cohesivo	NCDOT (1998)
$\text{Log CBR} = 2,53 - 1,14 \log \text{IP}$	Suelos residuales	Coonse (1999)

Correlación de DCP - CBR.

Nota: Fuente: Huanca C. y Núñez C. (2006)

➤ **Obtención del CBR de la subrasante**

Los valores obtenidos de las deflexiones propias del pavimento mediante el ensayo de la viga Benkelman permiten avanzar en la determinación del CBR de la subrasante. Esta determinación se basa en la relación establecida usando el módulo de elasticidad de la subrasante y su valor de CBR, de acuerdo con el método modificado de Hogg y el valor de la ecuación de Heukelom. La obtención del CBR utilizando el modelo matemático propuesto por Heukelom, junto con el modelo modificado de Hogg, se considera la metodológica precisa, adaptándose a los parámetros específicos que puedan desear emplear. No obstante, su aplicación manual puede resultar algo más compleja, a menos que se utilicen hojas de cálculo estimables o software que facilite procesar los datos. Posteriormente, se analizan las evidencias del CBR de la subrasante y se comparan con las valoraciones recomendadas en el "Manual de Carreteras - 2014" del MTC, lo que permite valorar como se encuentra el estado de la estructura del pavimento en cuestión. Apaza (Perú, Tacna 2019).

Cálculo de las deflexiones

Apaza (Perú, Tacna 2019); la deflexión debajo del eje de la carga (D_o), determinándose de la siguiente forma.

- Para el caso de una viga simple (un solo brazo)

$$D_o = RBx(L_o - L_R)$$

- Para el caso de una viga doble (doble brazo)

$$D_o = RB \times L_o$$

De acuerdo a la deflexión se considera que a 25 cm del eje de la carga (D_{25}), determinándose de la siguiente forma.

- Para el caso de una viga simple (un solo brazo)

$$D_{25} = RB \times (L_o - L_{25})$$

- Para el caso de una viga doble (doble brazo)

$$D_{25} = RB \times L_{25}$$

Cuyos resultados fueron:

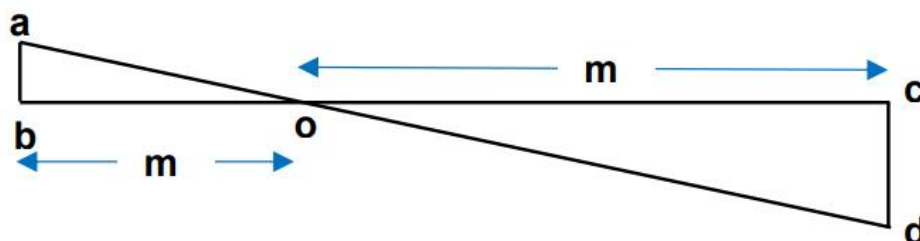
RB: Asociación de brazos de la viga Benkelman (1:2 o 1:4)

L_o : Lectura inicial máxima, que está considerado 0.01 mm.

L_{25} : Lectura a 25 cm del eje de la carga, considerado 0.01 mm.

L_R : Lectura a una distancia diversa, a: 30, 40 y 70 cm.

El factor de relación del brazo (RB) “2 o 4” este se obtuvo tomando en consideración la semejanza de los triángulos como se mencionan:



$$\frac{ab}{bo} = \frac{cd}{od}$$

Entonces:

$$\text{Deformación real}(D_o) = \frac{m_2}{m_1} \times L_o$$

$$\text{Deformación real}(D_{25}) = \frac{m_2}{m_1} \times L_{25}$$

➤ **Deflexión admisible (D_{adm})**

Apaza (Perú, Tacna 2019); es un valor tolerable (valor permisible o límite que puede admitir) que garantiza un comportamiento satisfactorio del pavimento en función al tráfico que va a soportar.

$$D_{adm} = \left(\frac{1.15}{N} \right)^{0.25}$$

Valores de:

Dadm: Valor de la deflexión admisible (milímetros mm).

N: ESAL(#de repeticiones de ejes equivalentes en millones).

De acuerdo al Instituto del Asfalto (Asphalt institute) se considera importante usar la siguiente expresión:

$$D_{adm} = 25.64N^{-0.2383}$$

➤ **Relación del módulo de elasticidad y el CBR**

Apaza (Perú, Tacna 2019); para establecer el nivel de capacidad que existe en el soporte (índice de resistencia) de la subrasante CBR “Ensayo de Relación de Soporte de California”, se aplica la asociación del módulo de la elasticidad “E0” (valores propios de la valoración de la estructura de la deflectometría, el CBR y el valor del modelo de Hogg) además (Heukelom, 1964), teniendo como ecuación lo considerado:

$$E_0 = (100 \text{ a } 160) \times \text{CBR}$$

$$E_0 = K \times \text{CBR}$$

De donde:

$$E_0: \text{Módulo de elasticidad de la subrasante} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right).$$

K: Factor de CBR. (Coeficiente número).

CBR: California Bearin Ratio (%).

El valor de asociación del módulo de la elasticidad y el valor de CBR que se basó en las investigaciones hechas por (Heukelom, 1964) para la obtención de un modelo

dinámico para tipo de suelos. Es necesario considerar la asociación existente, la cual es aceptada a nivel internacional, asimismo en Perú. Apaza (Perú, Tacna 2019).

➤ **Método elástico (modelo matemático de HOGG).**

Este procedimiento establece fundamentalmente el CBR de la Subrasante, que se refiere al espesor el cual es equivalentemente al material granular, la contribución estructural del piso pavimentado actual y el necesario, en relación con las condiciones de servicio en relación al Número Estructural AASHTO.

Para caracterizar el valor de CBR de la Subrasante, se empleó la siguiente relación:

$$\text{CBR} = \left(\frac{E_0}{130} \right)^{1.401}$$

Tabla 4

Parámetros del modelo de Hogg.

Parámetros Básicos del Modelo	$D = \frac{E_1 t^3}{12(1 - u_1^2)}$	(t – m)	Rigidez a la flexión de la placa.
	$l_0 \left(\frac{D(1 + u_0)(3 - 4u_0)^{\frac{1}{3}}}{2(1 - u_0)} \right) E\phi$	(cm)	Longitud característica.
	$E\phi$	$\left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$	Módulo de elasticidad de la subrasante.
	u_0	(Adimensional)	Módulo de Poisson de la Subrasante.
	H	(cm)	Profundidad del estrato rocoso.
Parámetros de Evaluación.	$l_0, E\phi, D$		Se obtiene conociendo dos valores de deflexiones medidas. Menor a 0.005 mm

Nota: Fuente: Interpretación de curvas de deflexiones – HOFFMAN.

- **Parámetros geomecánicos**

Los factores del suelo que participan en los cálculos geomecánicos son cruciales para establecer la capacidad de soporte, detallamos brevemente algunos de los ensayos de laboratorio más relevantes que se llevan a cabo en terrenos para obtener los parámetros geomecánicos. Los siguientes ensayos se han tomado en cuenta; ensayo granulométrico, establecimiento de los límites de Atterberg, establecimiento del peso específico de las partículas, identificación del contenido de carbonatos, materia orgánica y sulfatos, ensayo edométrico, ensayo de permeabilidad, ensayo de compresión simple, ensayo triaxial, ensayo de corte directo. Osorio, (2011).

- **Propiedades físicas**

- **Ensayo de granulometría**

Significa la asignación de los tamaños del agregado a través del tamizado, de acuerdo con las especificaciones técnicas (Ensayo MTC EM 107). A partir de esta se pueden calcular, con una aproximación más o menos precisa, las otras propiedades que podrían ser relevantes. El objetivo del análisis granulométrico de un terreno es establecer la proporción de sus distintos componentes, ordenados según su volumen. De acuerdo al tamaño de las partículas de suelo (MTC, 2013).

Tabla 5

Tipo de material		Tamaño de partículas
Grava		75 mm – 4.75 mm
Arena		Arena gruesa: 4.75 mm – 2.00 mm Arena media: 2.00 mm – 0.425 mm Arena fina: 0.425 mm – 0.075 mm
Material fino	Limo	0.075 mm – 0.005 mm

Clasificación de suelos según tamaños de partículas

Nota: Fuente: (MTC, 2013)

➤ Ensayo contenido de humedad %.

Es un método que se utiliza en la combinación de muestras de terreno con la humedad recolectada en el lugar, estas se secan y provocan un cambio significativo en sus características. El porcentaje de humedad de cada suelo se muestra en términos porcentuales, además, se establece el peso del agua expulsada al absorber la humedad del suelo hasta alcanzar un peso estable en un horno a 110 ± 5 °C (MTC, 2013).

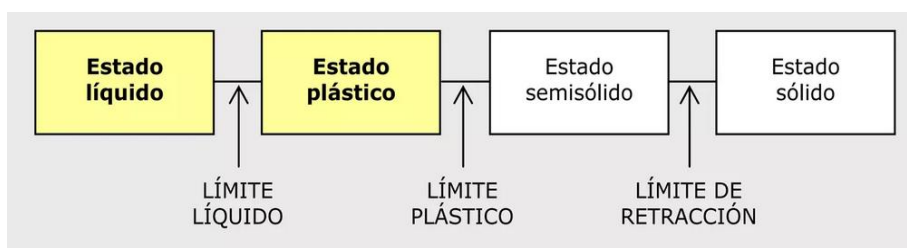
➤ Límites de atterberg:

- Bañón & Beviá (2000), consideran que el grado o nivel de plasticidad del tipo de suelo que debe contener un porcentaje en humedad, estos se asocian en función al peso seco de lo considerado como muestra.

- Montejo, (2002), la utilización del límite plástico y líquido, lo cual es primordial, debido a que contribuye en la deformación del suelo y la capacidad del portante.

Figura 1

Estados de consistencia de un suelo.



Nota: Fuente: Manual de carreteras (Bañón & Beviá, España, Alicante 2000)

➤ Límite líquido.

El método de ensayo está representado en términos porcentuales. Se emplea para medir las fracciones de los terrenos finos, se establecerá utilizando la copa de Casagrande, con el objetivo de determinar la humedad a través de los 25 golpes. (1 MTC, 2016).

(Hossne & Salazar, Venezuela, Monagas 2004), Menciona que es un contenido de agua, que se expresa en porcentajes en consideración al peso del suelo seco, limitando la transformación entre los estados líquidos y plásticos de un suelo amasado. Puede determinarse mediante el penetrómetro de cono o el aparato de Casagrande.

➤ Límite plástico.

El ensayo del límite plástico del suelo se refiere al contenido de humedad en el que el suelo comienza a mostrar signos de falla o quiebre, formando rollitos de aproximadamente 3 mm de diámetro. Ambos límites se llevan a cabo con el propósito de identificar y clasificar los suelos. En caso de que no sea posible realizar ambos ensayos, se

evaluará un indicador de plasticidad, el cual podría clasificarse como no plástico (MTC, 2016).

➤ **Propiedades mecánicas.**

Según Gutiérrez (2019), las propiedades mecánicas de un tipo de suelo incluyen la permeabilidad, la rigidez y la resistencia. Estas características están influenciadas principalmente por la forma como son los granos del suelo, el contenido del agua, la tensión actual y finalmente la unidad del peso. Para determinar las características mecánicas del tipo de suelo, se llevan a cabo una serie de ensayos específicos.

ASTM D1557-02 - Ensayo de Proctor Modificado.

ASTM D1883 – Pruebas de ensayo de California Bearing Ratio.

- El Proctor modificado, de acuerdo al método A, esto se considera que existe un nivel de análisis en la muestra del tipo de suelo arcilloso y además la combinación de mezclas con el propósito de analizar la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad. Estos parámetros son fundamentales para la elaboración de los especímenes para las pruebas CBR, los cuales serán saturados durante cuatro días antes de realizar el ensayo de penetración.

- Ensayos de California Bearing Ratio (CBR); MTC (2016), este ensayo se aplicó para valorar la resistencia de los materiales de base, subbase y subrasante. Se establecen las condiciones de humedad y densidad de los suelos, y se mide la penetración en pulgadas a 0.1 y 0.2, aplicando cargas de 100 y 1500 lb/pulg². Los resultados se analizan en un laboratorio, tomando como referencia la saturación del agua. Este proceso permite optimizar que contiene la humedad en el proceso de compactación, lo que a su vez facilita la tipología de cómo es el suelo.

- Ensayo PDL; Atala (2011); la prueba PDL, que determinan las siglas de Penetración Dinámica Ligera (además se conoce como DPL, traducido del inglés,

Dynamic Probing Light), el procedimiento que se considera en caracterizar en el tipo de suelo introduciendo una sonda de tipo metálico con forma cónica. Para ello, se dejó caer 10 kilogramos de peso desde una altura de 50 cm, lo que al medir la cantidad de golpes que sean precisos para que lo conocido por sonda y este se hunda en las capas de 10 cm. Se recomienda realizar entre 15 y 30 golpes por minuto, aunque en suelos de grano grueso y alta permeabilidad se pueden alcanzar hasta 60 golpes por minuto. Este método permite estimar el nivel de resistencia del tipo de suelo mediante el número o conjunto de golpes registrados.

La norma E. 0.50 reconoce el PDL como una estrategia de estudio de laboratorio para auscultar técnicamente. Recomienda su uso principalmente en suelos del tipo SP (arenas pobremente graduadas) y sugiere una utilización más reservada en el tipo de suelos SW (arenas bien graduadas) y SM (arenas usando componentes limosos). (Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento, 2006).

3.3. Definición de términos.

3.3.1 Índice de plasticidad:

Expresa el contenido de humedad en valores porcentuales en el que el suelo se encuentra en un estado plástico, utilizando el índice de plasticidad $LI-Lp$. Gonzales (Guatemala, 2014).

3.3.2 Contenido de humedad óptimo:

Es el contenido de agua en un suelo específico lo que nos permitirá alcanzar una densidad máxima al aplicar un proceso de energía para su adecuada compactación. Gutierrez Sauñe & Rojas Morales(2020).

3.3.3 Grado de compactación:

Es un nivel de proceso que permite generar las condiciones de humedad, donde la densificación del suelo está influenciada por la fuerza aplicada para disminuir los vacíos y alcanzar la densidad deseada. Gutierrez Sauñe & Rojas Morales(2020).

3.3.4 Succión en el suelo:

La succión total se considera como el número de energía relacionada con la capacidad del suelo para retener agua. Según Wray (1995), esta energía es la que se necesita para extraer una molécula de agua de la matriz del suelo a través del proceso de evaporación. Gutierrez Sauñe & Rojas Morales(2020).

3.3.5 Plasticidad:

La plasticidad del suelo desempeña un papel crucial en los fenómenos expansivos. Gutierrez Sauñe & Rojas Morales(2020).

3.3.6 Gravedad específica:

El parámetro del suelo conocido como densidad relativa se define como la relación entre la densidad del suelo y la densidad del agua. Este valor es útil para clasificar suelos de granulometría fina. Gonzales (2014).

3.3.7 Esfuerzos:

Un suelo sobre consolidado presenta una mayor expansividad en comparación con un suelo normalmente consolidado. Gutierrez Sauñe & Rojas Morales(2020).

3.3.8 Límite líquido:

Contenido de agua en el suelo entre los estados plástico y líquido. (MTC, 2018)

3.3.9 Límite plástico:

Contenido de agua de un suelo que se encuentra en el estado plástico y semisólido (MTC, 2018).

3.3.10 Compactación:

Un proceso manual o mecánico que busca disminuir el volumen total de vacíos en suelos, mezclas bituminosas, morteros y concretos frescos de cemento Portland (MTC, 2018).

3.3.11 Curva granulométrica:

La representación gráfica de la granulometría ofrece una visión clara y objetiva de la distribución de tamaños del suelo. Este gráfico se elabora colocando en el eje horizontal los logaritmos de las aberturas de los tamices, mientras que en el eje vertical se representan los porcentajes que corresponden a los materiales que han pasado por dichos tamices, así como sus complementos hasta 100, que son los retenidos acumulados (MTC, 2018).

3.3.12 Densidad:

La relación entre la masa y el volumen de un cuerpo es fundamental para entender su comportamiento. Según un estudio de MTC en 2018, las principales solicitaciones que enfrenta un pavimento derivan del tránsito y las condiciones climáticas. El tránsito se refiere a las cargas a las que el pavimento está expuesto, mientras que el clima actúa como un agente natural que influye en su estado. (Mendez & Amasifuen, 2020).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

- **Tipo**

Aplicativo: Es aplicativo porque permite manipular variables con el objetivo de determinar si su aporte es valioso tanto desde una perspectiva teórica como práctica. Paz, (2014, pág. 11). La presente tesis se basa en un enfoque experimental, ya que analizó la relación comparativa de los parámetros geomecánicos en la subrasante a través de ensayos como el CBR, PDL y la Viga Benkelman.

- **Nivel de investigación**

Explicativo; menciona Rodríguez Tucto, (2022); establece las causas y efectos en el marco de este estudio experimental, comparándolos con la información previamente citada en los antecedentes, con el fin de formular una propuesta hipotética.

- **Diseño de investigación**

El diseño de la investigación es de tipo Experimental puro con grupo de control con post test, que después de la manipulación al tratamiento se hizo la medición, en donde la manipulación se realizó sobre la variable independiente, provocando efectos, mientras que variable dependiente debe ser medida con algún instrumento para el control de validez de la situación experimental.

4.2 Ámbito temporal y espacial

- **Ámbito temporal**

El presente estudio de correlación de resistencia en la subrasante, utilizando equipos tanto empíricos como mecánicos, se llevó a cabo entre septiembre y octubre de 2023 a 2024.

- **Espacial**

Esta tesis se llevó a cabo en la residencial Posada del Sol, ubicada entre el kilómetro 0+000 y el 1+400, en el distrito de San Sebastián, Cusco, durante el periodo 2023-2024.

4.3.Población y muestra

- **Población**

La población seleccionada para este estudio experimental se basa en la validez del universo, tal como lo señala Borja (2011). En este caso, la población corresponde a la Residencial Posada del Sol, ubicada en el municipio distrital de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco. Se llevará a cabo una serie de ensayos, que incluyen el ensayo de CBR, PDL y la viga Benkelman, en las calles N° 01, 07, 09 y 11 de esta área.

- **Muestra**

Se trata de un subconjunto del universo destinado a llevar a cabo un estudio específico, basado en observaciones significativas, tal como menciona. Avila Baray, Hector Luis (2006), en este estudio, la muestra se considera por la subrasante de la población del proyecto. Se llevarán a cabo ensayos de Penetración Dinámica Ligera (PDL), Viga Benkelman in situ y California Bearing Ratio (CBR) en laboratorio. Además, se complementará la tesis que se caracteriza mecánica y física de las calles mediante distintos ensayos de prueba. Posterior a ello, los valores hallados del ensayo CBR, junto con los ensayos empíricos (PDL) y los mecánicos empíricos (Viga Benkelman) in situ, serán analizados utilizando métodos estadísticos.

4.4.Instrumentos

- **Instrumento de recolección de datos.**

Se emplearon formatos de diseño para la mecánica de suelos, donde se recopila información en fichas técnicas. Se registraron los resultados y se procesaron los datos utilizando programas como Microsoft Excel y Word, así como fotografías, para obtener una medición provisional de la información registrada. Este enfoque busca garantizar la calidad del desarrollo en el laboratorio, cumpliendo con las normativas de ASTM durante el proceso.

4.5.Procedimientos

Según Sampieri (2018), Es fundamental contar con instrumentos de medición para llevar a cabo un estudio en la muestra seleccionada. Asimismo, es importante registrar los resultados en los formatos establecidos por el laboratorio, de acuerdo con la normativa vigente, y teniendo en cuenta lo siguiente:

- Libreta de observación en campo: Se reunieron todos los datos de campo para su posterior procesamiento en gabinete.

- Equipos de laboratorio: Se proporcionarán resultados para el procesamiento de datos en los formatos establecidos para la recolección.

- Recolección de datos: Se considera prolectiva cuando los datos se recolectan de manera simultánea al desarrollo del experimento. Talavera (2011).

- Ficha técnica de ensayo del laboratorio.

- Cámara fotográfica.

- GPS.

- Wincha Métrica.

4.6.Análisis de datos

La información recopilada de los ensayos se procesó estadísticamente utilizando Excel, lo que permitió calcular porcentajes y comparar la muestra de valores con los resultados obtenidos en el laboratorio. Se aplicó la prueba t de Student, considerando tanto la hipótesis nula como la alternativa, dado que no se conoce si la relación entre las propiedades mecánicas de la subrasante y los ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman) tiene un efecto positivo o negativo.

4.7.Consideraciones éticas

Mi propuesta de investigación se fundamenta en el respeto y la autonomía de la información, siguiendo las pautas del reglamento ético de la 7ª edición de la norma APA.

Este enfoque nos permitirá evitar el plagio de diferentes autores y, al mismo tiempo, honrar las opiniones científicas relacionadas con el tema de estudio.

V. Resultados y Discusión

5.1.Resultados

Antes de determinar las características físicas de la subrasante, se llevaron a cabo diversos ensayos, incluyendo la granulometría, el contenido de humedad, el límite de Atterberg y la clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema AASHTO.

Además, se realizaron ensayos de campo que se diferencian notablemente entre sí. Estos incluyeron la aplicación del penetrómetro dinámico ligero, el uso de la viga Benkelman y la extracción de muestras inalteradas para su posterior análisis en laboratorio.

- **Ensayos y resultados de límites de consistencia.**

- **Límite líquido:**

Se llevó a cabo la determinación del límite líquido de acuerdo con el procedimiento establecido en la Prueba D-4318 de la ASTM. Este análisis se realizó en las cuatro calicatas (Calicata N° 01, Calicata N° 02, Calicata N° 03 y Calicata N° 04), utilizando las muestras correspondientes. Los resultados obtenidos para cada calicata se presentan en la tabla 6 (ver anexo 3, Resultados de laboratorio de suelos de Límite Líquido). Este mismo procedimiento se aplicó a todas las calicatas, y los resultados se encuentran detallados en la tabla a continuación.

Tabla 6

Resultados de límite líquido de las calicatas en estudio.

Muestra.	Ubicación.	Límite Líquido (%).
CALICATA N° 01	Calle N° 01	35.73
CALICATA N° 02	Calle N° 07	38.69
CALICATA N° 03	Calle N° 08	43.26
CALICATA N° 04	Calle N° 11	38.32

Fuente: Elaboración Propia. (con los resultados de laboratorio de mecánica de suelos de la empresa INGELAB E.I.R.L)

➤ **Límite plástico:**

Siguiendo el procedimiento establecido en la Prueba D-4318 de la ASTM para la determinación del límite plástico, se han llevado a cabo pruebas en las cuatro calicatas (Calicata N° 01, Calicata N° 02, Calicata N° 03 y Calicata N° 04) utilizando las respectivas muestras. Los resultados obtenidos para cada calicata se presentan en la Tabla 07 (ver Anexo 3: Resultados de laboratorio de suelos de Límite Plástico).

Tabla 7

Resultados de límite plástico de las calicatas en estudio.

Muestra.	Ubicación.	Límite Plástico (%).
CALICATA N° 01	Calle N° 01	19.16
CALICATA N° 02	Calle N° 07	19.78
CALICATA N° 03	Calle N° 08	20.93
CALICATA N° 04	Calle N° 11	18.48

Nota: Fuente: Elaboración Propia. (con los resultados de laboratorio de mecánica de suelos de la empresa INGELAB E.I.R.L)

En las calicatas realizadas se determina un límite plástico que muestra una variación en la plasticidad del sitio de muestreo, con valores que oscilan entre el 18% y el 21%.

Una vez determinados los límites líquidos y plásticos, se pueden calcular los índices de plasticidad ($I_p = LL - LP$), que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8

Resultados de Índice de Plasticidad de las calicatas en estudio.

Muestra.	Ubicación.	Índice de Plasticidad (%).
01 CALICATA N°	Calle N° 01	16.57
02 CALICATA N°	Calle N° 07	18.90
CALICATA N°	Calle N° 08	22.32

03

CALICATA N°

Calle N° 11

18.48

04

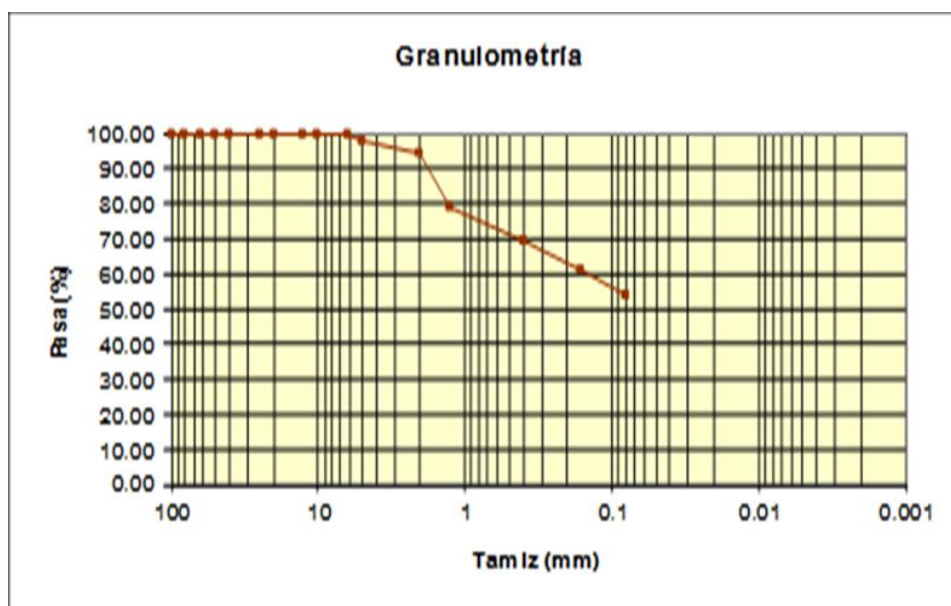
Nota: Fuente: Elaboración Propia. (con los resultados de laboratorio de mecánica de suelos de la empresa INGELAB E.I.R.L).

- **Ensayos y resultados de granulometría.**

Este procedimiento operativo detalla el método utilizado para determinar los porcentajes de material que atraviesan los diferentes tamices de la serie empleados en el ensayo, hasta el tamiz de 74 mm (N° 200), conforme a lo establecido en las Normas AAHSTO T88 y ASTM D422. En la calicata N° 01, se llevó a cabo el tamizado registrando los pesos retenidos en cada malla para una muestra de 325. 45 gr., lo que permitió obtener la siguiente curva granulométrica:

Figura 2

Curva granulométrica de la calicata N° 01.



Nota: Elaboración propia (con resultados de la granulometría de la calicata N° 01, obtenidos del laboratorio de mecánica de suelos INGELAB E.I.R.L)

Según la curva granulométrica de la calicata, se puede notar un notable incremento a partir del tamiz N° 40, lo que indica una significativa presencia de limos y arcillas. Esta

observación se respalda con los resultados obtenidos: Arena: 5. 52% y Arcillas y Limos: 94. 48%.

Se llevó a cabo un proceso de mallado similar en las calicatas siguientes, obteniendo sus respectivas curvas granulométricas con resultados expresados en porcentajes de arena, grava, arcilla y limo, tal como se detalla en la tabla 9 (ver anexo 3, Resultados de laboratorio de suelos de Granulometría).

Tabla 9

Resultados de granulometría de las 4 calicatas en estudio.

Muestra.	Ubicación.	Grava (%)	Arena %	Arcilla y limo %
CALICATA N° 01	Calle N° 01	0.00	5.52	94.48
CALICATA N° 02	Calle N° 07	0.00	5.51	94.49
CALICATA N° 03	Calle N° 08	0.00	7.88	92.12
CALICATA N° 04	Calle N° 11	0.00	7.68	92.32

Nota: Fuente: Elaboración Propia. (con los resultados de la granulometría de las 04 calicatas, obtenidos del laboratorio de mecánica de suelos INGELAB E.I.R.L)

En todas las calicatas se ha registrado un contenido de arcilla y limo superior al 50%, lo que sugiere que se trata de suelos finos con escasa presencia de grava. A través de los análisis realizados, que incluyen la evaluación de humedad, límites líquido y plástico, así como la granulometría, se puede clasificar el tipo de suelo según el sistema SUCS, el cual se aplica en este estudio de investigación. A continuación, se presenta la columna estratigráfica de las calicatas junto con las muestras correspondientes según la profundidad.

Tabla 10

Descripción del Material	Profundidad (m)		Muestra	Observación
	Desde	Hasta		
Limo arcilloso color café.	0.00	0.35		Humedad media – presencia de partículas orgánicas.
Arcilla limo arenoso café blanquecino.	0.35	0.70	1	Humedad media – presencia de vetas de oxidación.
Arcilla limo arenoso café blanquecino.	0.70	1.05	2	Humedad media – presencia de vetas de oxidación.
Arcilla limo arenoso café blanquecino de plasticidad media.	1.05	1.40	3	No existe presencia de nivel freático se toma CBR.

Perfil estratigráfico del suelo.

Nota: Fuente: Elaboración Propia. (con los resultados de los estratos de cada calicata según su profundidad, obtenidos del laboratorio de mecánica de suelos INGELAB E.I.R.L.)

A través del perfil estratigráfico, se puede determinar la profundidad a la cual se midió el CBR en campo. De este modo, se presenta un perfil para cada calicata. (Consulte el anexo 2 para los resultados de laboratorio de suelos correspondientes a las columnas estratigráficas de las calicatas).

- **Resultados de clasificación de suelos.**

Tomando como base los sistemas de clasificación de suelos más utilizados en la ingeniería, se puede afirmar que:

- **Sistema unificado de clasificación del suelo (SUCS o USCS)**, que se emplea en casi todos los proyectos de ingeniería geotécnica.

- **Sistema de clasificación AASHTO**, que se utiliza en la construcción de carreteras y terraplenes.

Ambos sistemas emplean los resultados del análisis granulométrico, así como la determinación de los límites de Atterberg, para clasificar el suelo de manera efectiva.

El material de subrasante analizado en las calles N. ° 01 y N. ° 07 consiste en un suelo de arcillas inorgánicas de baja plasticidad, caracterizado como arcillas areno-limosas. Según la clasificación AASHTO, se clasifica como A-6, mientras que en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se categoriza como CL.

El material de subrasante analizado en la calle N° 08 corresponde a un suelo de arenas arcillosas, que consiste en una combinación de arena y arcilla. Se trata de un suelo con partículas gruesas y finas, calificado como "suelo sucio". Según la clasificación AASHTO, se clasifica como A-7-6, y de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se identifica como SC.

El material de subrasante analizado en la calle N° 11 está compuesto por arenas arcillosas, lo que implica una mezcla de arena y arcilla. Se trata de un suelo de partículas gruesas que contiene finos, conocido como suelo sucio, y está clasificado como A-6 según el sistema AAHSTO, además de ser categorizado como SC dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El tipo de suelo, conforme a los datos obtenidos según la clasificación SUCS/AAHSTO, se presenta en la tabla a continuación:

Tabla 11

Clasificación de suelos según SUCS/ AAHSTO

Muestra	Ubicación	Clasificación SUCS/AAHSTO	Descripción del Suelo
Calicata N° 01	Calle N° 01	Arcilla media plasticidad arenosa CL / A- 6 Suelo arcilloso	Arcillas inorgánicas de baja plasticidad, arcillas areno limosas.
Calicata N° 02	Calle N° 07	Arcilla media plasticidad arenosa CL / A- 6 Suelo arcilloso	Arcillas inorgánicas de baja plasticidad, arcillas areno limosas.
Calicata N° 03	Calle N° 08	Arena arcillosa SC / A-7-6	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla, suelo de

		Suelo arcilloso.	partículas gruesas con finos (suelo sucio).
Calicata N° 04	Calle N° 11	Arena arcillosa SC / A-6 Suelo arcilloso.	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla, suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio).

Nota: Fuente: Elaboración Propia. (resultados de clasificación de suelos de las 04 calicatas del laboratorio de mecánica de suelos INGELAB E.I.R.L. Ver Anexo 03)

- **Ensayos y resultados (CBR) con muestras inalteradas.**

El número CBR, o simplemente CBR, se determina a partir de la relación entre la carga unitaria (lb/in²) necesaria para alcanzar una cierta profundidad de penetración del pistón (19.4 cm²) en una muestra compactada de suelo, considerando un contenido de humedad y densidad específicos. Esta carga se compara con la carga unitaria de referencia (lb/in²) que se requiere para lograr la misma profundidad en una muestra estándar de material triturado (Chang, 2016). El CBR es un indicador valioso para evaluar la calidad del terreno como subrasante, subbase y base en proyectos de pavimentación (2016). El ensayo de CBR en laboratorio se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM D 1883, mientras que para las pruebas in situ se aplicó la norma ASTM D 4429-93.

Este ensayo se llevó a cabo utilizando muestras inalteradas, obtenidas de cada una de las calicatas a profundidades que oscilan entre -0.50 y -1.40 m. En el caso de la calicata N° 01, comenzamos por limpiar ambas caras del molde de CBR. Durante el proceso de enrasado, se recogieron dos muestras de suelo de cada cara para determinar el contenido de humedad de la muestra inalterada en su estado natural.

Tabla 12

Resultados de contenido de humedad de la calicata en estudio.

Datos de contenido de Humedad	1	3	5	7	9	11
Peso del Tarro (gr)	48.00	47.90	46.90	46.85	47.70	47.75
so del Tarro + Suelo	162.95	161.85	175.25	175.90	150.37	150.30
Húmedo (gr)						
Peso del Tarro + Suelo	140.03	139.95	149.03	148.95	129.30	129.35

Seco (gr)						
Peso del Agua(gr)	22.92	21.90	26.22	26.95	21.07	20.95
Peso del Suelo Seco (gr)	92.03	92.05	102.13	102.10	81.60	81.60
Contenido de Humedad (%)	24.9	23.8	25.7	26.4	25.8	25.7
Contenido de Humedad Promedio (%)	24.3 %		26.0 %		25.7%	

Nota: Fuente: Elaboración Propia. (con resultados del contenido de humedad de la calicata N° 01, del laboratorio de mecánica de suelos para el CBR en muestras inalteradas, empresa INGELAB E.I.R.L). Ver Anexo 03.

Tabla 13

Resultado de Ensayo de Penetración de la calicata N° 01, en estado natural.

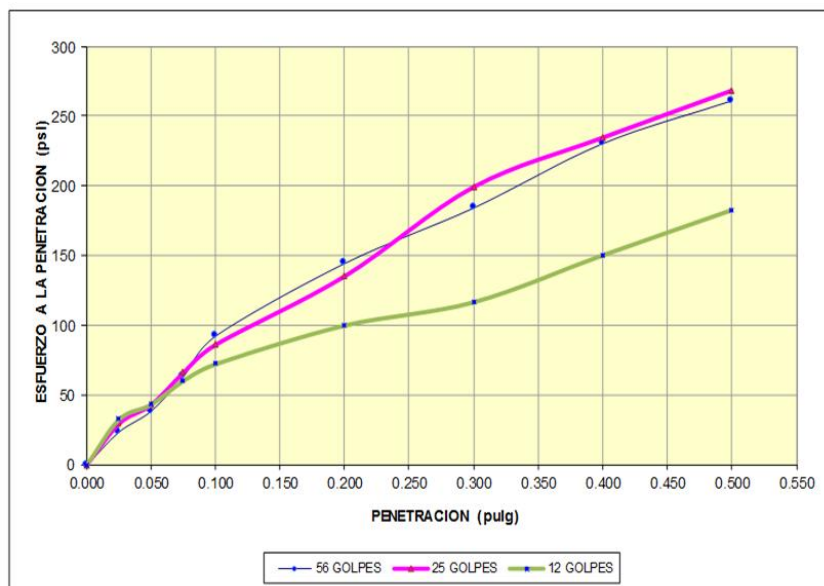
Tiempo	Penetración		Molde 1 (56 golpes)			Molde 2 (25golpes)			Molde 3 (12 golpes)		
	(mm)	(pulg)	Dial	Carga (Lb)	Esfuer PSI	Dial	Carga (Lb)	Esfuer PSI	Dial	Carga (Lb)	Esfuer PSI
0.5 min	0.64	0.025	10	71	24	14	89	30	16	98	33
1.0 min	1.27	0.050	20	116	39	23	130	43	23	130	43
1.5 min	1.91	0.075	36	190	63	38	199	66	34	181	60
2.0 min	2.54	0.100	55	277	92	51	259	86	42	217	72
4.0 min	5.08	0.200	89	433	144	83	406	135	60	300	100
6.0 min	7.62	0.300	115	552	184	125	598	199	71	350	117
8.0 min	10.16	0.400	145	690	230	148	704	235	93	451	150
10.0 min	12.70	0.500	165	782	261	170	805	268	114	548	183

Nota: Fuente: Elaboración Propia. (con datos obtenidos del laboratorio de mecánica de suelos para el CBR en muestras inalteradas, empresa INGELAB E.I.R.L). Ver Anexo 03.

Una vez que se recopilaron los datos correspondientes a la muestra en su estado natural, se procedió a realizar la prueba de penetración. A continuación, se presentan las curvas de penetración en función de la carga para las muestras inalteradas en su estado natural.

Figura 3

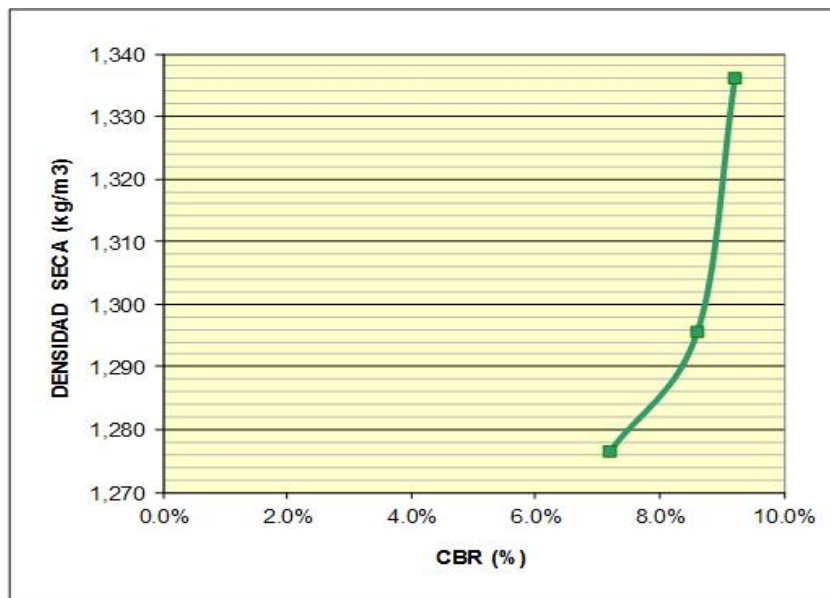
Penetraciones Vs Carga/ Esfuerzo, en estado natural calicata N° 01.



Nota: Se observa la penetración Vs esfuerzo a la penetración de la calicata N° 01, obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos empresa INGELAB E.I.R.L.
Fuente: Laboratorio de mecánica de suelos INGELAB E.I.R.L.

Figura 4

Densidad Seca Vs CBR al 95% MDS, en estado natural calicata N° 01.



Nota: Se observa la densidad seca Vs CBR natural al 95% de la MDS de la calicata N° 01, obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos empresa INGELAB E.I.R.L.

Fuente: Laboratorio de mecánica de suelos INGELAB E.I.R.L.

Para las calicatas subsiguientes, se siguieron los mismos procedimientos que se aplicaron en la calicata N° 01. Los resultados se resumen en la Tabla 14: (ver Anexo 03, Resultados de Laboratorio de Suelos CBR en muestras inalteradas).

Tabla 14

Calicata N°	Ensayo	Humedad Optima (%)	Max. Densidad Seca (kg/m ³)	Expansión (%)	CBR al 95% de MDS (%)	CBR al 100% de MDS (%)
01	Estado Natural	23.4	1,330	0.04	7.1	9.2
02	Estado Natural	22.4	1,315	0.04	7.3	9.9
03	Estado Natural	22.5	1,325	0.04	7.5	10.3
04	Estado Natural	23.0	1,335	0.04	7.8	11.1

CBR en muestras inalteradas en estado natural.

Nota: La relación de soporte reportada para el suelo es normalmente del 0.1” según los parámetros de la norma AAHSTO Y SUCS.

Fuente: Elaboración Propia. (con resultados de CBR (%) para cada calicata del laboratorio de mecánica de suelos de la INGELAB E.I.R.L). Ver Anexo 03.

- **Ensayo y resultados del método empírico (PDL).**

Se llevó a cabo el ensayo PDL de acuerdo con la norma ASTM – D 6951 -03. Este procedimiento involucra la inserción de una varilla de acero de penetración, cuyo diámetro es de 16 mm. En su extremo inferior, la varilla cuenta con un cono de acero temperado de 60 grados y 20 mm de diámetro. La varilla se introduce en el suelo mediante un martillo deslizante de 8 kg-f, que se deja caer desde una altura de 575 mm. Para facilitar la toma de lecturas, se utiliza una regla de medición, la cual está fijada al dispositivo mediante dos soportes: un soporte superior, que se conecta al yunque y sirve como referencia para las mediciones, y un soporte inferior, que está anclado a la regla y se une a la barra de penetración. El ensayo PDL evalúa la penetración dinámica mediante golpes, ya sea en el

terreno natural, en el suelo de fundación o en suelos ligeramente cementados. (K.S. Gill et al., 2010).

-Resultados del (PDL).

Los resultados de la prueba PDL se expresan en índices de penetración de cono dinámico, que se define como el desplazamiento vertical hacia abajo del PDL, generado por la fuerza del martillo deslizante en su caída (mm/golpe).

Los resultados del ensayo se recopilan in situ y se presentan en las Tablas 15, 16, 17 y 18, que incluyen el Cuadro de Datos y el Cálculo del PDL (mm/golpe) y del CBR (%) Natural.

Estos datos, que incluyen el número de golpes y la profundidad de penetración, se obtienen durante la realización del ensayo in situ.

Tabla 15

Datos y cálculo del PDL y CBR natural en la calle N° 01

Nro. de Golpes A	Nro. de golpes acumulados	Penetración acumulada (mm) B	Penetración entre lecturas (mm) C	Penetración por golpe (mm) D	Factor del martillo (mm) E	Índice PDL (mm/golpe) F	CBR (%)
2	2	100	100	50.00	1	50.00	7.1
4	6	200	00	25.00	1	25.00	7.5
4	10	300	100	25.00	1	25.00	7.5
5	15	400	00	20.00	1	20.00	7.8
4	19	500	00	25.00	1	25.00	7.5
5	24	600	00	20.00	1	20.00	7.8
4	28	700	100	25.00	1	25.00	7.5
5	33	800	100	20.00	1	20.00	7.8
4	37	900	100	25.00	1	25.00	7.5
5	42	1000	100	20.00	1	20.00	7.8
5	47	1100	100	20.00	1	20.00	7.8
4	51	1200	100	25.00	1	25.00	7.1
5	56	1300	100	20.00	1	20.00	7.8

Fuente: Norma I.N.V.E. -172-07.

Nota: Se observa los datos obtenidos en campo y el cálculo del índice de penetración (índice PDL (mm/golpe)) y el CBR (%) para la calicata N° 01, calle N° 01 obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos de la empresa INGELAB E.I.R.L

Tabla 16

Datos y cálculo del PDL y CBR natural en la calle N° 07

Nro. de Golpes A	Nro. de golpes acumulados B	Penetración acumulada (mm) B	Penetración entre lecturas (mm) C	Penetración por golpe (mm) D	Factor del martillo (mm) E	Índice PDL (mm/golpe) F	CBR (%) G
3	3	100	100	33.33	1	33.33	7.3
3	6	200	100	33.33	1	33.33	7.3
4	10	300	100	25.00	1	25.00	7.5
4	14	400	100	25.00	1	25.00	7.5
5	19	500	100	20.00	1	20.00	7.8
4	23	600	100	25.00	1	25.00	7.5
5	28	700	100	20.00	1	20.00	7.8
4	32	800	100	25.00	1	25.00	7.5
5	37	900	100	20.00	1	20.00	7.8
4	41	1000	100	25.00	1	25.00	7.5
5	46	1100	100	20.00	1	20.00	7.8
5	51	1200	100	20.00	1	20.00	7.8

Fuente: Norma I.N.V.E. -172-07.

Nota: Se observa los datos obtenidos en campo y el cálculo del índice de penetración (índice PDL (mm/golpe)) y el CBR (%) para la calicata N° 02, calle N° 07 obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos de la empresa INGELAB E.I.R.L

Tabla 17

Datos y cálculo del PDL y CBR natural en la calle N° 08

Nro. de Golpes A	Nro. de golpes acumulados B	Penetración acumulada (mm) B	Penetración entre lecturas (mm) C	Penetración por golpe (mm) D	Factor del martillo (mm) E	Índice PDL (mm/golpe) F	CBR (%) G
4	4	100	100	25.00	1	25.00	7.5
3	7	200	100	33.33	1	33.33	7.3
4	11	300	100	25.00	1	25.00	7.5
3	14	400	100	33.33	1	33.33	7.3

4	18	500	100	25.00	1	25.00	7.5
5	23	600	100	20.00	1	20.00	7.8
4	27	700	100	25.00	1	25.00	7.5
5	32	800	100	20.00	1	20.00	7.8
4	36	900	100	25.00	1	25.00	7.5
5	41	1000	100	20.00	1	20.00	7.8
5	46	1100	100	20.00	1	20.00	7.8
4	50	1200	100	25.00	1	25.00	7.5

Fuente: Norma I.N.V.E. -172-07.

Nota: Se observa los datos obtenidos en campo y el cálculo del índice de penetración (índice PDL (mm/golpe)) y el CBR (%) para la calicata N° 03, calle N° 08 obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos de la empresa INGELAB E.I.R.L

Tabla 18

Datos y cálculo del PDL y CBR natural en la calle N° 11

Nro. de Golpes A	Nro. de golpes acumulados	Penetración acumulada (mm) B	Penetración entre lecturas (mm) C	Penetración por golpe (mm) D	Factor del martillo (mm) E	Índice PDL (mm/golpe) F	CBR (%) G
4	4	100	100	25.00	1	25.00	7.5
3	7	200	100	33.33	1	33.33	7.3
4	11	300	100	25.00	1	25.00	7.5
3	14	400	100	33.33	1	33.33	7.3
4	18	500	100	25.00	1	25.00	7.5
3	21	600	100	33.33	1	33.33	7.3
4	25	700	100	25.00	1	25.00	7.5
5	30	800	100	20.00	1	20.00	7.8
4	34	900	100	25.00	1	25.00	7.5
5	39	1000	100	20.00	1	20.00	7.8
4	43	1100	100	25.00	1	25.00	7.5
5	48	1200	100	20.00	1	20.00	7.8

Fuente: Norma I.N.V.E. -172-07.

Nota: Se observa los datos obtenidos en campo y el cálculo del índice de penetración (índice PDL (mm/golpe)) y el CBR (%) para la calicata N° 04, calle N° 11 obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos de la empresa INGELAB E.I.R.L

Donde:

A= Número de golpes de 1 martillo entre lecturas.

B= Penetración acumulada luego de cada serie de golpes.

C= Diferencia de penetración acumulada (Nota B) entre lecturas.

D= Nota C/Nota A.

E= Colocar “1” si el martillo es de 8kg.

F= Nota D X Nota E.

G= Correlación entre CBR y el Índice PDL.

H= Porcentaje de Agua (cuando se dispone del dato).

Como se puede apreciar en las tablas anteriores (Tablas 15, 16, 17 y 18), se obtiene el índice de PDL, que coincide con el valor de la penetración por golpe. Por lo tanto, se procederá a calcular el índice de PDL para todas las calicatas. Para obtener más detalles, consulte el Anexo 05.

De acuerdo con la clasificación del suelo proporcionada en el laboratorio, se llevará a cabo el cálculo del CBR conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM D 6951 – 03, así como en la norma I. N. V. E – 172-07.

El CBR estimado se calculó utilizando el índice PDL junto con la penetración por golpe, un factor que guarda relación con la profundidad. Esta penetración por golpe se utiliza para estimar el CBR in situ o la resistencia al corte, aplicando una correlación adecuada.

Además, se utiliza la ecuación que relaciona el CBR con el PDL, según lo indicado por Lacera T. en 2006, la cual se presenta en la ecuación (01).

$$\text{Log}(\text{CBR}) = a - b(\text{Log}(\text{PDL})) \quad \text{Ec.(01)}$$

Se verificaron los parámetros a y b de la ecuación lineal obtenida a través de la regresión por mínimos cuadrados. En este proceso, se definieron los parámetros

como $a = a_0$ y $b = a_1$, los cuales fueron calculados utilizando las denominadas ecuaciones normales.

Estos parámetros se resuelven de manera simultánea, tal como se establece en las ecuaciones (02) y (03) (Chapra y Canale, 2007).

$$a_1 = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad \text{Ec.(02)}$$

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \bar{X} \quad \text{Ec..... (03)}$$

En la columna 8 se presenta el valor cuadrado de Y_i . mientras que la columna 7 exhibe el valor cuadrado de X_i . Por su parte, la columna 9 muestra el producto de $(Y_i)(X_i)$. Finalmente, en la columna 10 se realiza el cálculo del S_t , que representa la suma total de los cuadrados de las diferencias entre los datos y la media de los valores del CBR natural, según la ecuación (04).

$$S_t = (Y_i - \bar{Y})^2; S_t = \left(Y_i - \frac{\sum Y_i}{n}\right)^2; \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n} = \bar{Y} = Y_p \quad \text{Ec.(04)}$$

Se estableció el valor de S_r , que representa la suma de los residuos, calculándose a través de la ecuación (05).

$$S_r = (Y_i - a_0) - ((a_1)X_i))^2 \quad \text{Ec. (05)}$$

Asimismo, se calculó el coeficiente de correlación (r^2) definido en la ecuación (06) y el coeficiente de determinación (r) especificado en la ecuación (07).

$$r^2 = \frac{\sum (S_t - S_r)}{\sum S_t} \quad \text{Ec. (06)}$$

$$r = \sqrt{r^2} \quad \text{Ec. (07)}$$

Se determinó la desviación estándar total, S_y , según la ecuación (08), así como el error estándar del estimador, $S_{y/x}$, establecido en la ecuación (09).

$$S_y = \left(\sum S_t / (n - 1) \right)^{0.5} \quad \text{Ec.(08)}$$

$$S_{\frac{y}{x}} = (S_r / (n - 2))^{0.5} \quad \text{Ec.(09)}$$

En la tabla 19 se presentan los datos y los números de columna asignados para facilitar el seguimiento del proceso de cálculo de la correlación entre los datos de CBR y PDL.

Tabla 19

Datos y correlación definitiva de las calicatas en estudio.

Nº	Log (PDL) Xi	Log (CBR) Natural Yi	INDICE PDL (mm/golpe)	CBR (%)	Xi^2	Yi^2	Xi*Yi	St	Sr
1	.5229	0.8633	1.5229	0.8633	2.3192	0.7453	1.3147	0.000	0.000
2	.5229	0.8633	1.5229	0.8633	2.3192	0.7453	1.3147	0.000	0.000
3	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
4	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
5	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
6	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
7	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
8	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
9	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
10	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
11	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
12	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
13	.6990	0.8513	1.6990	0.8513	2.8865	0.7246	1.4463	0.001	0.000
14	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
15	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
16	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
17	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
18	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
19	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
20	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
21	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
22	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000

23	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
24	.6990	0.8513	1.6990	0.8513	2.8865	0.7246	1.4463	0.001	0.000
25	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
26	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
27	.5229	0.8633	1.5229	0.8633	2.3192	0.7453	1.3147	0.000	0.000
28	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
29	.5229	0.8633	1.5229	0.8633	2.3192	0.7453	1.3147	0.000	0.000
30	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
31	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
32	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
33	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
34	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
35	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
36	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
37	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
38	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
39	.5229	0.8633	1.5229	0.8633	2.3192	0.7453	1.3147	0.000	0.000
40	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
41	.5229	0.8633	1.5229	0.8633	2.3192	0.7453	1.3147	0.000	0.000
42	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
43	.5229	0.8633	1.5229	0.8633	2.3192	0.7453	1.3147	0.000	0.000
44	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
45	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
46	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
47	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
48	.3979	0.8751	1.3979	0.8751	1.9542	0.7657	1.2233	0.000	0.000
49	.3010	0.8921	1.3010	0.8921	1.6927	0.7958	1.1606	0.000	0.000
Σ			68.231	43.055	95.469	37.838	59.899	0.007	0.000

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa los datos y el proceso para el cálculo de la correlación definitiva, del CBR (%) en función del PDL, de las calicatas N° 01, 07, 08 y 11.

Al calcular el promedio de las columnas X_i y Y_i en la tabla N° 18, se obtuvieron los siguientes resultados: $X_p = 1.3924757$ y $Y_p = 0.878669946$.

En términos generales, la valoración estadística buscó identificar una línea media que resuma la relación entre la variable Y y las variables X. Su objetivo práctico es doble: por un lado, proporcionar una explicación o descripción causal de la variable dependiente, y por otro, prever los valores futuros de Y en función de valores específicos de X. (Martínez, 2005).

$$Y = bX + a \quad \text{Ec. 10}$$

Determinamos los parámetros $a = a_0$ y $b = a_1$, utilizando las Ecuaciones 02 y 03, basándonos en los resultados presentados en la Tabla 19.

$$a_1 = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad \text{Ec. (02)}$$

$$a_1 = -0.116$$

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \bar{X} \quad \text{Ec. (03)}$$

$$a_0 = 1.041$$

Se estableció el valor de S_t utilizando la Ecuación 04, fundamentándonos en los resultados presentados en la Tabla 19.

$$S_t = (Y_i - \bar{Y})^2; S_t = \left(Y_i - \frac{\sum Y_i}{n}\right)^2; \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n} = \bar{Y} = Y_p \quad \text{Ec. (04)}$$

$$S_t = 0.007$$

Se estableció el valor de S_r , es decir, la suma de los residuos, que se calculó utilizando la ecuación (05). Para este cálculo, nos basamos en los resultados presentados en la tabla 19.

$$S_r = (Y_i - a_0) - ((a_1)X_i))^2 \quad \text{Ec. (05)}$$

$$S_r = 0.00047$$

También se determinó el coeficiente de correlación (r^2) utilizando la ecuación (06), así como el coeficiente de determinación (r) definido en la ecuación (07).

$$r_2 = \frac{\sum (S_t - S_r)}{\sum S_t} \text{ Ec. (06)}$$

$$r_2 = 0.930$$

$$r = \sqrt{r_2} \text{ Ec. (07)}$$

$$r = 0.964$$

Se determinó la desviación estándar total, S_y , según lo indicado en la ecuación (08), así como el error estándar del estimador $S_{y/x}$, descrito en la ecuación (09).

$$S_y = \left(\sum S_t / (n - 1) \right)^{0.5} \text{ Ec. (08)}$$

$$S_y = 0.012$$

$$S_{\frac{y}{x}} = (S_r / (n - 2))^{0.5} \text{ Ec. (09)}$$

$$S_{\frac{y}{x}} = 0.003$$

A continuación, la tabla 20 presenta los valores correspondientes a los parámetros de la correlación estudiada.

Tabla 20

Valores de los parámetros de correlación.

$a_1 = b$	$a_0 = a$	r_2	r	S_y/X	S_y
-0.116	1.041	0.930	0.964	0.003	0.012

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa los valores de los parámetros de correlación

Al sustituir los valores de los parámetros b y a en la Ecuación 10 ($Y = bX + a$), se llega al siguiente resultado:

$$Y = -0.116X + 1.041 \text{ Ec. 11}$$

Al aplicar la Ecuación 10 ($Y = bX + a$) en la Ecuación 01 ($\text{Log}(\text{CBR}) = a - b(\text{Log}(\text{PDL}))$), se obtiene lo siguiente:

$$\text{Log}(\text{CBR}) = 1.041 - 0.116(\text{Log}(\text{PDL}))$$

$$\text{Log}(\text{CBR}) + \text{Log}(\text{PDL})^{0.116} = 1.041$$

$$(\text{CBR}) * (\text{PDL})^{0.116} = 10.985$$

A continuación, se presenta la ecuación de correlación final entre los datos de PDL (mm/golpe) y el CBR (%) natural.

$$\text{CBR} = \frac{10.985}{(\text{PDL})^{0.116}} \quad \text{Ec. CORRELACION}$$

A través de la siguiente ecuación, se determinó el CBR (%) in situ, o resistencia al corte, usando el índice PDL y la penetración por golpe, los cuales están relacionados con la profundidad. El objetivo de esta asociación es calcular la variable dependiente (CBR) en función de la variable independiente (PDL). Para evaluar las correlaciones en esta investigación, se emplearon dos parámetros estadísticos clave: el coeficiente de asociación lineal de Pearson (R) y el coeficiente de determinación (R²).

El primer aspecto permitirá medir la intensidad de la asociación lineal entre ambas variables. Un valor cercano a 1 sugiere una fuerte correlación lineal directa, mientras que un valor próximo a -1 indica una buena correlación lineal inversa. Por otro lado, un coeficiente de correlación de 0 señala que no hay correlación entre las variables analizadas. (Vila et al, 2001).

El coeficiente de Pearson proporciona información sobre la posible correlación entre dos variables, así como la fuerza de esta relación y su naturaleza, ya sea positiva o negativa. Para una mejor comprensión, se puede consultar la interpretación en la Tabla 21.

Tabla 21

Coeficiente de Pearson

Coeficiente de Pearson	Grado de Correlación entre las Variables
R = 0	Ninguna Correlación
R = 1	Correlación positiva perfecta

R = -1	Correlación positiva
	Correlación negativa
	perfecta
	Correlación negativa

Fuente: Diana Navarro.

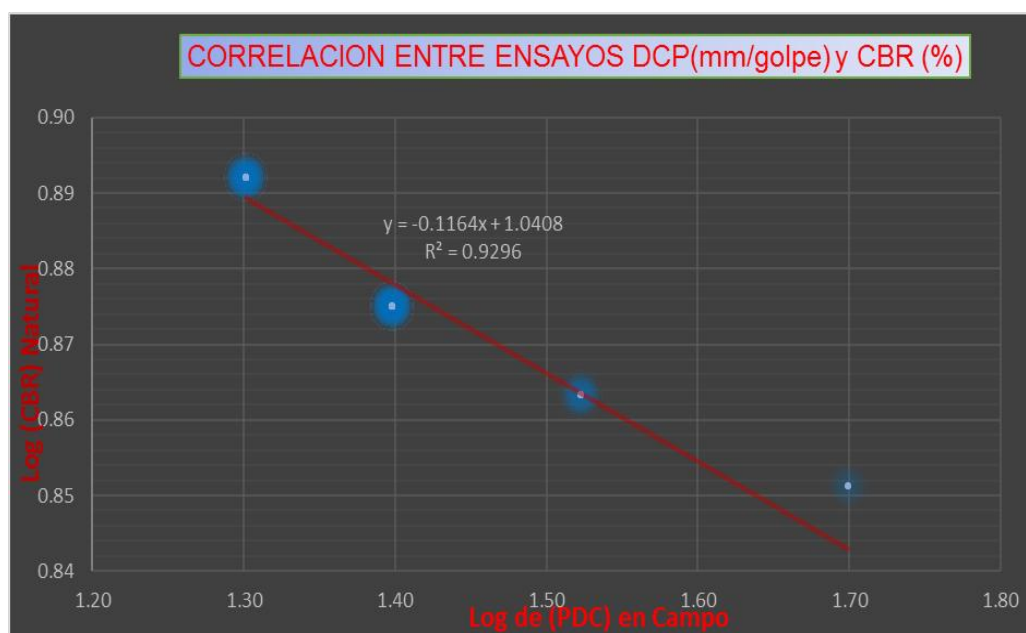
Nota: Se observa los valores e interpretación del coeficiente de Pearson.

A continuación, se llevó a cabo el cálculo del PDL y el CBR, junto con la elaboración del gráfico correspondiente que relaciona el porcentaje de CBR con el índice PDL. De esta forma, se creó una gráfica que presenta en el eje X el número de golpes y en el eje Y la penetración medida en milímetros (mm). Esta representación gráfica permite visualizar claramente el perfil de las distintas capas resistentes.

El índice de penetración del suelo se determina en función a los aspectos determinados como pendientes los cuales fueron generados por los puntos, debido a las pendientes generadas por los puntos, dado que está pendiente se traduce en el índice de penetración (PI) en milímetros por golpe. Por otro lado, la resistencia a la penetración se expresa en función de las cargas estándar (kg/cm²). Cabe destacar que la resistencia a la penetración se ve afectada por la fricción lateral a lo largo de la barra.

Figura 5

Ecuación de correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) Natural.



Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa la ecuación de correlación con pendiente negativa y el coeficiente de Pearson, del CBR (%) en función del PDL, de las calicatas N° 01, 07, 08 y 11.

Utilizando la ecuación de correlación establecida, se calcularon los porcentajes de CBR para cada una de las calles dentro de la zona de estudio. A continuación, se presentan los porcentajes de CBR obtenidos según el índice de PDL para cada calle, dispuestos en las tablas 22, 23, 24 y 25.

Tabla 22

Datos y cálculo del PDL y CBR con la Ecuación de correlación para la calicata N° 01

(calle N° 01).

Nro. de Golpes A	Nro. de golpes acumulados	Penetración acumulada (mm) B	Penetración entre lecturas (mm) C	Penetración por golpe (mm) D	Factor del martillo (mm) E	Índice PDL (mm/golpe) F	CBR (%) G
2	2	100	100	50.00	1	50.00	6.98
4	6	200	100	25.00	1	25.00	7.56
4	10	300	100	25.00	1	25.00	7.56
5	15	400	100	20.00	1	20.00	7.76
4	19	500	100	25.00	1	25.00	7.56

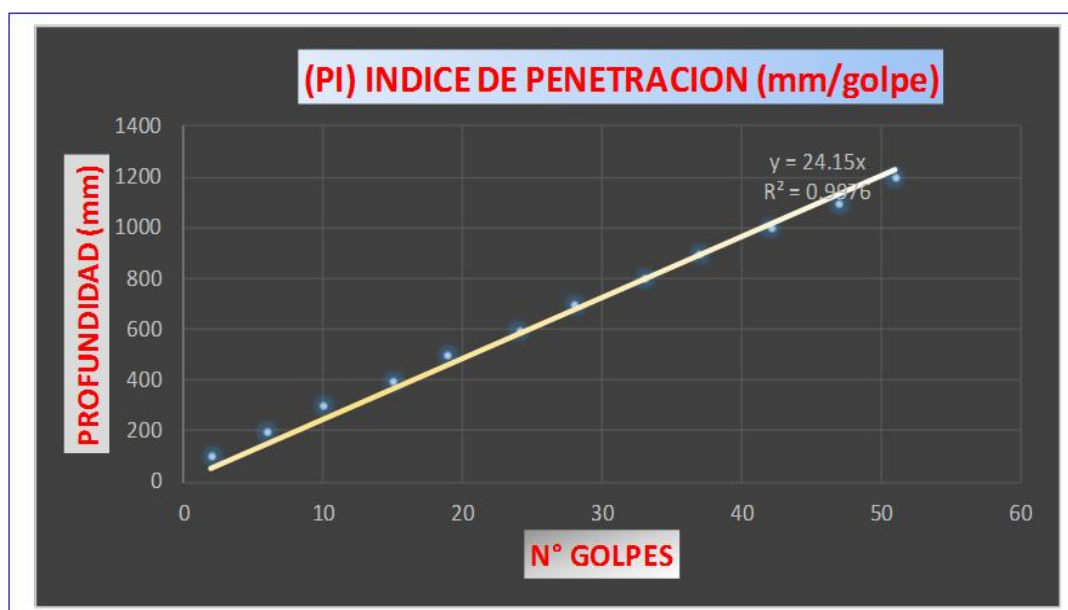
5	24	600	100	20.00	1	20.00	7.76
4	28	700	100	25.00	1	25.00	7.56
5	33	800	100	20.00	1	20.00	7.76
4	37	900	100	25.00	1	25.00	7.56
5	42	1000	100	20.00	1	20.00	7.76
5	47	1100	100	20.00	1	20.00	7.76
4	51	1200	100	25.00	1	25.00	7.56
5	56	1300	100	20.00	1	20.00	7.76

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa los datos y el proceso para el cálculo del índice de PDL (mm/golpe) y el CBR (%) con la ecuación de correlación encontrada para la calicata N° 01 (calle N° 01).

Figura 6

Índice de penetración IP (mm/golpe) para la calicata N° 01, (calle N° 01).

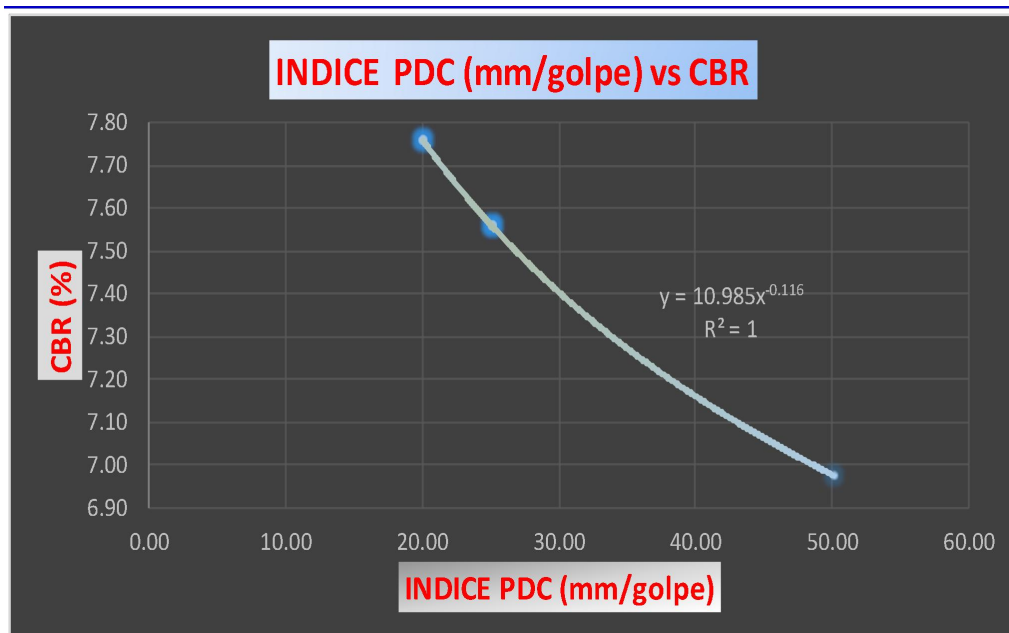


Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el índice de penetración, en función del N° de golpes y la profundidad (mm) para la calicata N° 01 (calle N° 01).

Figura 7

Ecuación de Correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) con la ecuación de correlación para la calicata N° 01, (calle N° 01).



Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el CBR (%) natural en función del índice de penetración PDL (mm/golpe), para la calicata N° 01 (calle N° 01).

Al graficar los datos de la Tabla N° 22 correlaciones de PDL Vs CBR de la calicata N° 01, se determinó una línea de tendencia que representa la correlación PDL Vs CBR y una ecuación lineal de grado potencial para la forma:

$$Y = 10.985X^{-0.116}, \text{ Con un } R^2 = 1$$

$$Y = \text{CBR} = 6.98\%$$

En donde:

X= número de golpes de PDL.

Y= CBR %

Una vez establecida la ecuación de correlación PDL Vs CBR para los datos de los estudios de suelos, se procedió a reemplazar la X con el índice PDL de la muestra inalterada.

$$Y = 10.985(50^{-0.116}), \text{ Con un } R^2 = 1$$

$$Y = \text{CBR} = 6.98\%$$

Tabla 23

Datos y cálculo del PDL y CBR con la ecuación de correlación para la calicata N° 02 (calle N° 07).

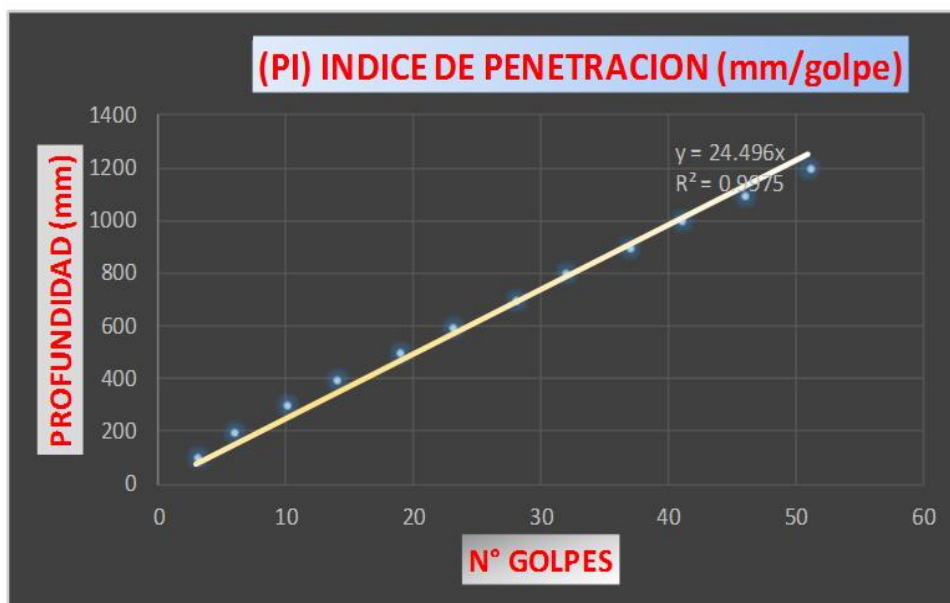
Nro. de Golpes A	Nro. de golpes acumulados B	Penetración acumulada (mm) C	Penetración entre lecturas (mm) D	Penetración por golpe (mm) E	Factor del martillo (mm) F	Índice PDL (mm/golpe) G	CBR (%)
3	3	100	100	33.33	1	33.33	7.31
3	6	200	100	33.33	1	33.33	7.31
4	10	300	100	25.00	1	25.00	7.56
4	14	400	100	25.00	1	25.00	7.56
5	19	500	100	20.00	1	20.00	7.76
4	23	600	100	25.00	1	25.00	7.56
5	28	700	100	20.00	1	20.00	7.76
4	32	800	100	25.00	1	25.00	7.56
5	37	900	100	20.00	1	20.00	7.76
4	41	1000	100	25.00	1	25.00	7.56
5	46	1100	100	20.00	1	20.00	7.76
5	51	1200	100	20.00	1	20.00	7.76

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: En la tabla 23 se observa los datos y el proceso para el cálculo del índice de PDL (mm/golpe) y el CBR (%) con la ecuación de correlación encontrada para la calicata N° 02 (calle N° 07).

Figura 8

Índice de penetración IP (mm/golpe) para la calicata N° 02, (calle N° 07).

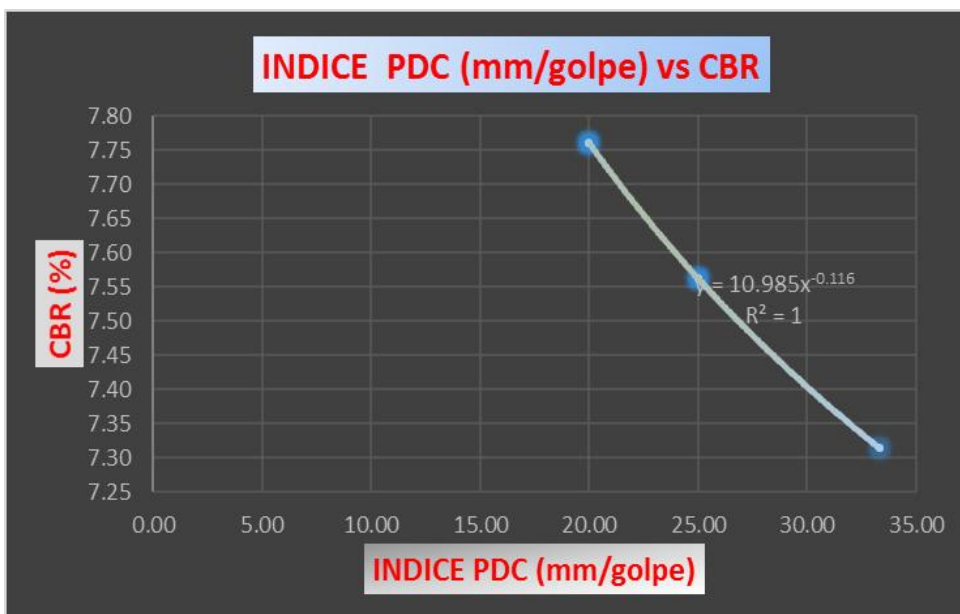


Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el índice de penetración, en función del N° de golpes y la profundidad (mm) para la calicata N° 02 (calle N° 07).

Figura 9

Ecuación de correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) con la ecuación de correlación para la calicata N° 02 (calle N° 07).



Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el CBR (%) natural en función del índice de penetración PDL (mm/golpe), para la calicata N° 02 (calle N° 07).

Al graficar los datos de la Tabla 23, correlaciones de PDC Vs CBR de la calicata N° 02, se determinó una línea de tendencia que representa la correlación PDC Vs CBR y una ecuación lineal de grado potencial para la forma:

$$Y = 10.985X^{-0.116}, \text{ Con un } R^2 = 1$$

$Y = \text{CBR} = 7.31\%$

En donde:

X= Número de golpes de PDC.

Y= CBR %

En función a la ecuación de asociación PDC Vs CBR para aquellos datos de la investigación del estudio de suelos, se asumió como índice de correlación de esta nueva ecuación, sustituyendo la X con el índice de PDC en la muestra inalterada.

$$Y = 10.985(33.33^{-0.116}), \text{ Con un } R^2 = 1$$

$Y = \text{CBR} = 7.31\%$

Tabla 24

Datos y cálculo del PDL y CBR con la Ecuación de correlación para la calicata N° 03 (Calle N° 08).

Nro. de Golpes A	Nro. de golpes acumulados B	Penetración acumulada (mm) B	Penetración entre lecturas (mm) C	Penetración por golpe (mm) D	Factor del martillo (mm) E	Índice PDL (mm/golpe) F	CBR (%) G
4	4	100	100	25.00	1	25.00	7.54
3	7	200	100	33.33	1	33.33	7.29
4	11	300	100	25.00	1	25.00	7.54
3	14	400	100	33.33	1	33.33	7.29
4	18	500	100	25.00	1	25.00	7.54
5	23	600	100	20.00	1	20.00	7.74

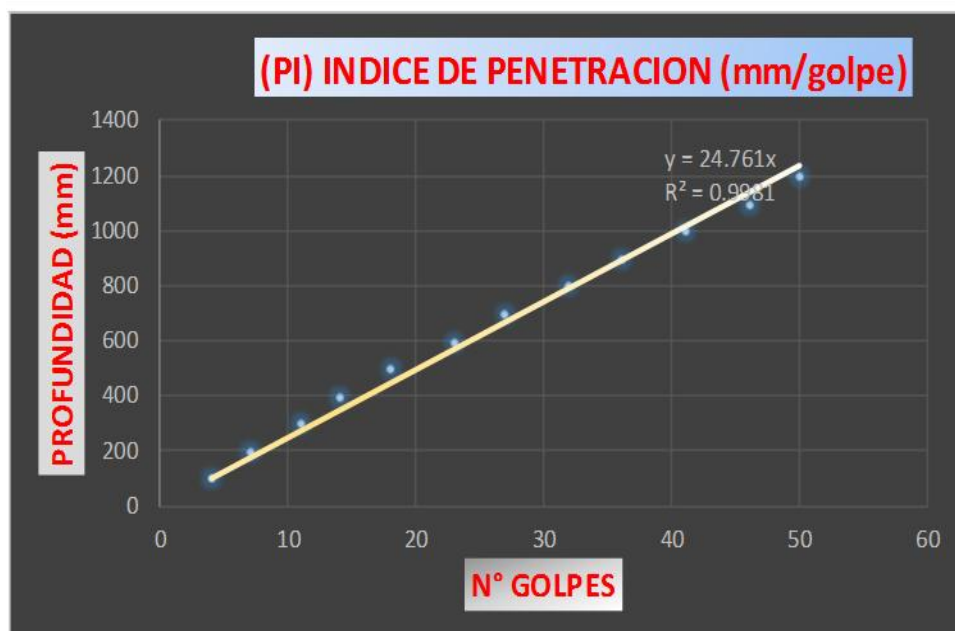
4	27	700	100	25.00	1	25.00	7.54
5	32	800	100	20.00	1	20.00	7.74
4	36	900	100	25.00	1	25.00	7.54
5	41	1000	100	20.00	1	20.00	7.74
5	46	1100	100	20.00	1	20.00	7.74
4	50	1200	100	25.00	1	25.00	7.54

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa los datos y el proceso para el cálculo del índice de PDL (mm/golpe) y el CBR (%) con la ecuación de correlación encontrada para la calicata N° 03 (calle N° 08).

Figura 10

Índice de penetración IP (mm/golpe) y CBR (%) para la calicata N° 03, (calle N° 08).

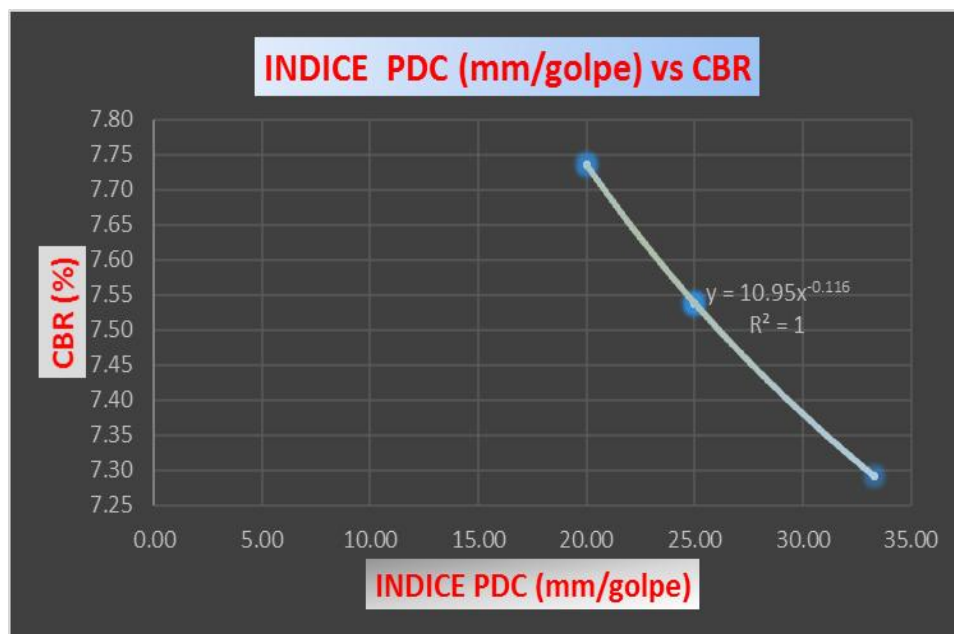


Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el índice de penetración, en función del N° de golpes y la profundidad (mm) para la calicata N° 03 (calle N° 08).

Figura N° 11

Ecuación de correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) con la ecuación de correlación para la calicata N° 03 (Calle N° 08).



Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el CBR (%) natural en función del índice de penetración PDL (mm/golpe), para la calicata N° 03 (calle N° 08).

Una vez examinados aquellos aspectos denominados datos en la Tabla 24 de correlaciones de PDL Vs CBR de la calicata N° 03, se analizó la línea de tendencia que está ligada a la asociación PDL Vs CBR y una ecuación lineal de grado potencial siendo la siguiente:

$$Y = 10.985X^{-0.116}, \text{ Con un } R^2 = 1$$

$Y = \text{CBR} = 7.54\%$

En donde: X= Número de golpes de PDL.

$$Y = \text{CBR } \%$$

Una vez establecida la ecuación de correlación entre el PDL y el CBR, se llevó a cabo una nueva correlación utilizando esta ecuación, en la cual se sustituyó la variable X por el índice de PDL correspondiente a la muestra inalterada.

$$Y = 10.985(25^{-0.116}), \text{ Con un } R^2 = 1$$

$$Y = \text{CBR} = 7.54\%$$

Tabla 25

Cuadro de datos y cálculo del PDL y CBR con la ecuación de correlación para la calicata

N° 04 (Calle N° 11).

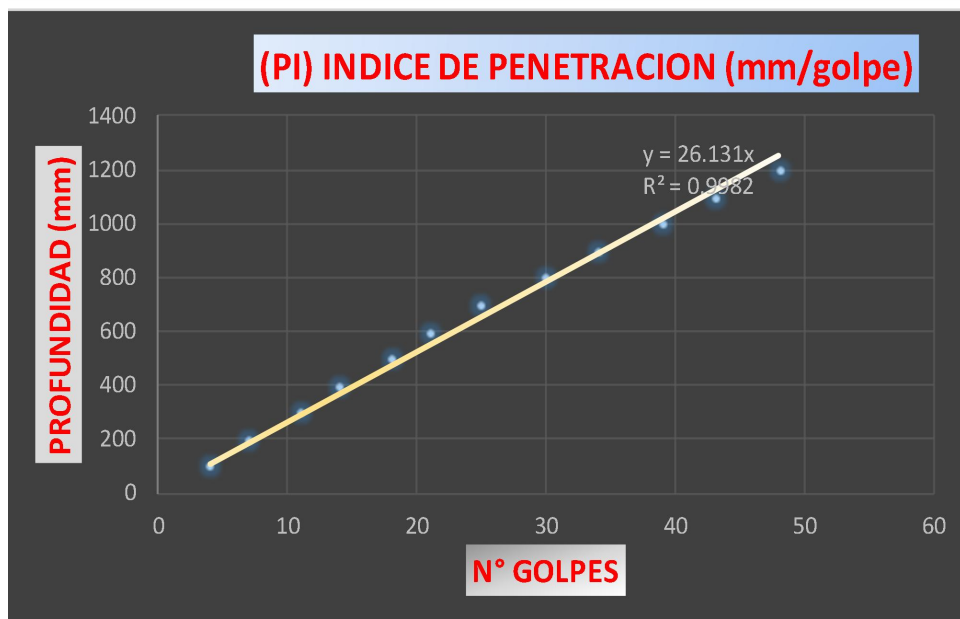
Nro. de Golpes A	Nro. de golpes acumulados	Penetración acumulada (mm) B	Penetración entre lecturas (mm) C	Penetración por golpe (mm) D	Factor del martillo (mm) E	Índice PDL (mm/golpe) F	CBR (%) G
4	4	100	100	25.00	1	25.00	7.56
3	7	200	100	33.33	1	33.33	7.31
4	11	300	100	25.00	1	25.00	7.56
3	14	400	100	33.33	1	33.33	7.31
4	18	500	100	25.00	1	25.00	7.56
3	21	600	100	33.33	1	33.33	7.31
4	25	700	100	25.00	1	25.00	7.56
5	30	800	100	20.00	1	20.00	7.76
4	34	900	100	25.00	1	25.00	7.56
5	39	1000	100	20.00	1	20.00	7.76
4	43	1100	100	25.00	1	25.00	7.56
5	48	1200	100	20.00	1	20.00	7.76

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa los datos y el proceso para el cálculo del índice de PDL (mm/golpe) y el CBR (%) con la ecuación de correlación encontrada para la calicata N° 04 (calle N° 11).

Figura 12

Índice de penetración IP (mm/golpe) y CBR (%) para la calicata N° 04, (calle N° 11).

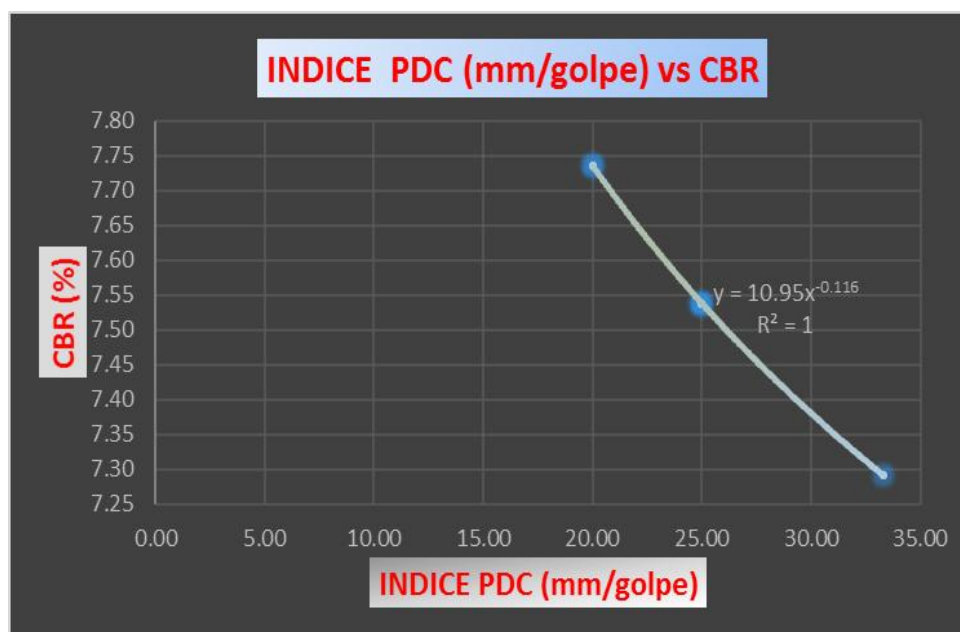


Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el índice de penetración, en función del N° de golpes y la profundidad (mm) para la calicata N° 04 (calle N° 11).

Figura 13

Ecuación de correlación entre Ensayos PDL (mm/golpe) y CBR (%) con la ecuación de correlación para la calicata N° 04 (Calle N° 11).



Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el CBR (%) natural en función del índice de penetración PDL (mm/golpe), para la calicata N° 04 (calle N° 11).

Una vez que se graficaron los datos presentados en la Tabla 25, que muestran las correlaciones entre el PDL y el CBR de la calicata N° 04, se procedió a determinar una línea de tendencia que refleja la relación entre el PDL y el CBR, así como una ecuación lineal de grado potencial, cuya forma es la siguiente:

$$Y = 10.985X^{-0.116}, \text{ Con un } R^2 = 1$$

$$Y = \text{CBR} = 7.76\%$$

En donde:

X= número de golpes de PDL.

Y= CBR %

Una vez establecida la ecuación de correlación entre el PDL y el CBR para los datos derivados de los estudios de suelos, se procedió a realizar una nueva correlación de dicha ecuación, sustituyendo la variable X por el índice de PDL correspondiente a la muestra inalterada.

$$Y = 10.985(20^{-0.116}), \text{ Con un } R^2 = 1$$

$$Y = \text{CBR} = 7.76\%$$

Una vez establecido el porcentaje de CBR natural mediante el índice PDL (mm/golpe) en las calicatas N° 01, N° 02, N° 03 y N° 04, se procedió a elaborar una tabla resumida que muestra la correlación del CBR en cada muestra con su correspondiente índice PDL.

Tabla 26

Resultados de correlación de CBR (%) Tesis.

Muestra.	Ubicación.	Índice PDL (mm/golpe)	CBR (%)
----------	------------	--------------------------	------------

			Tesis
CALICATA N° 01	Calle N° 01	50.00	6.98
CALICATA N° 02	Calle N° 07	33.33	7.31
CALICATA N° 03	Calle N° 08	25.00	7.56
CALICATA N° 04	Calle N° 11	20.00	7.76

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa el índice de penetración PDL (mm/golpe) y el CBR (%) tesis según la ecuación de correlación encontrada de las calicatas N° 01,02, 03 y 04.

- **Ensayo y resultados del método mecánico empírico (viga Benkelman).**

Con el propósito de demostrar el análisis realizado en razón a la existencia de diversos datos que son derivados de las pruebas recopiladas dentro del proyecto típico de la evaluación estructural, se tiene el conjunto de procedimientos propios de la interpretación. Asimismo, se describe los diversos aspectos propios para la interpretación, así como los algoritmos correspondientes y ejemplificar la aplicación. Cabe destacar que estos algoritmos pueden ser resueltos manualmente en situaciones en las que no se disponga de un dispositivo. Aun cuando existe un método presentado este se centra en las pruebas realizadas haciendo uso de la Viga Benkelman, el cual se adapta a las valoraciones hechas con métodos o dispositivos para medir las deflexiones.

- **Modelo de carga.**

La carga aplicada en el ensayo utilizando la Viga Benkelman proviene del eje trasero simple con llanta doble de un camión. La carga correspondiente al eje asciende aproximadamente a 18,000 libras, y la presión de inflado se encuentra en el rango de 75 a 85 psi. En el modelo de carga (ver figura 14), se establece que la presión de inflado es equivalente a la presión de contacto, se asume que la huella de contacto de cada llanta es de forma circular con un radio designado como "A", y se

considera que existe una distancia de "3A" entre los centros de cada llanta. A partir de este equilibrio, se establece la siguiente relación:

$$A = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \dots \text{Ec. (12)}$$

Donde:

A= Radio de la huella circular de contacto

P= Carga sobre una llanta

p= Presión de inflado.

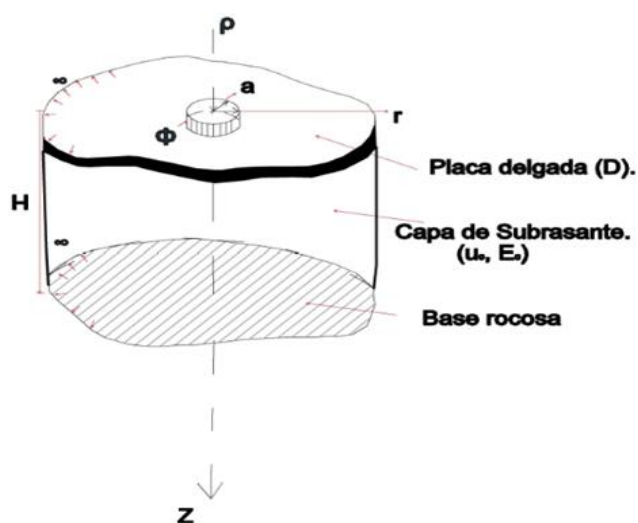
De este modo, si la carga del eje asciende a 18,000 libras (4,500 libras por neumático) y la presión de inflado es de 100 psi, como se puede observar en la calle N° 11, carril izquierdo:

$$A = \sqrt{\frac{4500}{\pi(100)}} = 3.79" = 9.63\text{cm}$$

El análisis y la programación son compatibles con cualquier valor de carga y presión de inflado.

Figura 14

Esquema y parámetros del Modelo matemático de Hogg.



Fuente: “Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones – HOFFMAN, Mario S., DEL AGUILA, Pablo M.”

-Determinación de R5.

R5 representa la distancia "R" desde el centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal. En este contexto, se ha establecido que la relación DR/D0 es igual a 0.611 en la curva de deflexiones. Para el modelo de HOGG, se ha determinado que R5 puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$R5 = R \frac{A^C - B}{\left(A\left(\frac{D0}{DR} - 1\right)\right)^C - B} \quad \text{.....Ec. (13)}$$

Donde:

R = Distancia a la que se mide la deflexión DR (Ejemplo: R= 60 cm).

D0= Deflexión Máxima

DR= Deflexión a la distancia R

A, B y C = Coeficientes de correlación cuyo valor se indica en la tabla 27.

Tabla 27

H/L0	μ	A	B	C
∞	Cualquier Valor	3.115	0	0.584
10 DR/D0>0.7	0.5	2.460	0	0.592
10 DR/D0<0.7	0.5	371.1	2	0.219
10 DR/D0>0.426	0.4	2.629	0	0.548
10 DR/D0<0.426	0.4	2283.4	3	0.2004

Coeficiente de correlación para el cálculo de R5 en el modelo de Hogg.

Nota: Fuente: "Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexión – Hoffman, Mario s. Del Aguila, Pablo M."

Ejemplo:

$\mu=0.5$; $H/L0= 10$; $D0= 0.36$ mm; $DR=0.22$ mm

$R= 50$ cm.; $DR/D0= 0.36/0.22 =0.611$

Usando la ecuación (04) se obtiene:

R5 = 63.15 cm.

El valor R5 se utiliza como insumo para determinar la longitud elástica (L0) del pavimento, conforme a la explicación que se presenta a continuación.

-Determinación de la Longitud Elástica (L0).

La longitud elástica (L0) del pavimento puede determinarse mediante la utilización de la ecuación (Ec. 14).

$$L0 = \frac{YR5 + \sqrt{(YR5)^2 - 4AXR5}}{2} \quad \text{..... EC.....(14)}$$

Donde:

R5 = Calculado en la ecuación (04)

A = Radio de la huella circular de carga

X, Y= Coeficiente de correlación cuyo valor se indica en la tabla 28.

Tabla 28

Coeficiente de correlación para la determinación de L0 en el modelo de Hogg.

H/L0	μ	X	Y
10	0.5	0.183	0.620
10	0.4	0.192	0.602
∞	Cualquier Valor	0.180	0.525

Nota: Fuente: "Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexión – Hoffman, Mario s. Del Aguila, Pablo M."

Ejemplo:

$\mu = 0.5$; $H/L0 = 10$; $R5 = 63.15$ cm.; $A = 9.63$ cm

Usando la ecuación (Ec. 14) se obtiene:

L0 = 36.07 cm

El valor de L0 constituye un insumo para la determinación del módulo de elasticidad de la subrasante (E0), tal como se expone a continuación.

-Determinación del módulo de elasticidad de la subrasante (E0).

La determinación del módulo de elasticidad de la subrasante representa un aspecto fundamental en la metodología de evaluación. Para llevar a cabo el desarrollo de soluciones numéricas, se procede en dos fases:

Primera fase:

Implica analizar la asociación teórica entre lo rígido para una carga puntual y la rigidez para una carga distribuida en el área, considerando un cociente específico del valor $A/L0$. La rigidez se conceptúa como el cociente entre la carga aplicada y la deflexión resultante ($S = P/D0$). La asociación teórica se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{S_0}{S} = 1 - M\left(\frac{A0}{L} - 0.10\right) \quad \text{..... EC. (15)}$$

Donde:

S_0 = Rigidez para carga puntual

S = Rigidez para carga de área

M = Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para $H/L_0 = 10$; $\mu = 0.5$; $M = 0.52$

Para $H/L_0 = 10$; $\mu = 0.4$; $M = 0.48$

Para $H/L_0 = \infty$; $\mu = \text{cualquier valor}$; $M = 0.44$

Por ejemplo: Para $A/L_0 = 9.63/36.07 = 0.27$

$H/L_0 = 10$

$\mu = 0.5$

Se obtiene: $S_0/S = 1 - 0.52(0.27 - 0.10)$

$S_0/S = 0.91$

Segunda fase:

Una vez establecido el valor de S_0/S , se procede a calcular el módulo de elasticidad de la subrasante utilizando la siguiente ecuación:

$$E_0 = \left(\frac{K \times I \times P}{L_0 \times D_0} \right) \frac{S_0}{S} \quad \text{..... EC. (16)}$$

Donde:

K = Coeficiente numérico que depende del coeficiente de Poisson de la subrasante y que adopta los siguientes valores:

Para $\mu = 0.5$; $K = 1.5$

Para $\mu = 0.4$; $K = 1.633$

I = Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores: Para $H/L_0 = 10$; $\mu = 0.4$; $I = 0.1689$

Para $H/L_0 = 10$; $\mu = 0.5$; $I = 0.1614$

Para $H/L_0 = \infty$; $\mu = \text{cualquier valor}$; $I = 0.1925$

P = Carga total en la llanta doble.

L_0 = Longitud elástica (ecuación 05)

D0= Deflexión máxima

Ejemplo:

H/L0=10; u=0.5; P=9000 libras (4086 Kg)

L0 = 36.07 cm; D0=0.36 mm; So/S =0.91

Entonces.

K = 1.5

I = 0.1614

y usando la ecuación (Ec. 07)

$$E_0 = \left(\frac{1.5 \times 0.1614 \times 4086}{36.07 \times 0.36 / 10} \right) 0.91$$

E0 = 695.66 kg/cm². (Ver anexo 05 Método de análisis de Viga Benkelman Calle N° 11, carril Izquierdo).

-Parámetros de evaluación.

De acuerdo con lo anteriormente que se ha expuesto, metodológicamente de acuerdo a la evaluación estructural del tipo de pavimentos que se encuentra fundamentada en interpretar del proceso de deflexiones superficiales se apoya precisamente en el Modelo de Hogg, así como en principios de la teoría de la elasticidad y de la resistencia de los materiales. Los requerimientos para procesar los datos se tipifican cuatro (4) categorías:

- a) Datos de carga (P y p).
- b) Deflexiones medidas (D0, DR y R).
- c) Datos de pavimento (Espesores y características de las capas)
- d) Parámetros del modelo (H/L0 y μ)

La metodología, a su vez, genera los datos de salida siendo: L0, E0 y E*. Es importante señalar que los datos de salida son directamente dependientes de los datos de entrada. La carga de ensayo, por lo general, constituye un dato fijo para cada

proyecto y, salvo circunstancias excepcionales, debe encontrarse dentro del rango recomendado de $P = 18$ kilo libras y $p = 75-85$ psi.

Las deflexiones registradas son el resultado de los ensayos realizados y es probable que varíen de un proyecto a otro, así como entre distintos puntos de un mismo proyecto, debido a la heterogeneidad del pavimento y su subrasante, así como a errores de medición que son inevitables.

La selección de una o más distancias "R" está sujeta al criterio del Ingeniero; sin embargo, es común y práctico realizar mediciones, como mínimo, de D0, D40, D50 y D100 a distancias de 0,40, 50 y 100 centímetros del eje de la carga.

Los espesores y las características de las capas del pavimento no siempre están documentados, a menos que existan datos históricos de construcción y/o diseño o se realicen perforaciones de calicatas. Esta información es fundamental para determinar el valor de "HC", que influye en "E*", aunque no afecta los valores de "L0" y "E0". Esta distinción constituye un aspecto relevante del modelo propuesto por Hogg. A continuación, se discutirá el significado de los parámetros del modelo.

➤ **Significado de L0.**

La longitud característica (L0) del pavimento se define como un parámetro que refleja la rigidez relativa entre el pavimento y su subrasante. Dado que se trata de una relación de rigideces, el valor de L0 facilita una evaluación cualitativa rápida del sistema formado por el pavimento y la subrasante.

En un extremo de la escala se puede considerar un pavimento rígido, como una losa de concreto, apoyado sobre una subrasante débil con un valor de L0 aproximado de 80 cm. En el extremo opuesto, se encuentra un pavimento compuesto por una capa granular sin revestimiento, situado sobre una subrasante fuerte, con un L0 aproximado de 15 cm. Es importante señalar que esta discusión

se refiere a la relación de rigideces; por lo tanto, un valor reducido de L_0 puede corresponder tanto a la situación de un pavimento de buena calidad sobre una subrasante adecuada como a la de un pavimento deficiente sobre una subrasante inadecuada.

La determinación de L_0 en el proceso de evaluación se basa exclusivamente en el cociente DR/D_0 y en el valor R . Esto implica que dos pavimentos cualesquiera que presenten un cociente DR/D_0 igual a una distancia R dada, exhiben el mismo L_0 , a pesar de que los valores de DR y D_0 sean diferentes. Los valores específicos de D_0 y DR tienen un impacto en los módulos E_0 y E^* , tal como se explicará en secciones posteriores.

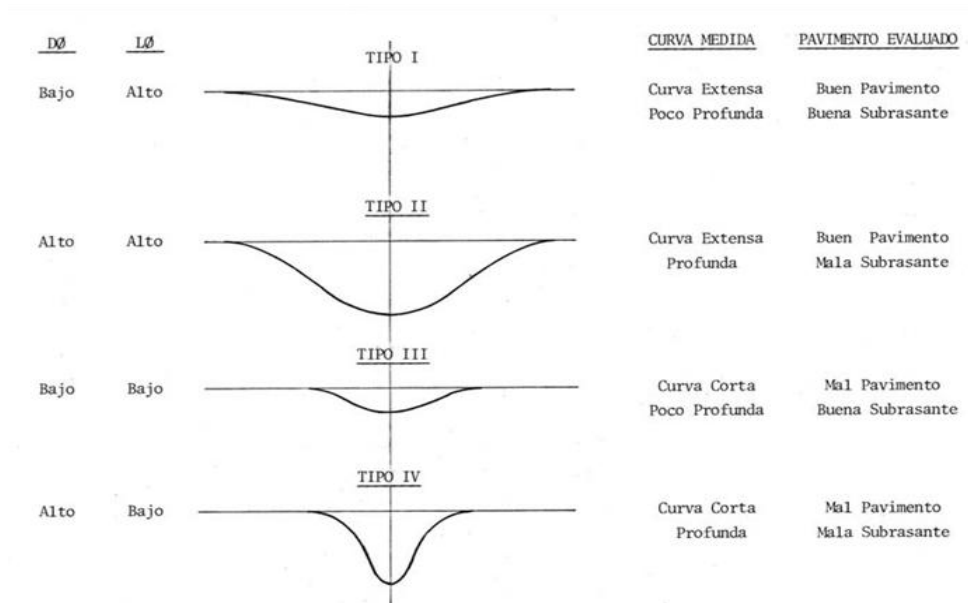
➤ **Significado de E_0 y su relación con el CBR.**

El parámetro E_0 representa el módulo de elasticidad del suelo subyacente que contribuye a la deformación del sistema de pavimento y subrasante. En la ecuación (07), se observa que E_0 es inversamente proporcional **a D_0 y a L_0 . En este sentido, E_0 disminuye a medida que aumentan la deflexión y la longitud característica de la subrasante, para una relación de rigideces S_0/S dada, y viceversa.**

El primer paso corresponde a un pavimento que presenta una curva de deflexiones profunda y extensa. En términos generales, es posible establecer relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema, las cuales se ilustran en la figura 15. Es importante enfatizar que las relaciones mostradas en dicha figura son comparativas y tienen como objetivo facilitar la comprensión del significado de E_0 en el contexto del pavimento, en relación con las características de la curva de deflexiones medida.

Figura 15

Significado cualitativo de los diferentes tipos de curvas de deflexiones.



Fuente: "Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexión – Hoffman, Mario s. Del Águila, Pablo M."

A pesar de que el módulo E_0 constituye un parámetro mecánico fundamental del subsuelo, se ha establecido, además, una relación entre este valor y el índice de soporte californiano (CBR) de la subrasante, con el fin de facilitar el diseño del refuerzo requerido o para verificar diseños mediante métodos tradicionales. **Esta relación ha sido determinada de manera experimental, mediante la comparación de los valores de E_0 obtenidos a partir de la metodología de evaluación estructural, utilizando deflexiones medidas con la Viga Benkelman y valores de CBR obtenidos in situ.**

A partir de numerosas comparaciones de esta naturaleza, se ha logrado establecer la siguiente relación:

$$E_0 = (100 \text{ a } 160) \times \text{CBR} \quad \text{Ec....(17)}$$

Para E_0 expresado en Kg/cm^2 y CBR en porcentaje.

Es interesante observar que esta relación es análoga a la obtenida por Heukelom y Klomp, quienes llevaron a cabo experimentos de propagación y análisis de ondas vibratorias en los Países Bajos con el fin de determinar lo que denominaron el "E dinámico" de los suelos.

El **coeficiente numérico, que oscila entre 100 y 160**, de la relación expresada en la Ecuación 17 se denomina "**factor de CBR**". Se recomienda emplear un factor que se sitúe entre **100 y 110** para las pruebas rutinarias, salvo que exista una justificación válida para modificarlo. Usando la ecuación (Ec. 17)

$$E_0 = (100 \text{ a } 110) \times \text{CBR} \quad \text{Ec.18}$$

$$\text{CBR} = E_0/100 \text{ y/o } \text{CBR} = E_0/110.$$

En consecuencia, el factor de CBR para ensayos rutinarios en la calle N° 11 carril Izquierdo progresiva Km 00+000 es de:

$$\text{CBR I} = (695.66 \text{ kg/cm}^2 / 110) = 6\%$$

$$\text{CBR I} = (695.66 \text{ kg/cm}^2 / 100) = 7\%. \text{ (Ver anexo 05 Método de análisis de viga Benkelman Calle N° 11, carril Izquierdo).}$$

- **Los parámetros H/L0 y μ .**

La metodología de evaluación posibilita la selección de la profundidad de la "capa rocosa", permitiendo optar por un valor de H/L0 igual a 10 o a 100, los cuales corresponden a una capa rocosa en condiciones infinitas. La elección de uno de estos valores de H/L0 impacta en todos los resultados de la evaluación, incluyendo L0, E0 (CBR) y E*.

Para estudios rutinarios, se recomienda el uso de una relación H/L0 establecida en 10, lo cual implica que la capa rocosa se encuentra a una profundidad equivalente a 10 veces la longitud característica del pavimento. Así, para una longitud característica (L0) de 20 cm, se asume que la capa rocosa se sitúa a una

profundidad de 2. 0 metros; para un L0 de 40 cm, la profundidad de la capa rocosa es de 4. 0 metros, y así sucesivamente. Como se ha indicado anteriormente, la utilización de un valor finito de $H/L0$ (10 en este caso) proporciona resultados de evaluación más satisfactoriamente representativos.

El valor $H/L0 = 100$ (correspondiente a la capa rocosa en el infinito) puede emplearse para evaluar la sensibilidad de los resultados o para verificar el grado de concordancia entre las curvas de deflexiones medidas y las curvas teóricas, siempre y cuando se disponga de múltiples valores de deflexiones registrados a distintas distancias del eje de la carga. Este procedimiento es, en efecto, un método legítimo para validar los resultados de la evaluación.

En relación al coeficiente de Poisson μ , las soluciones propuestas admiten los valores de 0. 4 y 0. 5, siendo recomendable utilizar 0. 4 para trabajos rutinarios. No obstante, la variación en los resultados entre ambos valores no suele superar típicamente el 10%.

- Interpretación de los resultados

Seguidamente, se tiene la tabla de resumen de los datos que se requieren para evaluar la subrasante, además como elaborar el deflectograma que corresponde.

Tabla 29

Resumen de cálculo de Deflexiones y Radio de curvatura de cada prueba de la Residencial Posada del Sol.

CALLE N°	CARRIL	DEFLEXIONES (D ₀) Y RADIO DE CURVATURA												
01	DERECHO	Progresiva	00+010	00+030	00+050	00+070	00+090	00+110	00+130	00+150	00+170	00+190	00+210	00+230
		D0 Individual	24.00	30.00	26.00	14.00	26.00	31.00	24.00	24.00	32.00	26.00	28.00	24.00
		D0 Promedio	25.75	25.75	25.75	25.75	25.75	25.75	25.75	25.75	25.75	25.75	25.75	25.75
		D0 Característica	32.78	32.78	32.78	0.00	33.17	33.17	33.17	33.17	33.17	33.17	33.17	33.17
		D0 Máxima	40.31	40.31	40.31		40.31	40.31	40.31	40.31	40.31	40.31	40.31	40.31
		D0 Mínima	13.44	13.44	13.44	ZONA FUERTE	13.44	13.44	13.44	13.44	13.44	13.44	13.44	13.44
		Radio de Curvatura	312.50	223.21	260.42	390.63	260.42	240.38	173.61	260.42	223.21	260.42	260.42	195.31
	IZQUIERDO	Progresiva	00+020	00+040	00+060	00+080	00+100	00+120	00+140	00+160	00+180	00+200	00+220	00+240
		D0 Individual	30.00	32.00	28.00	16.00	32.00	31.00	26.00	28.00	33.00	28.00	30.00	26.00
		D0 Promedio	28.33	28.33	28.33	28.33	28.33	28.33	28.33	28.33	28.33	28.33	28.33	28.33
		D0 Característica	34.00	34.00	34.00	0.00	34.31	34.31	34.31	34.31	34.31	34.31	34.31	34.31
		D0 Máxima	45.00	45.00	45.00		45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00
		D0 Mínima	15.00	15.00	15.00	ZONA FUERTE	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
		Radio de Curvatura	156.25	130.21	195.31	312.50	173.61	183.82	173.61	260.42	223.21	223.21	260.42	223.21
11	DERECHO	Progresiva	00+010	00+030	00+050	00+070	00+090	00+110	00+130	00+150				
		D0 Individual	6.00	10.00	5.00	9.00	15.00	12.00	13.00	10.00				
		D0 Promedio	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00				
		D0 Característica	13.66	13.66	0.00	12.77	12.77	12.77	12.77	12.77				
		D0 Máxima	17.70	17.70		17.70	17.70	17.70	17.70	17.70				
		D0 Mínima	5.90	5.90	ZONA FUERTE	5.90	5.90	5.90	5.90	5.90				

08	IZQUIERDO	Radio de Curvatura	3125.00	1562.50	3125.00	1562.50	390.63	520.83	390.63	520.83	
		Progresiva	00+000	00+020	00+040	00+060	00+080	00+100	00+120	00+140	00+160
		D0 Individual	10.00	6.00	7.00	4.00	6.00	9.00	11.00	10.00	7.00
		D0 Promedio	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78
		D0 Característica	11.83	11.83	11.83	0.00	12.75	12.75	12.75	12.75	12.75
		D0 Máxima	12.90	12.90	12.90	ZONA FUERTE	12.90	12.90	12.90	12.90	12.90
		D0 Mínima	4.30	4.30	4.30		4.30	4.30	4.30	4.30	4.30
	Radio de Curvatura	3125.00	1562.50	3125.00	1562.50	1562.50	781.25	520.83	1562.50	781.25	
	DERECHO	Progresiva	00+010	00+030	00+050	00+070	00+090	00+110	00+130	00+150	
		D0 Individual	17.00	15.00	10.00	8.00	13.00	11.00	13.00	11.00	
		D0 Promedio	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	12.25	
		D0 Característica	18.47	18.47	18.47	0.00	14.31	14.31	14.31	14.31	
		D0 Máxima	21.00	21.00	21.00	ZONA FUERTE	21.00	21.00	21.00	21.00	
D0 Mínima		7.00	7.00	7.00	7.00		7.00	7.00	7.00		
Radio de Curvatura		312.50	446.43	781.25	781.25	446.43	520.83	625.00	520.83		
IZQUIERDO	Progresiva	00+020	00+040	00+060	00+080	00+100	00+120	00+140	00+160		
	D0 Individual	12.00	13.00	9.00	7.00	12.00	10.00	9.00	11.00		
	D0 Promedio	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38		
	D0 Característica	15.50	15.50	15.50	0.00	13.08	13.08	13.08	13.08		
	D0 Máxima	15.75	15.75	15.75	ZONA FUERTE	15.75	15.75	15.75	15.75		
	D0 Mínima	5.25	5.25	5.25		5.25	5.25	5.25	5.25		
	Radio de Curvatura	446.43	520.83	625.00	1041.67	390.63	625.00	625.00	446.43		

07	DERECHO	Progresiva	00+010	00+030	
		D0 Individual	24.00	22.00	
		D0 Promedio	23.00	23.00	
		D0 Característica	25.83	25.83	
		D0 Máxima	34.50	34.50	
		D0 Mínima	11.50	11.50	
		Radio de Curvatura	312.50	446.43	
	IZQUIERDO	Progresiva	00+000	00+020	00+040
		D0 Individual	19.00	22.00	14.00
		D0 Promedio	18.33	18.33	18.33
		D0 Característica	26.42	26.42	26.42
		D0 Máxima	27.50	27.50	27.50
		D0 Mínima	9.17	9.17	9.17
		Radio de Curvatura	446.43	520.83	625.00

Fuente: Elaboración propia.

- **Cálculo de los parámetros.**

➤ **Deflexión promedio:**

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad \text{Ec. (19)}$$

Usamos la ecuación (18), teniendo como $D_i = D_o$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^9 D_i}{9}, \quad \bar{D} = 32.88 \times 10^{-2} \text{ mm (Ver anexo 05 Método de análisis de Viga}$$

Benkelman Calle N° 11, carril Izquierdo).

➤ **Deflexión característica:**

$$D_C = \bar{D} + t * \sigma \quad \text{Ec. (20)}$$

➤ **Desviación estándar**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{(n-1)}} \quad \text{Ec. (21)}$$

Hallamos la Desviación estándar utilizando la ecuación (20)

$$\sigma = 2 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Si: $\bar{D} = 32.88 \times 10^{-2} \text{ mm}$, $t = 2$ y $\sigma = 2 \times 10^{-2} \text{ mm}$ entonces;

Usamos la ecuación (19) para hallar la Deflexión característica:

$$D_C = 32.88 \times 10^{-2} + 2 * 2 \times 10^{-2}$$

$$D_C = 40 \times 10^{-2}$$

➤ **Deflexión admisible máxima:**

$$D_{aM} = 1.5 \bar{D} \quad \text{Ec. (22)}$$

Usamos la ecuación (22)

$$D_a = 1.5 * 35.6$$

$$D_a = 53.4 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

➤ **Deflexión admisible mínima:**

$$D_{aC} = 1.5 \bar{D} \quad \text{Ec. (23)}$$

Usamos la ecuación (23)

$$D_{ac} = 0.5 * 35.6$$

$D_{ac} = 17.8 \times 10^{-2}$ mm. (Ver anexo 04 Método de análisis de viga Benkelman Calle N° 11, carril Izquierdo).

- **Método mecanístico empírico (VIGA BENKELMAN).**

En el análisis estadístico de cada una de las muestras, se realizó la medición de deflexiones utilizando la Viga Benkelman.

➤ **Medición de deflexiones con la viga Benkelman.**

La medición de las deflexiones utilizando la viga Benkelman en las calles N. ° 01, N. ° 07, N. ° 08 y N. ° 11 de la asociación Posada del Sol comenzó en la Progresiva 00+000. La metodología empleada se llevó a cabo de la siguiente manera: en primer lugar, se seleccionó la ruta en la que se determinarían las deflexiones. A continuación, se procedió a medir la distancia de los estacionamientos, la cual se estableció en 250 metros, teniendo en cuenta que, conforme a la Norma AASHTO 93 T256-01, en su apartado 9 "Localización y Frecuencia de Muestreo", dicha medición es de vital importancia. En total, se registraron 62 puntos de estacionamiento medidos con la viga Benkelman, abarcando una longitud total de 1. 40 kilómetros, actividad que se realizó en septiembre de 2024.

Para la medición de cada punto, se identificó la estación correspondiente y posteriormente se posicionó el camión en la ubicación requerida. A continuación, se colocó la viga Benkelman, asegurándose de calibrar el dial del micrómetro a cero (ver foto N° 23).

La lectura de la deformación máxima de deflexión se determina a una distancia inicial de cero, observándose una disminución de la deformación a medida que el camión se aleja, hasta alcanzar una distancia aproximada de 8

metros, conforme a lo establecido en la norma AASHTO T256 – 01, apartado 8. 4.

2. 3.

Los resultados obtenidos de las mediciones de deflexiones para cada estación del estudio se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30

Lecturas de deflexión con la Viga Benkelman.

DATOS DE ENSAYO CON LA VIGA BENKELMAN 1:2										
Calle	Carril	Progresiva	Do 0cm	D1 25cm	D2 50cm	Carril	Progresiva	Do 0cm	D1 25cm	D2 50cm
N° 01	DERECHO	00+010	44	30	26	IZQUIERDO	00+020	42	36	24
		00+030	38	32	28		00+040	36	28	26
		00+050	36	32	26		00+060	34	24	22
		00+070	44	36	30		00+080	42	32	28
		00+090	18	12	8		00+100	18	14	8
		00+110	38	36	16		00+120	40	32	26
		00+130	40	34	26		00+140	42	34	26
		00+150	44	32	24		00+160	46	36	32
		00+170	72	62	52		00+180	64	60	48
		00+190	42	36	30		00+200	38	26	24
		00+210	38	32	26		00+220	36	30	22
		00+230	46	40	32		00+240	42	38	26
N° 07	DERECHO	00+010	34	24	20	IZQUIERDO	00+000	36	28	22
		00+030	38	32	26		00+020	38	32	26
		00+050	14	12	8		00+040	34	24	20
		00+070	36	28	22		00+060	10	8	6
		00+090	32	24	18		00+080	36	26	20
		00+110	38	32	28		00+100	34	26	22
		00+130	34	26	22		00+120	38	32	28
		00+150	36	26	20		00+140	32	24	18
N° 08	DERECHO					IZQUIERDO	00+160	38	28	22
		00+010	40	26	20		00+020	38	28	22
		00+030	44	32	22		00+040	42	30	20
		00+050	38	28	22		00+060	39	25	18
		00+070	12	8	7		00+080	13	10	7

N° 11	DERECHO	00+090	42	26	20	IZQUIERDO	00+100	35	23	17
		00+110	46	34	28		00+120	41	25	19
		00+130	42	32	24		00+140	42	32	24
		00+150	36	24	18		00+160	34	22	17
		00+010	42	32	24		00+000	40	33	24
		00+030	39	32	20		00+020	42	36	28
							00+040	36	24	20

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se observa las lecturas de deflexión realizadas con la viga Benkelman a una distancia R en el carril derecho e izquierdo de las (calles N° 01, N° 07, N° 08 y N° 11).

Los valores de deflexión que se presentan en la Tabla 29 corresponden a los valores registrados en el micrómetro (Anexo 04) multiplicados por 2, en virtud de la relación de brazos 1:2 de la viga Benkelman empleada en la auscultación.

➤Correlación de datos.

En la presente tesis, la comparación y correlación de las deflexiones máximas, medidas mediante la viga Benkelman, tomará como datos muestrales las deflexiones registradas con dicho dispositivo. Una vez definido el espacio muestral y establecida la relación cuantitativa a través de la ecuación correspondiente, se podrá estimar o predecir el valor de una de las variables, específicamente la variable dependiente, en función de la otra, que será considerada como la variable independiente. En este contexto, la variable dependiente, cuyo valor se pretende estimar, corresponde al CBR (%) natural, que será designado con la letra "Y". Por otro lado, la variable independiente, cuya información ya se posee, será la deflexión máxima Do de la viga Benkelman, identificada con la letra "X".

➤Cálculo de la ecuación de regresión.

Una vez recopilada la serie bidimensional compuesta por los valores “X” e “Y” (considerando “X” como variable independiente y “Y” como variable dependiente), se procede a representarla en un sistema de ejes coordenados, donde la variable “X” se ubica en el eje de las abscisas y la variable “Y” en el eje de las ordenadas. Este conjunto de puntos, denotado como (X, Y), se identifica como "diagrama de dispersión". La forma que adopte el conjunto de puntos graficados permitirá definir la función que mejor describa su comportamiento.

A partir de los datos recolectados del porcentaje de CBR (%) natural y la deflexión de la viga Benkelman, se obtienen los pares ordenados que se presentan en la Tabla 31, junto con su correspondiente diagrama de dispersión, que se ilustra en la Figura 16.

Tabla 31

Pares ordenados de CBR (%) natural y Deflexión Máxima (Do) de la Viga Benkelman.

Calle	Carril	Progresiva	Nº	CBR % Natural Yi	Deflexión Máxima Xi
Nº 01	DERECHO	00+010	1	7.35	44
		00+030	2	6.85	38
		00+050	3	5.95	36
		00+070	4	7.25	44
		00+090	5	16.75	18
		00+110	6	6.15	38
		00+130	7	6.75	40
		00+150	8	6.75	44
		00+170	9	3.65	72
		00+190	10	7.05	42
		00+210	11	6.85	38
		00+230	12	7.25	46
	DERECHO	00+010	13	6.05	34
		00+030	14	7.15	38

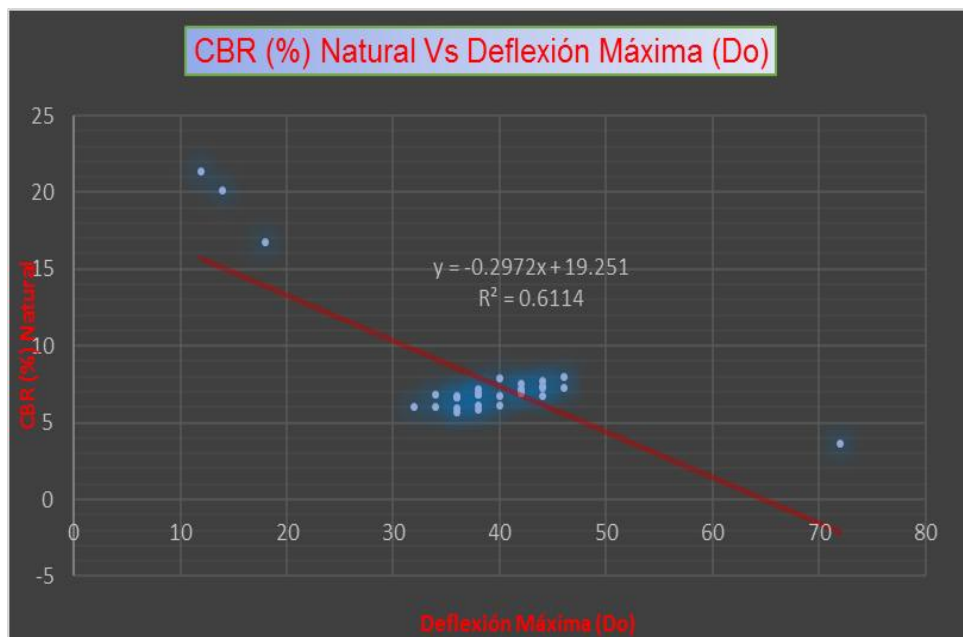
N° 07		00+050	15	20.15	14
		00+070	16	6.75	36
		00+090	17	6.05	32
		00+110	18	6.95	38
		00+130	19	6.85	34
		00+150	20	6.65	36
N° 08	DERECHO	00+010	21	6.15	40
		00+030	22	7.75	44
		00+050	23	5.85	38
		00+070	24	21.35	12
		00+090	25	7.15	42
		00+110	26	7.95	46
		00+130	27	7.55	42
		00+150	28	5.65	36
N° 11	IZQUIERDO		29	7.85	40
		00+010	30	6.95	42
		00+030	31	6.65	36

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se observa el CBR (%) natural y la deflexión máxima Do de la viga Benkelman (calle N° 01, N° 07, N° 08 y N° 11).

Figura 16

Diagrama de Dispersión CBR (%) natural Vs Deflexión Máxima (Do).



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se observa el CBR (%) natural en función de la deflexión máxima Do de la viga Benkelman (calle N° 01, N° 07, N° 08 y N° 11).

➤ Ecuación de correlación de CBR (%) en función de deflexión máxima (Do).

Con base en la disposición de los pares ordenados representados en el diagrama de dispersión, se puede afirmar de manera clara que es factible aplicar una relación lineal. A partir de esta constatación, se procede a definir la ecuación general de predicción correspondiente a una línea recta.

Seguidamente, se presenta la Tabla 32, que incluye los datos necesarios para el cálculo de la ecuación de correlación y sus respectivas constantes o factores.

Tabla 32

Cuadro de datos para el cálculo de la Correlación Definitiva en las zonas de estudio.

N°	Deflexión Máxim	CBR (%) Natura	1	Deflexión Máxim	CBR (%)	X_i^2	Y_i^2	$X_i \cdot Y_i$	St	Sr
----	--------------------	----------------------	---	--------------------	------------	---------	---------	-----------------	----	----

	a (Do) Xi	l Yi		a (Do)					
1	44.00	7.35		44.00	7.35	1936.00	54.02	323.4 0	0.345 1.386
2	38.00	6.85		38.00	6.85	1444.00	46.92	260.3 0	1.182 1.224
3	36.00	5.95		36.00	5.95	1296.00	35.40	214.2 0	3.949 6.764
4	44.00	7.25		44.00	7.25	1936.00	52.56	319.0 0	0.472 1.160
5	18.00	16.75	Calle N° 01	18.00	16.7 5	324.00	280.5 6	301.5 0	77.667 8.118
6	38.00	6.15		38.00	6.15	1444.00	37.82	233.7 0	3.194 3.263
7	40.00	6.75		40.00	6.75	1600.00	45.56	270.0 0	1.409 0.374
8	44.00	6.75		44.00	6.75	1936.00	45.56	297.0 0	1.409 0.333
9	72.00	3.65		72.00	3.65	5184.00	13.32	262.8 0	18.379 33.63 5
10	42.00	7.05		42.00	7.05	1764.00	49.70	296.1 0	0.787 0.080
11	38.00	6.85		38.00	6.85	1444.00	46.92	260.3 0	1.182 1.224
12	46.00	7.25		46.00	7.25	2116.00	52.56	333.5 0	0.472 2.794
13	40.00	7.85	Calle N° 07	40.00	7.85	1600.00	61.62	314.0 0	0.008 0.238
14	42.00	6.95		42.00	6.95	1764.00	48.30	291.9 0	0.974 0.033
15	36.00	6.65		36.00	6.65	1296.00	44.22	239.4 0	1.657 3.613
16	40.00	6.15		40.00	6.15	1600.00	37.82	246.0 0	3.194 1.468
17	44.00	7.75		44.00	7.75	1936.00	60.06	341.0 0	0.035 2.487
18	38.00	5.85		38.00	5.85	1444.00	34.22	222.3 0	4.356 4.436
19	12.00	21.35	Calle N° 08	12.00	21.3 5	144.00	455.8 2	256.2 0	179.90 32.10 6 1
20	42.00	7.15		42.00	7.15	1764.00	51.12	300.3 0	0.620 0.146
21	46.00	7.95		46.00	7.95	2116.00	63.20	365.7 0	0.000 5.624
22	42.00	7.55		42.00	7.55	1764.00	57.00	317.1 0	0.150 0.613
23	36.00	5.65		36.00	5.65	1296.00	31.92	203.4 0	5.231 8.414
24	34.00	6.05	Calle	34.00	6.05	1156.00	36.60	205.7 0	3.561 9.580

25	38.00	7.15	38.00	7.15	1444.00	51.12	271.70	0.620	0.650
26	14.00	20.15	14.00	20.15	196.00	406.02	282.10	149.15	25.60
27	36.00	6.75	36.00	6.75	1296.00	45.56	243.00	1.409	3.243
28	32.00	6.05	32.00	6.05	1024.00	36.60	193.60	3.561	13.614
29	38.00	6.95	38.00	6.95	1444.00	48.30	264.10	0.974	1.013
30	34.00	6.85	34.00	6.85	1156.00	46.92	232.90	1.182	5.268
31	36.00	6.65	36.00	6.65	1296.00	44.22	239.40	1.657	3.613
Σ			1180.00	246.05	48160.00	2421.62	8401.60	468.69	182.110

Fuente: Elaboración propia.

Nota: En la Tabla 32, se observa los datos del CBR (%) natural y la deflexión máxima Do de la viga Benkelman (calle N° 01, N° 07, N° 08 y N° 11), para el cálculo de la ecuación de correlación.

Al calcular el promedio de las columnas Xi y Yi de la Tabla 32, se obtuvo los siguientes resultados:

$$X_p = 38.065$$

$$Y_p = 7.937$$

En términos generales, la valoración estadística se enfocó en identificar la línea media que sintetiza la relación de dependencia entre la variable Y y las variables X. Este análisis persigue, con un doble propósito práctico, tanto la explicación o descripción causal de la variable dependiente como la previsión de los valores futuros de Y en función de valores específicos de X. (Martínez, 2005).

$$Y = bX + a \quad \text{Ec. 10.}$$

•Cálculo de los parámetros a= a0 y b=a1.

Se determinaron los parámetros a= a0 y b= a1, utilizando las Ecuaciones 02 y 03, así como los resultados presentados en la Tabla 32.

$$a_1 = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad \text{Ec. (02)}$$

$$a_1 = -0.297$$

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \bar{X} \quad \text{Ec. (03)}$$

$$a_0 = 19.251$$

• **Cálculo de la desviación estándar total S_y y el error estándar del estimado $S_{y/x}$.**

Se llevó a cabo la determinación del valor de S_t mediante la utilización de la Ecuación 04, basándose en los resultados presentados en la Tabla 32.

$$S_t = (Y_i - \bar{Y})^2; S_t = \left(Y_i - \frac{\sum Y_i}{n}\right)^2; \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n} = \bar{Y} = Y_p \quad \text{Ec. (04)}$$

$$S_t = 468.695$$

Se estableció el valor de S_r , correspondiente a la suma de los residuales, calculado de acuerdo con la ecuación (05). Este cálculo se fundamenta en los resultados presentados en la Tabla 32.

$$S_r = (Y_i - a_0) - ((a_1)X_i))^2 \quad \text{Ec. (05)}$$

$$S_r = 182.114$$

Se procedió al cálculo de la desviación estándar total, representada como S_y , conforme a lo estipulado en la ecuación (08), así como del error estándar del estimado $S_{y/x}$, formulado en la ecuación (09).

$$S_y = \left(\sum S_t / (n - 1)\right)^{0.5} \quad \text{Ec. (08)}$$

$$S_y = 3.953$$

$$S_{\frac{y}{x}} = (S_r / (n - 2))^{0.5} \quad \text{Ec. (09)}$$

$$S_{\frac{y}{x}} = 2.506$$

• **Cálculo del coeficiente de correlación (r_2) y el coeficiente de determinación (r).**

El coeficiente de correlación es un índice estadístico que cuantifica la relación lineal existente entre dos variables cuantitativas.

Apoyándonos en la Ecuación 06, $r_2 = \frac{\sum (S_t - S_r)}{\sum S_t}$, determinamos el coeficiente de correlación r_2 .

$$r_2 = 0.611$$

Apoyándonos en la Ecuación 07, $r = \sqrt{r_2}$, determinamos el coeficiente de determinación r .

$$r = 0.782$$

A continuación, se muestra en la Tabla 33, los valores de los parámetros de la correlación estudiada.

Tabla 33

Cuadro de valores de los parámetros de correlación.

$a_1 = b$	$a_0 = a$	r_2	r	Sy/X	Sy
-0.297	19.251	0.611	0.782	2.506	3.953

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se observa los valores de los parámetros de la ecuación de correlación.

Al sustituir los valores de los parámetros b y a en la Ecuación 10 ($Y = bX + a$), se obtiene la siguiente expresión:

$$Y = -0.297X + 19.251$$

De este modo, se concluye que: $Y = 7.937$.

A continuación, se presenta la ecuación de correlación definitiva entre los datos de Deflexión Máxima (Do) y el porcentaje de CBR (%) en su condición natural.

$$CBR = 19.251 - 0.297Do \quad \text{Ec. CORRELACION}$$

A través de la ecuación presentada, se procedió a determinar el CBR (%) in situ, también conocido como resistencia al corte, el cual se calcula utilizando la

deflexión máxima (Do). El objetivo de la correlación es estimar la variable dependiente (CBR) en función de la variable independiente (Do). Los dos parámetros estadísticos más relevantes que se utilizarán para evaluar las correlaciones en la presente investigación son el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (r^2).

El primer aspecto permitirá cuantificar la intensidad de la relación lineal entre dos variables. Un valor cercano a 1 indica una fuerte correlación lineal directa, mientras que un valor más próximo a -1 sugiere una notable correlación lineal inversa. Por otro lado, un valor de R igual a 0 indicará la ausencia de correlación entre las variables analizadas. (Vila et al, 2001).

El coeficiente de correlación de Pearson evalúa la existencia de correlación entre dos variables, así como la fuerza de dicha relación y su naturaleza, ya sea positiva o negativa.

El valor de este índice de correlación oscila en el intervalo $[-1, +1]$. En el caso en que $r = 0$, no se observa ninguna correlación, lo que implica una independencia total entre las dos variables; es decir, la variación de una de ellas no afecta en absoluto el valor que puede alcanzar la otra. Por otro lado, cuando $r = 1$, se presenta una correlación positiva perfecta, lo que indica una dependencia total entre las dos variables, conocida como relación directa: en este escenario, al incrementarse una de las variables, la otra también lo hace en proporciones idénticas. Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.

Si el coeficiente de correlación r es igual a -1, se establece una correlación negativa perfecta. Este índice indica una dependencia total entre las dos variables, que se denomina relación inversa; es decir, cuando una de las variables experimenta un aumento, la otra disminuye en una proporción idéntica.

Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.

Dado que el coeficiente de determinación r es igual a 0. 782, este valor indica una correlación positiva aproximada del 78. 2% entre el CBR (%) natural y la deflexión máxima (D_0) medida con la viga Benkelman. Según los principios estadísticos, se establece que un coeficiente de correlación superior a 0. 70 es considerado aceptable, dado que valores inferiores a este umbral revelan discrepancias significativas respecto al valor teórico definido por la ecuación de regresión. En consecuencia, dicha ecuación se torna imprecisa y de menor utilidad práctica.

•Homogeneidad y zonas débiles en la zona de estudio.

El análisis de la homogeneidad del comportamiento estructural del pavimento nos permitirá zonificar dicho comportamiento. Para llevar a cabo este análisis, será necesario realizar un deflectograma, así como establecer la tramificación según la deflexión característica observada.

•Deflectograma, tramificación y definición de zonas débiles o características.

Con el fin de establecer una tramificación de zonas homogéneas, se recomienda contar con una representación gráfica de las deflexiones, conocida como deflectograma. En la figura 17 se presenta el deflectograma correspondiente a las deflexiones obtenidas mediante la auscultación de la viga Benkelman. Asimismo, se encuentran disponibles los cálculos tabulados en la Tabla 34.

Es importante considerar que un tramo homogéneo, que exhiba tener una situación de manera uniforme, el cual tendrá sus deflexiones distribuidas de manera aleatoria y que están en el contexto de la media (m_d), ello debe seguir una distribución normal asimismo siguiendo una desviación típica muestral (s). De acuerdo a la experiencia inmensa de Europa y América del Norte en relación con

los aspectos de deflexiones medidas mediante diversos equipos para auscultar indica que, en estos espacios o tramos, es común encontrar coeficientes de (s/md) que oscilan entre 0. 20 y 0. 30. En tramos que poseen una uniformidad notable, se pueden observar valores inferiores a estos. Por otro lado, valores comprendidos entre 0. 30 y 0. 40 denotan una menor uniformidad, aunque aún se consideran aceptables. Sin embargo, si el coeficiente de variación de las deflexiones supera considerablemente el valor de 0. 40, no será posible considerar que el tramo presenta un comportamiento uniforme.

Anteriormente se procede a realizar la tramificación, es necesario considerar los siguientes criterios:

Los tramos homogéneos que presentan un comportamiento uniforme exhibirán valores de deflexiones que se distribuyen aleatoriamente alrededor del valor medio.

Se establece que, al menos el 95% del valor de las deflexiones debe situarse dentro de un intervalo que corresponde a una vez y media el valor medio de las deflexiones, así como a la mitad de dicho valor promedio ($0.5md < d_i < 1.5md$).

Se considerarán distintos los tramos que presenten valores medios disímiles. El coeficiente de variación de las deflexiones deberá ser inferior a 0. 40. Una vez que se hayan definido los tramos homogéneos, se procederá a su estudio individual, en el cual se establecerá un valor de deflexión que se considere representativo de la vía (subrasante). Es habitual utilizar un valor de deflexión característica, denotado como dk , el cual, bajo la suposición de que los valores de la deflexión se distribuyen de acuerdo con una curva de Gauss, estará determinado por la siguiente expresión.

$$dk = md + 2s \quad \text{..... Ec.24}$$

$$\text{Donde: } md = \sum d_i/n, s = \sum (d_i - md)^2/(n - 1)^{1/2}$$

md: media aritmética de las deflexiones.

d_i: la deflexión patrón, sin corregir por humedad y temperatura, del punto i.

n: el número de puntos medidos del tramo homogéneo.

Un ejemplo de una de las calles (calle N° 01, carril derecho) de la Asociación Posada del Sol se esquematiza en la Figura 17 (Ver Anexo 05).

●Análisis de zonas de homogeneidad y zonas débiles.

En primer lugar, se definirá la homogeneidad como la equivalencia, tanto cuantitativa como cualitativa, de diversos aspectos, tales como la deflexión característica (dk), la relación entre las deflexiones y la desviación estándar muestral (s), así como el comportamiento de las deflexiones correspondientes a cada estacionamiento.

Considerando la tendencia observada en los datos presentados en el deflectograma de la Figura 17, así como en los datos proporcionados en las tablas de cálculo de homogeneidad, tramificación y las áreas clasificadas como débiles y fuertes, contenida en la Tabla 34, se procede a la siguiente reflexión.

En la Tabla 34, se ha definido de manera cuantitativa la tramificación mediante un análisis exhaustivo. Una vez determinados los rangos permisibles, se llevó a cabo una observación puntual en los estacionamientos 00+090 y 00+170; los valores de deflexión obtenidos a través de ensayos (viga Benkelman) no se encontraban dentro de dicho rango. Por lo tanto, estas mediciones se han considerado como límites para la definición de la tramificación.

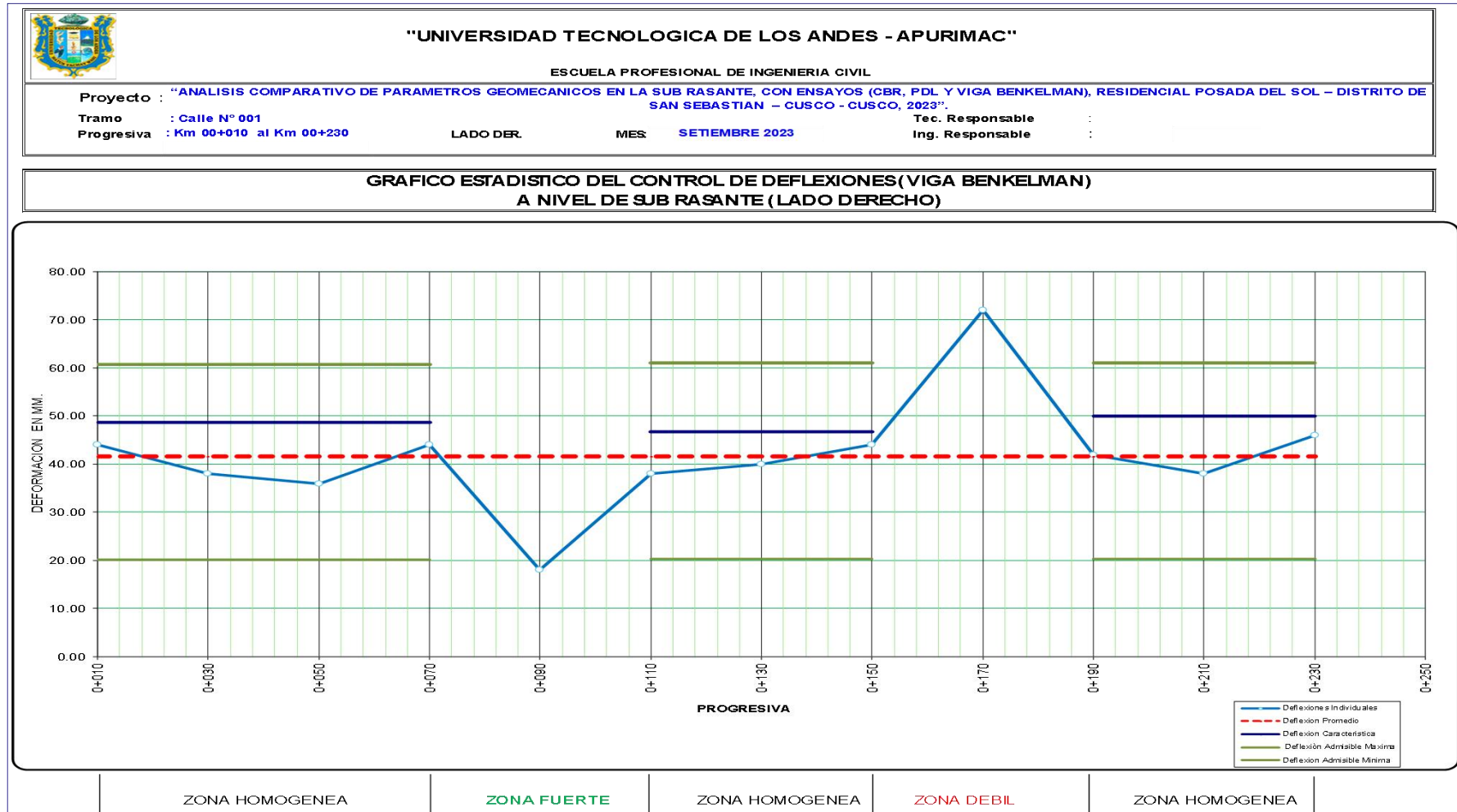
Se establecieron cinco tramos, en los cuales los estacionamientos mencionados fueron clasificados como Tramo dos y Tramo cuatro, respectivamente. Los tramos restantes fueron denominados Tramo 1, Tramo 3 y

Tramo 5. Los valores de deflexión característica y la relación s/m han sido determinados a partir de las deflexiones obtenidas en los diferentes estacionamientos, lo que ha permitido corroborar la homogeneidad general de la vía.

No obstante, la Figura 17 indica de manera clara que el tramo 2 debe considerarse como una zona fuerte en comparación con los demás tramos, dado que se encuentra por debajo del rango permisible de deflexiones, tal como se establece en la Tabla 34. Asimismo, el deflectograma evidencia un cambio en la tendencia del comportamiento de las deflexiones en relación con los diferentes estacionamientos. Por otro lado, el tramo 4 se clasifica como una zona débil, ya que excede el límite superior del rango de deflexiones permisibles indicado en la Tabla 34 y presenta un comportamiento incongruente en la tendencia observada en el deflectograma en comparación con los otros estacionamientos.

Figura 17

Deflectograma de la calle N° 01, carril derecho de la asociación Posada del Sol.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 34

Cálculo de Homogeneización, Tramificación, Zona Débil – Fuerte, de la calle N° 01, carril derecho de la asociación Posada del Sol.

N°	Progresiva	Deflexiones Individuales	Deflexiones Promedio (md)	Deflexiones Característica	Radio de Curvatura	(di-md)	(di-md) ²	Desviación Típica Muestral (S)	Deflexión característica (dk)	Rango de Deflexión		Relación s/md
										Mínima 0.5md	Máxima 1.5md	
1	0+010	44.00	41.00	48.75	223.21	3.50	12.25	4.12	48.75	20.25	60.75	0.10
2	0+030	38.00	41.00	48.75	520.83	-2.50	6.25	4.12	48.75	20.25	60.75	0.10
3	0+050	36.00	41.00	48.75	781.25	-4.50	20.25	4.12	48.75	20.25	60.75	0.10
4	0+070	44.00	41.00	48.75	390.63	3.50	12.25	4.12	48.75	20.25	60.75	0.10
5	0+090	18.00	41.00						ZONA FUERTE			
6	0+110	38.00	41.00	46.78	1562.50	-2.67	7.11	3.06	46.78	20.33	61	0.08
7	0+130	40.00	41.00	46.78	520.83	-0.67	0.44	3.06	46.78	20.33	61	0.08
8	0+150	44.00	41.00	46.78	260.42	3.33	11.11	3.06	46.78	20.33	61	0.08
9	0+170	64.00	41.00						ZONA DEBIL			
10	0+190	42.00	41.00	50.00	520.83	0.00	0.00	4.00	50.00	20.33	61	0.10
11	0+210	38.00	41.00	50.00	520.83	-4.00	16.00	4.00	50.00	20.33	61	0.10
12	0+230	46.00	41.00	50.00	520.83	4.00	16.00	4.00	50.00	20.33	61	0.10
Media (md)		41.66		Σ	101.67							

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Se observa la homogeneización, tramificación y zonas de deflexión realizadas con la viga Benkelman en calle N° 01, carril derecho de la asociación Posada del Sol.

5.2. Discusión de resultados

Conforme a los resultados obtenidos in situ, se optó por utilizar los datos de CBR correspondientes a muestras inalteradas para la caracterización de la Subrasante, dado que estos reflejan de manera más precisa las condiciones del suelo en la zona de investigación. De acuerdo con los resultados obtenidos in situ, se utilizó la cantidad de golpes que presenta resistencia a una profundidad de $N = 10$ cm para determinar el índice de PDL. Con base en los resultados obtenidos de los ensayos de CBR y PDL, se determinó la ecuación de correlación correspondiente a las calles N° 01, 07, 08 y 11, considerando la variable dependiente CBR y la variable independiente PDL, en la urbanización Posada del Sol, ubicada en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.

$$\text{CBR} = \frac{10.985}{(\text{PDL})^{0.116}} \quad \text{Ec. CORRELACION}$$

Con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9296$, se establece que la variable "PDL" corresponde al resultado obtenido del ensayo PDL in situ (Número de PDL en mm/golpe), lo que indica una alta confiabilidad en nuestros resultados. En la Tabla 26, titulada "Resultados de Correlación de CBR (%)" de la tesis, se puede observar que los valores oscilan entre 6.98 y 7.76 para las cuatro calicatas realizadas. Esta información sugiere que el suelo presenta características que varían de pobre a regular en términos de resistencia y capacidad portante, lo cual es pertinente para la evaluación de una estructura de pavimentación convencional.

A partir de los resultados obtenidos de la ecuación de correlación del CBR (%) para el presente proyecto, se llevó a cabo una comparación con las ecuaciones de correlación propuestas por diversos autores, como se detalla en la tabla 35. Es importante considerar las restricciones específicas asociadas al uso de cada ecuación, dado que todas las fórmulas están diseñadas para un tipo particular de suelo. Esta clasificación de suelos se ha realizado

conforme a las normativas SUCS y AASTHO. La clasificación del suelo para el presente proyecto incluye los tipos CL y SC. Para su determinación, se emplearon las ecuaciones propuestas por Webster S. L. et al. (1994), así como las pautas establecidas por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, Kleyn y Van Heerden, y el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Colombia (MOPT) en 1992. Se aplicarán estas fórmulas para el CBR inalterado, como se puede observar en las ecuaciones que se presentan a continuación.

Tabla 35

Correlación entre el número PDC Y CBR

ECUACION	AUTOR	OBSERVACION
$CBR(\%) = \frac{292}{DCP^{1.12}}$	Van Vuuren(1969)	Apta para todo tipo de suelos (Granulares y cohesivos)
$CBR(\%) = \frac{208}{DCP^{0.86}}$	Transport Road Research TRRL (1986).	Apta para todo tipo de suelos.
$CBR(\%) = \frac{1}{0.002871 * DCP}$	Webster S.L. et al. (1994)	Para suelos CH.
$CBR(\%) = \frac{1}{(0.017019 * DCP)^2}$	Webster S.L. et al. (1994)	Para suelos CL con CBR <10%.
$CBR(\%) = \frac{348.3}{DCP^{1.0}}$	Cuerpo de Ingenieros (USA)	Aplica a suelos CH.
$CBR(\%) = \frac{567}{DCP^{1.40}}$	MOPT Colombia (1992)	Todo tipo de suelos
$CBR(\%) = \frac{428.5}{DCP^{1.28}}$	Kleyn y Van Heeden	Todo tipo de suelos

Nota: Fuente: Norma ASTM D 6951 – 03.

En consecuencia, se presenta a continuación un cuadro resumen que incluye las fórmulas aplicadas de acuerdo con la Norma ATDM D 6951 – 03 y los principios establecidos por el autor Webster S. L. et al. (1994) para el cálculo de un índice de CBR. Este índice permitirá efectuar una comparación con los resultados obtenidos en la tesis y las observaciones realizadas en el campo.

Tabla 36

Cuadro Resumen de CBR. Según Transport Road Research TRRL (1986).

Muestra.	Ubicación.	Clasificación	Índice PDC (mm/golpe)	CBR (%) por Transport Road Research TRRL (1986).
CALICATA N° 01	Calle N° 01	CL	20.00	15.82
CALICATA N° 02	Calle N° 07	CL	50.00	7.19
CALICATA N° 03	Calle N° 08	SC	25.00	13.06
CALICATA N° 04	Calle N° 11	SC	33.33	10.20

Nota: En la Tabla 36, se observa el resultado de CBR (%), según la ecuación de correlación investigada por Transport Road Research TRRL (1986). Para los datos de PDL encontrados en las calles N° 01, 07,08 y 11 de la asociación Posada del Sol.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 37

Cuadro Resumen de CBR. Según Webster S.L. et. al. (1994)

Muestra.	Ubicación.	Clasificación	Índice PDC (mm/golpe)	CBR (%) por Webster S.L. et al. (1994)
CALICATA N° 01	Calle N° 01	CL	20.00	8.63
CALICATA N° 02	Calle N° 07	CL	50.00	1.38
CALICATA N° 03	Calle N° 08	SC	25.00	5.52
CALICATA N° 04	Calle N° 11	SC	33.33	3.11

Nota: En la Tabla 37, se observa el resultado de CBR (%), según la ecuación de correlación investigada por Webster S.L. et al. (1994). Para los datos de PDL encontrados en las calles N° 01, 07,08 y 11 de la asociación Posada del Sol.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 38

Cuadro Resumen de CBR. Según NORMA VUUREN 1969

Muestra.	Ubicación.	Clasificación	Índice PDC (mm/golpe)	CBR (%) por NORMA VUUREN 1969.
CALICATA N° 01	Calle N° 01	CL	20.00	10.19
CALICATA N° 02	Calle N° 07	CL	50.00	3.65

CALICATA N° 03	Calle N° 08	SC	25.00	7.94
CALICATA N° 04	Calle N° 11	SC	33.33	5.75

Nota: En la Tabla 38, se observa el resultado de CBR (%), según la ecuación de correlación investigada por NORMA VUUREN 1969. Para los datos de PDL encontrados en las calles N° 01, 07,08 y 11 de la asociación Posada del Sol.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 39

Cuadro Resumen de CBR. Según MOPT Colombia (1992)

Muestra.	Ubicación.	Clasificación	Índice PDC (mm/golpe)	CBR (%) por MOPT Colombia 1992
CALICATA N° 01	Calle N° 01	CL	20.00	8.55
CALICATA N° 02	Calle N° 07	CL	50.00	2.37
CALICATA N° 03	Calle N° 08	SC	25.00	6.26
CALICATA N° 04	Calle N° 11	SC	33.33	4.18

Nota: En la Tabla 39, se observa el resultado de CBR (%), según la ecuación de correlación investigada por MOPT Colombia 1992. Para los datos de PDL encontrados en las calles N° 01, 07,08 y 11 de la asociación Posada del Sol.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 40

Cuadro Resumen de CBR. Según Kleyn y Van Heerden

Muestra.	Ubicación.	Clasificación	Índice PDC (mm/golpe)	CBR (%) por Kleyn y Van Heerden
CALICATA N° 01	Calle N° 01	CL	20.00	9.26
CALICATA N° 02	Calle N° 07	CL	50.00	2.87
CALICATA N° 03	Calle N° 08	SC	25.00	6.96
CALICATA N° 04	Calle N° 11	SC	33.33	4.82

Nota: En la Tabla 40, se observa el resultado de CBR (%), según la ecuación de correlación investigada por Kleyn y Van Heerden. Para los datos de PDL encontrados en las calles N° 01, 07,08 y 11 de la asociación Posada del Sol.

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los resultados previamente obtenidos, a través de las ecuaciones propuestas por cada uno de los autores, será posible clasificar los suelos conforme a lo estipulado en el manual de laboratorio de suelos de ingeniería civil, tal como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 41

Clasificación de los suelos en función de la subrasante.

CBR (%)	Calificación	Uso	SUCS	AASHTO
0-3	Muy Pobre	Subrasante	CH, MH	A5, A6, A7
3-7	Pobre- Regular	Subrasante	CH, MH	A4, A5, A6, A7
7-20	Regular	Subrasante	CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Bueno	Base – Sub Base	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
>50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Nota: Fuente: Manual de laboratorio de suelos para ingeniería civil. Bowles J. (1980).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el suelo se clasifica con un Valor de CBR que oscila entre 3 y 7 para cada uno de los resultados obtenidos, lo que indica que se trata de un suelo de calidad deficiente a regular. Adicionalmente, la clasificación AASHTO presentada en la tabla anterior categoriza el suelo en siete grupos (A-1, A-2, . . . , A-7), en función de su granulometría y plasticidad. En términos más concisos, la clasificación se basa en el porcentaje de material que pasa a través de los tamices N° 200, 40 y 10, así como en la fracción que atraviesa el tamiz N° 40. Estos siete grupos se dividen en dos categorías principales de suelos: suelos granulares (en los cuales no más del 35% del material pasa por el tamiz N° 200) y suelos limo-arcillosos (donde más del 35% del material pasa por el tamiz N° 200). Este sistema de clasificación se fundamenta en los resultados obtenidos de las determinaciones en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico.

Tabla 42

Comparación de los CBR (%) Natural, CBR (%) tesis y otras investigaciones (Ec. de Correlación)

Ubicación	SUCS	CBR Natural (95% MDS)	Calificación	Índice PDL (mm/golpe)	CBR (%) Tesis	Calificación	TRRL	Calificación	Webster S.L.	Calificación	VUU REN	Calificación	MOPT	Calificación	Kleyn y Van Heerden	Calificación
Calle N° 01	CL	7.1	Regular	50.00	6.98	Pobre	15.82	Regular	8.63	Regular	10.19	Regular	8.55	Regular	9.26	Regular
Calle N° 07	CL	7.3	Regular	33.33	7.31	Regular	7.19	Regular	1.38	Muy Pobre	3.65	Pobre	2.37	Pobre	2.87	Pobre
Calle N° 08	SC	7.5	Regular	25.00	7.56	Regular	13.06	Regular	5.52	Pobre	7.94	Regular	6.26	Regular	6.96	Regular
Calle N° 11	SC	7.8	Regular	20.00	7.76	Regular	10.20	Regular	3.11	Regular	5.75	Pobre	4.18	Pobre	4.82	Pobre

Nota: En la Tabla 42, se observa la comparación de CBR (95% MDS) natural, CBR (%) tesis y CBR (%) de otras investigaciones (tabla N° 34), realizadas con el PDL o PDC en las calles N° 01, 07, 08 y 11 de la asociación Posada del Sol, del distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos in situ del modelo de carga, que incluyen la carga ejercida sobre una llanta (P), la presión de inflado (q), la distancia en la que se mide la deflexión DR (R), la deflexión máxima (Do) y la deflexión a la distancia R (DR), y utilizando el coeficiente de correlación para el cálculo de R5 y L0 en el modelo de Hogg, se determinó la longitud elástica (L0) y el módulo de elasticidad de la subrasante (E0).

En función de los resultados obtenidos del índice de CBR (%) y del método de análisis mediante la Viga Benkelman, basado en la metodología de Hogg, se determinó el CBR (%) para las calles N° 01, 07, 08 y 11. Este análisis se llevó a cabo tomando como variable dependiente el CBR (%) y como variable independiente la Viga Benkelman, en la urbanización Posada del Sol, ubicada en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.

Tabla 43

Cuadro resumen de resultados de CBR (%) según la metodología de Hogg.

Muestra / Ubicación	Carril	E0 (Kg/Cm ²)	CBR (%) Método Hogg
Calle N° 01	Derecho	632.69	6.00
	Izquierdo	650.63	6.00
Calle N° 07	Derecho	775.00	7.00
	Izquierdo	644.29	6.00
Calle N° 08	Derecho	1,033.35	9.00
	Izquierdo	1,094.13	10.00
Calle N° 11	Derecho	917.36	8.00
	Izquierdo	863.99	8.00

Nota: En la Tabla 43, se observa resumen de los resultados de CBR (%) según la metodología de Hogg en las calles N° 01, 07, 08 y 11 de la asociación Posada del Sol, del distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos in situ a partir de las lecturas de deflexión realizadas mediante la Viga Benkelman, se estableció una ecuación de correlación para las

calles número 01, 07, 08 y 11. Esta correlación se calcula en función de la variable dependiente, el CBR (%), y la variable independiente, la deflexión máxima (Do), en la urbanización Posada del Sol, ubicada en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.

$$\text{CBR} = 19.251 - 0.297\text{Do} \quad \text{Ec. CORRELACION}$$

Con un coeficiente de determinación de $r = 0.782$, este valor indica que existe una correlación positiva de aproximadamente el 78.2 % entre el CBR natural (%) y la deflexión máxima (Do) de la Viga Benkelman.

Tabla 44

				Cuadro Resumen de
Muestra / Ubicación	Carril	D0 (cm)	CBR (%) Método Hogg	Resultados de CBR (%)
Calle N° 01	Derecho	42	7.07	según la Ec. Correlación de Tesis.
	Izquierdo	40	7.37	
Calle N° 07	Derecho	44	7.22	
	Izquierdo	38	7.57	
Calle N° 08	Derecho	36	8.11	
	Izquierdo	35	8.86	
Calle N° 11	Derecho	33	9.52	
	Izquierdo	34	9.15	

Nota: En la Tabla 44, se observa resumen de los resultados de CBR (%) según la ecuación de correlación encontrada en la tesis de las calles N° 01, 07, 08 y 11 de la asociación Posada del Sol, del distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de lecturas de deflexión in situ utilizando la Viga Benkelman, y considerando los valores de CBR (%) junto con la

deflexión máxima (Do), se llevó a cabo un análisis de homogeneidad y de identificación de zonas débiles en las calles N° 01, 07, 08 y 11. Este análisis incluye los cálculos correspondientes a la homogeneización, la tramificación, así como la clasificación de las zonas fuertes y débiles en el área de estudio, situada en la urbanización Posada del Sol, en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.

VI. Conclusiones

•Se determinó la relación de los parámetros geomecánicos en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), en la Residencial Posada del Sol, distrito de San Sebastián-Cusco-Cusco, 2024, obteniendo las ecuaciones de correlación para el PDL y la viga Benkelman tal como se muestra a continuación.

$$\text{CBR} = \frac{10.985}{(\text{PDL})^{0.116}} \text{ y}$$

$$\text{CBR} = 19.251 - 0.297\text{Do}$$

Esto se debe al índice de penetración del cono dinámico, producido por la fuerza que ejerce el martillo deslizante en (mm/golpe) y a la deflexión máxima (Do) de la Viga Benkelman.

•Se encontró la correlación de los resultados en los parámetros geomecánicos en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), residencial Posada del Sol, distrito de San Sebastián – Cusco -Cusco, 2024. Obteniéndose una correlación inversa, esto se debe a que la recta correspondiente a la nube de puntos de la distribución es una recta decreciente en función a la línea de regresión $Y_c = a + bX$, con un índice de Pearson $r = 0.964$ para el PDL y $r = 0.782$ para la viga Benkelman, obteniendo una correlación fuerte cercano a 1, en consecuencia, se expresa lo siguiente: a mayor índice del PDL menor CBR (%) y a mayor deflexión máxima (Do) menor CBR (%)

•Se determinó las propiedades físicas en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), residencial Posada del Sol, distrito de San Sebastián – Cusco -Cusco,

2024, con el fin de verificar de que las propiedades físico mecánicas de la subrasante, influyen directamente en la resistencia que ofrece la subrasante al efectuar ensayos mecánicos y empíricos mecánicos, se identificó a través de laboratorio de mecánica de suelos el contenido de humedad, límites de asterberg, granulometría, capacidad portante, perfiles estratigráficos y clasificación de los suelos según las normas SUCS y AASTHO. Obteniendo como resultado suelos CL y SC, tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11.

Clasificación de suelos según SUCS/ AAHSTO

Muestra	Ubicación	Clasificación SUCS/AAHSTO	Descripción del Suelo
Calicata N° 01	Calle N° 01	Arcilla media plasticidad arenosa CL / A- 6 Suelo arcilloso	Arcillas inorgánicas de baja plasticidad, arcillas areno limosas.
Calicata N° 02	Calle N° 07	Arcilla media plasticidad arenosa CL / A- 6 Suelo arcilloso	Arcillas inorgánicas de baja plasticidad, arcillas areno limosas.
Calicata N° 03	Calle N° 08	Arena arcillosa SC / A-7-6 Suelo arcilloso.	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla, suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio).
Calicata N° 04	Calle N° 11	Arena arcillosa SC / A-6 Suelo arcilloso.	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla, suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio).

Nota: Se observa la clasificación de suelos de cada una de las calicatas según SUCS/AAHSTO, obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos INGELAB E.I.R.L. Fuente: Elaboración Propia. (Ver Anexo 03. Resultados de Laboratorio de Suelos CBR en muestras inalteradas).

•Se encontró las propiedades mecánicas en la subrasante con ensayos (CBR, PDL y Viga Benkelman), residencial Posada del Sol, distrito de San Sebastián – Cusco - Cusco, 2024., determinando que están estrechamente vinculados con el contenido de humedad, la capacidad portante de la subrasante (suelo), la deflexión máxima (Do) y el índice de penetración del PDL. Debido a que la capacidad de carga de los constituyentes

del suelo varía con el contenido de humedad del suelo y esta variación tiene lugar a lo largo del año, la deflexión de la subrasante no es constante, si la subrasante está saturada obtendremos mayor deflexión.

Observándose que el CBR (%) en estado natural AL 95% de MDS en la Tabla 14 varía entre 7.1 y 7.8 para las calles 01, 07,08 y 11, mientras que el CBR (%) para el PDL in situ en la Tabla 26 varía entre 6.98 y 7.76, y el CBR (%) para la Viga Benkelman en la Tabla 43 varía entre 6.00 y 10.00.

Tabla 14

Cuadro de Resumen de CBR en muestras inalteradas en estado natural.

Calicata N°	Ensayo	Humedad Optima (%)	Max. Densidad Seca (Kg/m3)	Expansión (%)	CBR al 95% de MDS (%)	CBR al 100% de MDS (%)
01	Estado	23.4	1,330	0.04	7.1	9.2
	Natural					
02	Estado	22.4	1,315	0.04	7.3	9.9
	Natural					
03	Estado	22.5	1,325	0.04	7.5	10.3
	Natural					
04	Estado	23.0	1,335	0.04	7.8	11.1
	Natural					

Nota: En la tabla 14 se observa los resultados de CBR (%) para cada una de las calicatas obtenidos por el laboratorio de mecánica de suelos INGELAB E.I.R.L

Fuente: Elaboración Propia. (Ver Anexo 03. Resultados de Laboratorio de Suelos CBR en muestras inalteradas).

Tabla 26

Cuadro Resumen de Resultados de Correlación de CBR (%) Tesis.

Muestra.	Ubicación.	Índice PDL (mm/golp e)	CBR (%) Tesis
CALICATA N° 01	Calle N° 01	50.00	6.98
CALICATA N° 02	Calle N° 07	33.33	7.31
CALICATA N° 03	Calle N° 08	25.00	7.56

CALICATA N° 04	Calle N° 11	20.00	7.76
-------------------	-------------	-------	------

Nota: En la tabla 26, se observa el índice de penetración PDL (mm/golpe) y el CBR (%) tesis según la ecuación de correlación encontrada de las calicatas N° 01,02, 03 y 04.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 43

Cuadro resumen de resultados de CBR (%) según la metodología de Hogg.

Muestra / Ubicación	Carril	E0 (Kg/Cm ²)	CBR (%) Método Hogg
Calle N° 01	Derecho	632.69	6.00
	Izquierdo	650.63	6.00
Calle N° 07	Derecho	775.00	7.00
	Izquierdo	644.29	6.00
Calle N° 08	Derecho	1,033.35	9.00
	Izquierdo	1,094.13	10.00
Calle N° 11	Derecho	917.36	8.00
	Izquierdo	863.99	8.00

Nota: En la tabla 43, se observa resumen de los resultados de CBR (%) según la metodología de Hogg en las calles N° 01, 07, 08 y 11 de la asociación Posada del Sol, del distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.

Fuente: Elaboración Propia.

VII. Recomendaciones

➤ Ampliar el número de ensayos y muestras analizadas para desarrollar uno o varios modelos de correlación más complejos entre los parámetros de PDL, viga Benkelman y el CBR y comprobar la correlación hallada en base a la norma AASHTO T256 – 01, tomando en cuenta la relación entre estos parámetros, su influencia en el comportamiento del suelo, el tipo y naturaleza del suelo de la zona de estudio, en vista que existe una variación con las correlaciones planteadas (ecuaciones que miden la capacidad de soporte de los suelos), como se muestra a continuación.

$$\text{CBR} = \frac{10.985}{(\text{PDL})^{0.116}} \quad \text{y}$$

$$\text{CBR} = 19.251 - 0.297D_o$$

➤ Utilizar en forma unificada las ecuaciones correspondientes, de acuerdo al tipo de suelo, se deberá efectuar estudios más exhaustivos que posibiliten una mejor apreciación de las propiedades de los mismos, basados en resultados estadísticos. La implementación del uso de métodos empíricos (PDL) y mecánicos empíricos (viga Benkelman) permitirá ajustes que mejorarán las correlaciones correspondientes.

➤ Que las ecuaciones de correlación presentadas en esta tesis no deben ser utilizadas indiscriminadamente, servirán únicamente para los tipos de suelos según la clasificación SUCS Arena limoso (SM) y para limos inorgánicos de baja compresibilidad (ML).

➤ Al momento de efectuar el ensayo de PDL i viga Benkelman in situ tener cuidado con el equipo para realizar cálculos precisos, dando a conocer que la utilización de estos métodos empíricos de penetración (PDL) para la evaluación de suelos es utilizada constantemente a nivel internacional para la determinación de la resistencia del suelo, del mismo modo en el

método empírico mecanístico es necesario medir deflexiones intermedias (DR1, DR2 etc.) que permitan definir el cuenco de deflexiones con el fin de determinar el módulo resiliente (Mr) lo cual puede realizarse mediante la ampliación a la metodología de Hogg.

VIII. Referencias

- Alvarez Benites, N. C., & Gutierrez Gallegos, J. A. (2019). *"Estudio experimental del efecto mecánico de un suelo arcilloso al adicionar polvo de caucho para aplicaciones geotécnica"*. Lima - Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/648723>
- Apaza, C. O. (2019). *"Incidencia de las patologías en la superficie y estructura del pavimento flexible, en la Av. Jorge Basadre Grohmann tramo calle 22 – Av. pinto – Tacna, 2018"*. Tacna: Universidad Privada de Tacna. Obtenido de <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1128>
- Atala, C. (2011). *Estudio Experimental sobre Correlaciones en suelos granulares finos (arenas) compactados, usando equipos de penetración*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Avila Baray, H. (2006). *Introducción a la Metodología de la Investigación*. Chihuahua, Mexico.
- Avila, J. F., & García García , A. (2017). *"Correlación del penetrómetro dinámico de cono (P.D.C.) con ensayo de relación de soporte de california (C.B.R.) para suelos en la localidad de Engativá de la ciudad de Bogotá, utilizando la norma del Instituto Nacional de Vías"*,. Bogotá Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/56bc6415-11d9-4333-a059-0b0763106f87/content>
- Bañón, B. L., & Beviá, G. J. (2000). *Manual de carreteras*. Alicante, España. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=189942>

- Bazán Galarreta, A. M. (2020). *"Correlación entre el CBR y el PDC en la determinación de la resistencia del suelo en la localidad de Moche"*. Trujillo - Perú.
- Bernal, A. (2016). *Desarrollo de un sistema de gestión de calidad en la fundación Iassos*. Universidad Libre Colombia, Bogota, Colombia. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10901/10359>
- Borja. (2021). *Correlación entre el CBR, DCP, las propiedades índice y mecánicas en los suelos granulares de la Parroquia San jose de Poaló del Canton Pillaro, Provincia de Tungurahua*. Tungurahua, Ecuador.
- Bruno, F. P. (2022). *"Zonificación de suelos para el diseño de cimentaciones superficiales en el sector choc choc, distrito de Moche, Trujillo, La Libertad"*. La libertad Perú. Obtenido de http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/10152/1/REP_JORDAN.FE%20RN%20INDEZ_ZONIFICACION.DE.SUELOS.pdf
- Fernandez, J. (2022). *Zonificación de suelos para el diseño de cimentaciones superficiales en el sector CHOC CHOC, distrito de Moche, Trujillo, La Libertad*. Universidad Privada Antenor Orrego, Moche - Trujillo, Perú. Obtenido de biblio_repositorio@upao.edu.pe
- Gonzáles, A. (2014). *Estabilización mecánica de suelos cohesivos a través de la utilización de cal - ceniza volante*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/1044>
- Gutierrez Sauñe, F. H., & Rojas Morales, H. F. (2020). *"Influencia de la adición de caucho granular en las características mecánicas de la subrasante en suelos cohesivos, Lima – 2020"*. Lima - Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/76304>

- Hugo Florencio Torres Merino, Castillo Morejón, J. A., Mena Garzon, L. E., & Guerero Cuasapaz, D. P. (2020). *“Correlación entre el penetrómetro dinámico de cono y la relación de soporte de california en campo para el suelo de subrasante de la Via Portoviejo-Manta”*. Ecuador. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/338680377>
- Julca Rodríguez, M. J. (2019). *"Análisis de la confiabilidad del ensayo de viga benkelman para establecer la condición estructural del pavimento de la Av. El Sol del distrito de Ate, 2019"*. Lima Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/48033>
- Llanos Sanchez, A. H., & Reyes Pérez, S. K. (2017). *“Ensayos california bearing ratio (CBR) de laboratorio y penetración dinámica de cono (PDC) en la localidad de PICSÍ”*. Pimentel – Perú. Obtenido de <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/4125/Llanos%20-%20Reyes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lupita, A. D., Delgado Romero Moserate, Ortiz Hernandez , E., & Delgado Gutierrez , D. (2019). *"Estudio para determinar la capacidad portante del suelo como parámetro geotécnico, aplicando el ensayo de cono dinámico de penetración (DCP)"*. Manabí - Ecuador. Obtenido de <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat/article/view/2193/2318>
- Mendez, G. S., & Amasifuen, C. J. (2020). *“Evaluación estructural de pavimento de la carretera Iquitos – Nauta con viga Benkelman, tramo km 16+300 - km 17+800”*. Iquitos: Universidad Científica del Peru. Obtenido de <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/1174>
- Mesco Huamán, Y. y. (2022). *“Comparación de la resistencia mediante el PDC y CBR en suelos de subrasante del circuito Valle de Salcca, Cusco 2021”*. Cusco - Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/88854>

- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Bogota, Colombia: Universidad Catolica de Colombia.
- MTC, M. d. (2016). *"Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial"*. peru: N° 660-2008-MTC/02. Obtenido de http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_1556.pdf
- Ortiz, C. A. (2021). *Correlación entre el CBR, DCP, las propiedades índice y mecánicas en los suelos granulares de la Parroquia San José de Poaló del Cantón Pillaro, Provincia de Tungurahua-Ambato – Ecuador - 2021*. Ambato – Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/33052/1/Tesis%20I.%20C.%201483%20-%20Borja%20Ort%C3%ADz%20Carlos%20Alberto.pdf>
- Perez Alarcon, G. C. (2021). *"Estudio sobre la correlación de resultados en los ensayos SPT, DPL; DPL y cono de arena en suelos arcillosos aplicado a edificaciones en la urbanización Villa del Norte, Chiclayo, Lambayeque 2021"*. Chiclayo - Lambayeque - Perú. Obtenido de <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/5828>
- Perez, R. (2016). *Estudio de Correlación entre los ensayos (DCP) penetrómetro dinámico de cono y (CBR) relación de soporte de califonia en los diferentes tipos de suelos*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23638>
- Riveros Lizana, P., & Taipe Matamoros, O. (2019). *"Análisis comparativo de parámetros geomecánicos a partir de ensayos DPL y Triaxial en suelos cohesivos de la ciudad universitaria de la universidad nacional de Huancavelica"*. Huancavelica Perú. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3220>

- Rodriguez, T. (2022). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio y cemento portland en la carretera departamental HU-108 tramo: Aeropuerto - Conchumayo - Churubamba, Huánuco - 2021*. Universidad Continental, Huanuco, Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12230>
- Rojas, J. L., & Palacios Parramo , C. I. (2023). “*análisis de la capacidad portante del suelo utilizando el penetrómetro dinámico liviano (DPL) en el AA HH, ampliación primavera iii del distrito de la esperanza, provincia de Trujillo departamento de la Libertad*”. Trujillo - Perú. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/33406>
- Torres Merino, C. M. (2020). *CORRELACIÓN ENTRE EL PENETRÓMETRO DINAMICO DE CONO Y LA RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA EN CAMPO PARA EL SUELO DE SUB RASANTE DE LA VIA PORTOVIEJO - MANTA*. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Portoviejo-Manta, Venezuela.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes