

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Una Institución Adventista

Determinación del módulo elástico a partir del ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) y la ecuación de la teoría de la elasticidad del ensayo de Placa de Carga para suelos finos de subrasante de los pavimentos flexibles

Por:

Miguel Angel Geronimo Correa

Asesor:

Ing. Miguel Ángel Galarreta Chávez

Lima, mayo de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORIA DEL INFORME DE TESIS

Ing. Miguel Ángel Galarreta Chávez, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "Determinación del módulo elástico a partir del ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) y la ecuación de la teoría de la elasticidad del ensayo de Placa de Carga para suelos finos de subrasante de los pavimentos flexibles" constituye la memoria que presenta el Bachiller Miguel Angel Geronimo Correa para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Civil ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en la ciudad de Lima, a los 1 días del mes de junio del año dos mil veinte.


Asesor:
Ing. Miguel Ángel Galarreta Chávez

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a.....los.....28.... día(s) del mes de.....mayo.....del año 2020..... siendo las....18:00.....horas, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado:Mg. Leonel Chahuares Paucar,..... el secretario..... Ing Ferrer Canaza Rojas..... y los demás miembros:..... Ing Roberto Roland Yoctún Rios e Ing. Reymundo Jaulis Palomino..... y el asesor...Ing Miguel Ángel Galarreta Chávez con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: ...” Determinación del módulo elástico a partir del ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) y la ecuación de la teoría de la elasticidad del ensayo de Placa de Carga para suelos finos de subrasante de los pavimientos flexibles”.

.....de el(los)/la(las) bachiller(es): a).....**MIGUEL ANGEL GERONIMO CORREA.....**

.....b)
conducente a la obtención del título profesional de

INGENIERO CIVIL.....

(Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a):...**MIGUEL ANGEL GERONIMO CORREA**


CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	17	DIECISIETE	MUY BUENO	SOBRESALIENTE

Candidato (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente Mg. Leonel Chahuares Paucar				 Ing. Ferrer Canaza Rojas SECRETARIO
Asesor Ing. Miguel Ángel Galarreta Chávez		Miembro Ing. Reymundo Jaulis Palomino		Miembro Ing. Roberto Roland Yoctun Rios
Candidato/a (a)				Candidato/a (b)

Dedicatoria

A Dios

Por la ayuda que me brinda día a día para lograr mis objetivos y por tener una familia hermosa.

A mi madre

A mi madre Eulogia, por ser la persona que me apoyó en todos mis sueños y me brindó el amor maternal y fraternal.

Agradecimientos

Mi gratitud para la empresa TCINGE S.A.C. a sus representantes Carlos Tupia C. y Percy Tupia C. por el apoyo del desarrollo de la tesis. A mi madre Eulogia, a mis hermanas Gladys y Blanca, a mi asesor Miguel Galarreta, a mis amigos Aldo, Johan, Erick, Levinson, Carlos y Juan, finalmente agradecer al programa de estado Beca 18 de PRONABEC por la gran oportunidad de estudiar la carrera profesional de Ingeniería Civil en la Universidad Peruana Unión.

Índice General

Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Índice de anexos	xiii
Símbolos usados	xiv
Palabras clave	xv
Resumen	xvi
Abstract.....	xvii
CAPITULO I: El problema	18
1.1 Identificación del Problema.....	18
1.2 Formulación del problema.....	19
1.2.1 Pregunta general	19
1.2.2 Preguntas específicas.....	19
1.3 Justificación	20
1.3.1 Justificación teórica	20
1.3.2 Justificación metodológica	20
1.3.3 Justificación práctica	20
1.4 Presuposición filosófica.....	21
1.5 Alcances y limitaciones	22
1.6 Objetivos.....	22
1.6.1 Objetivo general	22
1.6.2 Objetivos específicos.....	23
CAPITULO II: Marco Teórico.....	24

2.1	Antecedentes de la investigación.....	24
2.1.1	Antecedentes internacionales	24
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	25
2.2	Base teórica científica.....	27
2.2.1	El suelo y su origen	27
2.2.1.1	Rocas ígneas	28
2.2.1.2	Rocas sedimentarias.....	29
2.2.1.3	Rocas metamórficas.....	30
2.2.1.4	Suelos residuales.....	30
2.2.1.5	Tamaño de partícula de suelo	31
2.2.2	Elasticidad en los cuerpos	33
2.2.2.1	Teoría de Joseph Valentín Boussinesq.....	35
2.2.3	Ensayo placa de carga.....	37
2.2.3.1	Materiales y/o equipos	38
2.2.3.2	Procedimiento de ensayo	38
2.2.3.3	Reporte de datos.....	41
2.2.4	Ensayo de California Bearing Ratio (CBR) of laboratory	41
2.2.4.1	Materiales y/o equipos	42
2.2.4.2	Muestra para el ensayo	43
2.2.4.3	Procedimiento de ensayo	43
2.2.4.4	Reporte de datos.....	47
2.3	Metodologías para determinar el Módulo Elástico	49
2.4	Definición de términos	51

CAPITULO III: Materiales y métodos.....	53
3.1 Descripción de lugares donde se obtuvo la muestra.....	53
3.2 Población y muestra.....	53
3.2.1 Población	53
3.2.2 Muestra	53
3.3 Marco metodológico.....	54
3.4 Diseño de contrastación de la hipótesis.....	55
3.5 Tipo de investigación.....	55
3.6 Hipótesis	56
3.6.1 Hipótesis general	56
3.6.2 Hipótesis específicos	56
3.7 Definición y medición de variables	56
3.7.1 Operacionalización de variables.....	58
3.8 Instrumentos y formato de recolección de datos	59
3.9 Técnicas de recolección de datos, instrumentos y validación de instrumentos.....	59
3.10 Plan de procesamiento de datos.....	59
3.11 Metodología de cálculo del módulo elástico mediante la determinación de dos correlaciones matemáticas en comparación con las metodologías mecanísticas y/o empíricas del cálculo del módulo elástico.....	60
3.11.1 Determinación de los coeficientes de proporcionalidad	60
3.11.2 Determinación de la correlación entre el valor de CBR y el módulo elástico	61

3.11.3	Comparación con otras correlaciones existentes	61
CAPITULO IV: Resultados y discusión		62
4.1	Resultados del ensayo de análisis granulométrico	62
4.2	Resultados del ensayo de Limites de Consistencia	62
4.3	Resultados de la tipología de suelo fino según SUCS y AASTHO	62
4.4	Resultados del ensayo de Proctor y CBR.....	62
4.5	Resultados del análisis matemático para determinar los módulos elásticos mediante el ensayo de CBR y la ecuación de la teoría de la elasticidad.....	64
4.6	Determinación del módulo elástico por cada muestra evaluada	64
4.7	Resultados de la correlación matemática propuesta en comparación con las metodologías del cálculo del módulo elástico.....	68
CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones.....		72
5.1	Conclusiones.....	72
5.2	Recomendaciones	74
CAPITULO VI: Referencias		75
CAPITULO VII: Anexos		77

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Ejemplos de rocas detríticas con textura clástica</i>	29
Tabla 2 <i>Ejemplos de rocas sedimentarias químicas</i>	30
Tabla 3 <i>Límites de separación de tamaño de suelo</i>	31
Tabla 4 <i>Penetraciones para el ensayo CBR</i>	46
Tabla 5 <i>Cargas patrones para determinadas penetraciones</i>	47
Tabla 6 <i>Valores del Módulo Elástico (Es) para cada tipo de suelo</i>	51
Tabla 7 <i>Operacionalización de variables</i>	58
Tabla 8 <i>Resumen de resultados del análisis granulométrico</i>	62
Tabla 9 <i>Resumen de resultados de los ensayos de Límites de Consistencia</i>	63
Tabla 10 <i>Resumen de resultados de clasificación de suelos</i>	63
Tabla 11 <i>Resumen de resultados del ensayo Proctor Estándar y CBR</i>	64
Tabla 12 <i>Resumen de módulos elásticos determinado para cada muestra con coeficiente de Poisson 0.3</i>	66
Tabla 13 <i>Resumen de módulos elásticos determinado para cada muestra con coeficiente de Poisson 0.4</i>	66
Tabla 14 <i>Resumen de esfuerzos y deformaciones para cada muestra con coeficiente de Poisson 0.3 y 0.4</i>	67

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo de rocas. <i>Fuente: Fundamento de ingeniería geotécnica (2014)</i>	28
Figura 2. Series de reacción de Bowen. <i>Fuente: Fundamento de ingeniería geotécnica (2014)</i>	29
Figura 3. Conformación de la lámina silícica. <i>Fuente: Mecánica de suelos y cimentaciones (2008)</i>	33
Figura 4. Conformación de la lámina alumínica. <i>Fuente: Mecánica de suelos y cimentaciones (2008)</i>	33
Figura 5. Esfuerzos aplicados a un cuerpo paralelepípedo. <i>Fuente: problemas fundamentales de elasticidad en suelos (2017)</i>	34
Figura 6. Esfuerzos en un medio elástico causados por una carga puntual. <i>Fuente: Fundamento de ingeniería geotécnica (2014)</i>	36
Figura 7. Representación típica de los equipos y/o materiales para la aplicación del ensayo carga de placa. <i>Fuente: ASTM D 1194-94</i>	40
Figura 8. Materiales y/o equipos para el ensayo de CBR. <i>Fuente: ASTM D 1883-07</i>	43
Figura 9. Proceso de conformación de suelo para el ensayo de CBR. <i>Fuente: Manual de ensayo de materiales (2016)</i>	46
Figura 10. Curva de presiones versus penetraciones y puntos de inflexión. <i>Fuente: ASTM D 1883-07</i>	48
Figura 11. Densidad seca versus CBR. <i>Fuente: ASTM D 1883-07</i>	48
Figura 12. Correlaciones entre el Modulo elástico y el ensayo de CBR. <i>Fuente: Correlation betwwn the results of the PLT and CBR tests to determine the elasticity modulus (2016)</i> .	49
Figura 13. Metodología de la investigación para determinar el Módulo Elástico de los suelos finos de subrasante. <i>Fuente: Elaboración Propia</i> .	55

Figura 14. Curva de penetración típica del ensayo de CBR para la muestra C-11 / M-2 del Proyecto San Jerónimo, coeficiente de Poisson 0.3. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	65
Figura 15. Curva de penetración típica del ensayo de CBR para la muestra C-11 / M-2 del Proyecto San Jerónimo, coeficiente de Poisson 0.4. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	65
Figura 16. Regresión lineal para determinar la correlación numérica del Módulo Elástico con coeficiente de Poisson 0.3. <i>Fuente: Elaboración Propia.</i>	69
Figura 17. Regresión lineal para determinar la correlación numérica del Módulo Elástico con coeficiente de Poisson 0.4. <i>Fuente: Elaboración Propia.</i>	70
Figura 18. Abaco de curvas para determinar el modulo elástico según las investigaciones, coeficiente de Poisson 0.3. <i>Elaboración: Fuente Propia.</i>	70
Figura 19. Abaco de curvas para determinar el modulo elástico según las investigaciones, coeficiente de Poisson 0.4. <i>Elaboración: Fuente Propia.</i>	71

Índice de anexos

Anexo 1. Planos de ubicación	77
Anexo 2. Panel Fotográfico	78
Anexo 3. Memoria de cálculo	79
Anexo 4. Formatos de ensayos	80
Anexo 5. Certificado de ensayos de laboratorio.....	81
Anexo 6. Certificados de calibración de equipos	82
Anexo 7. Certificado de Título Técnico del participante en la investigación	83
Anexo 8. Matriz de consistencia	84

Símbolos usados

SUCS: Sistema Unificados de Clasificación de Suelos

AASTHO: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes

PLT: Prueba de Placa de Carga

E_s: Módulo de elasticidad o de Young

CBR: Relación de Soporte de California

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

FEM: Metodología por elementos finitos

$\Delta\delta$: Deformación.

σ : Esfuerzo aplicado.

B: Ancho de la placa que aplica la carga.

V: Coeficiente de Poisson.

I: Coeficiente de forma para la placa.

E_{CBR}: Módulo elástico mediante el CBR.

Palabras clave

Subrasante: Suelo natural donde recaen las cargas de las capas estructurales del pavimento y cargas vehiculares.

Suelo fino: Suelo con más del 50% pasante de la malla N° 200 del ensayo de análisis granulométrico, según SUCS. Este tipo de suelo es complejo debido a su inestabilidad con la presencia de agua.

Módulo Elástico: Relación entre el esfuerzo y deformación de un tipo de cuerpo.

Relación de Soporte de California: Ensayo normalizado para determinar la capacidad de soporte del suelo.

Coefficiente de Poisson: Relación de entre las deformaciones longitudinales entre el sentido perpendicular de una fuerza aplicada.

Esfuerzo: Carga aplicada sobre una determinada área.

Deformación: Relación entre un asentamiento parcial y el asentamiento total.

Resumen

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) existen dos tipos de suelos: Suelos granulares y Suelos finos, esta última presenta complejidades debido a su composición de finos (Limos y Arcillas) e inestabilidad al contacto con el agua. Los suelos finos se encuentran en las tres regiones del Perú, principalmente en la Selva y Costa; debido a su formación geológica. Los suelos son las fundaciones sobre las cuales se construyen los pavimentos y en ellas se encuentran diferentes tipos de deterioro, principalmente fallas por asentamientos, deterioros en capas de rodadura, etc. Para evitar estos deterioros se debe realizar un adecuado diseño de pavimento flexible.

Para el diseño de pavimentos flexibles intervienen diferentes variables, entre las principales se encuentra el módulo elástico de los suelos de subrasante. Para determinar este módulo se puede hacer uso de ensayos en los laboratorios de mecánica de suelos con equipos factibles, como lo presentado en esta investigación. Se recurre a seguir la metodología propuesta en esta investigación, iniciando desde la identificación de los tipos de suelos finos, sus capacidades de soporte de CBR y posteriormente la evaluación teórica de la elasticidad planteada y usada en el ensayo de Placa de Carga. Posteriormente se determinó las correlaciones numéricas a partir de las evaluaciones de Módulos Elásticos versus el CBR al 95% de la Máxima Densidad Seca del Proctor. Finalmente se realizó el cálculo de módulos elásticos a partir de la correlación numérica hallada y comparada en un ábaco de curvas con las metodologías existentes. De esta manera se propuso una nueva metodología y correlaciones para suelos finos de los pavimentos flexibles.

Abstract

According to the Unified System of Classification of Soils (SUCS) there are two types of soils: Granular soils and fine soils, the latter presents complexities due to its composition of fines (Limos and Clays) and instability in contact with water. Fine soils are found in the three regions of Peru, mainly in the Jungle and Coast; Due to its geological formation. The soils are the foundations on which the pavements are built and in them there are different types of deterioration, mainly failures due to settlements, deterrents in rolling layers, etc. To avoid these deteriorations an adequate design of flexible pavement must be carried out.

Different variables are involved in the design of flexible pavements, the elastic module of the subgrade floors being among the main ones. To determine this module, tests can be used in soil mechanics laboratories with feasible equipment, as presented in this research. The methodology proposed in this research is used, starting from the identification of the types of fine soils, their CBR support capacities and subsequently the theoretical evaluation of the elasticity raised and used in the Load Plate test. Subsequently, the numerical correlations are determined from the evaluations of Elastic Modules versus CBR at 95% of the Maximum Dry Density of the Proctor. Finally, the calculation of elastic modules is carried out based on the numerical correlation found and compared in an abacus of curves with the existing methodologies. In this way a new methodology and correlations for fine floors of flexible pavements were proposed.

CAPITULO I: El problema

1.1 Identificación del Problema

A nivel nacional, los pavimentos flexibles en distintas regiones del Perú se han incrementado debido a la necesidad de transporte de personas y vehículos para satisfacer las necesidades de la población tales como la educación, trabajo, alimentación y salud. Estos incrementos de vías de transporte generan altos costos en su construcción y en su mantenimiento durante su vida útil de diseño, sin embargo, el deterioro que puedan tener no solo puede darse en la superficie del pavimento (capa de rodadura y carpeta asfáltica) sino también en la estructura (capas de pavimento). Estos problemas de post construcción suceden a menudo en los pavimentos cuya subrasante presenta suelos finos, generando impactos negativos económicos, tales como inversiones en rehabilitaciones o mejoramiento de las vías, también aislación de la población por deterioro de vías de transporte.

El suelo fino y en muchos casos la arcilla es uno de los más complejos dentro de la clasificación de tipos de suelos debido a que presenta plasticidad al contacto con el agua. Este suelo es encontrado en distintos lugares del territorio peruano, por ejemplo, en el departamento de Lima, en el distrito de Puente Piedra, San Juan de Lurigancho, entre otros; también en otros departamentos como Ucayali, Amazonas, Rioja, etc. Conocer sus características físicas y mecánicas es muy complejo, es por ello que existen metodologías empíricas para determinarlos, como también ensayos de laboratorio de mecánica de suelos. En la ingeniería geotécnica con mención al diseño de pavimentos se evalúa dichas características con fin de determinar la estructura del pavimento.

El diseño de pavimento se basa en métodos Empíricos y/o Mecanísticos, ambos métodos se basan en evaluar el diseño de pavimento en función de la capa de subrasante, en la cual se determina las características físicas y mecánicas del suelo, para luego proceder a

determinar los espesores de capas superiores. Entre las características mecánicas, se encuentra el Módulo Elástico, dicho módulo debe ser obtenido mediante el ensayo Triaxial o Placa de carga, los cuales no están disponibles en la mayoría de laboratorios a nivel nacional o en el caso de ser muy importante solicitar dichos ensayos entonces generan costos elevados.

Debido a la falta de obtener el Módulo Elástico del suelo de subrasante, mediante los ensayos mencionados en el párrafo anterior, la ingeniería geotécnica suele utilizar correlaciones estandarizadas según el tipo de suelo para determinar este factor. Esto puede generar en ciertos casos deficiencias en la estructura del pavimento, tales como deformaciones verticales, debido a que las grandes tensiones se dan en la capa de subrasante.

Puesto que en el Perú no es factible obtener un Módulo Elástico real de la capa de suelo fino de subrasante del pavimento, es posible obtenerlo mediante una ecuación de correlación a partir del Valor de la Capacidad de Soporte de California (CBR) en función a una escala reducida del ensayo de Placa de carga. El ensayo de CBR está disponible y su costo es factible en los laboratorios nacionales.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Pregunta general

¿Cómo determinar el Módulo Elástico mediante el Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) y la ecuación de la teoría de la elasticidad del Ensayo de Placa de carga para suelos finos de subrasante de los pavimentos flexibles?

1.2.2 Preguntas específicas

- ¿Cuál es el esfuerzo aplicado por el pisón de la prensa de compresión del ensayo de CBR que permitirá determinar el Módulo Elástico?

- ¿Cuál es la deformación del suelo fino de la subrasante aplicando el ensayo CBR que permitirá determinar el Módulo Elástico?
- ¿Cuál es el Módulo Elástico que se determina a partir del conjunto de coeficientes de proporcionalidad luego de la aplicación del ensayo CBR y la ecuación de la teoría de la elasticidad del Ensayo de Placa de Carga?
- ¿Cómo proponer la metodología de cálculo del Módulo Elástico mediante la determinación de una correlación matemática en comparación con las metodologías mecánicas y/o empíricas del cálculo del módulo elástico?

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación teórica

Aplicar el modelo teórico del análisis estático en el esfuerzo versus deformación de un suelo fino. La aplicación se realizó en suelos finos de la subrasante, debido a que es el suelo natural donde recaen las cargas de un pavimento.

1.3.2 Justificación metodológica

La investigación buscó mejorar y proponer la metodología para evaluar la determinación del módulo elástico del suelo fino de la subrasante, por medio de un criterio de análisis estático que proviene de una correlación entre el ensayo CBR en laboratorio y la ecuación de teoría de la elasticidad del Ensayo Placa de carga (ensayo in situ), basado en pequeñas deformaciones.

1.3.3 Justificación práctica

La investigación a realizarse trajo un aporte fundamental al diseño de la estructura de pavimentos ya que presentó una condición mecánica, evaluando pequeñas deformaciones. Por lo tanto, sirve para criterios de ingeniería, puesto que el ensayo CBR está a libre disposición de los laboratorios de mecánica de suelos a nivel nacional e internacional, y la

ecuación de la teoría de la elasticidad del Ensayo Placa de carga está considerado en la bibliografía que parte del principio de la teoría de elasticidad en los cuerpos.

Los suelos finos son aquellos que presentan mayor complejidad debido a su inestabilidad al contacto con el agua, ya que es más propensa a sufrir deformaciones sobre todo en pavimentos donde las cargas son cíclicas. Evaluar estos suelos finos es importante, ya que, en nuestro país, las regiones costa, sierra y principalmente la selva presenta estos tipos de suelos, donde los pavimentos son el principal medio de comunicación.

La evaluación en condiciones mecánicas que se pueda dar en la subrasante de un suelo fino permite que la ingeniería geotécnica evalúe al suelo en una condición crítica, ya que en el método tradicional de diseño empíricos teóricos consideran criterios en base a ecuaciones que fueron determinadas a partir de correlaciones estándares aplicadas en laboratorio. Por lo tanto, un suelo necesita ser evaluado en situaciones críticas tal como se aplica el ensayo CBR y determinar un módulo elástico tal como se aplica con la ecuación de la teoría de la elasticidad del ensayo Placa de Carga.

1.4 Presuposición filosófica

El comienzo de toda infraestructura se da en el suelo donde se va a cimentar, el suelo es aquella capa que puede presentar una infinidad de características mecánicas, físicas y químicas, motivo por lo cual hace que la investigación se centre en ella y abra pasos a nuevos descubrimientos para la ingeniería geotécnica. Braja M. Das (2014) menciona: “La mecánica de suelos es la aplicación de la ciencia física que se ocupa del estudio de las propiedades físicas del suelo y el comportamiento de las masas de suelos sometidos a diferentes tipos de fuerzas. La ingeniería geotécnica es la rama de la ingeniería civil que enfoca su estudio en las propiedades mecánicas e hidráulicas de suelos y rocas, tanto en superficie como en el subsuelo, incluyendo a la aplicación de los principios de la mecánica de suelos y mecánica

de rocas en el diseño de los cimientos, estructuras de contención y las estructuras de tierra” (p. 1).

Al considerar que el suelo es el punto de inicio para la construcción de cualquier infraestructura, entonces parte del conocimiento de la ingeniería geotécnica ya que ella es la que aplica los principios de la mecánica de suelos y rocas y la que afronta los nuevos retos de la comprensión de la complejidad de suelos. Por lo tanto, el deber del ingeniero geotécnico es velar por la aplicación de los principios de la mecánica de suelos e investigar el suelo en su complejidad usando los recursos disponibles.

1.5 Alcances y limitaciones

Los suelos granulares que se encuentran en la subrasante no son aplicados en esta investigación debido a presentan mejor estabilidad que los suelos finos.

La investigación tiene el alcance de evaluar solamente un comportamiento estático de los suelos finos. En la evaluación se permite determinar una correlación entre un ensayo de laboratorio y la aplicación de una ecuación utilizada en campo, es decir, evaluar una condición real de un suelo fino. Se aplicó una validación de datos mediante las metodologías que permiten determinar los módulos elásticos en los suelos con fines de diseño de pavimentos.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Determinar el Módulo Elástico a partir del ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) y la ecuación de la teoría de la elasticidad del ensayo de Placa de carga para suelos finos de subrasante de los pavimentos flexibles.

1.6.2 Objetivos específicos

- Determinar el esfuerzo aplicado por el pisón de la prensa del ensayo de CBR para determinar el Módulo Elástico.
- Determinar la deformación del suelo fino de la subrasante aplicando el ensayo CBR para determinar el Módulo Elástico.
- Determinar el módulo elástico a partir del conjunto de coeficientes de proporcionalidad luego de la aplicación del ensayo CBR y la ecuación de la teoría de la elasticidad del Ensayo de Placa de carga.
- Proponer la metodología de cálculo del Módulo Elástico mediante la determinación de una correlación matemática en comparación con las metodologías mecánicas y/o empíricas del cálculo del módulo elástico.

CAPITULO II: Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Los antecedentes a nivel internacional realizados a la evaluación para determinar un módulo elástico en los suelos se han desarrollado en base a ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y ensayos in situ. El ingeniero civil venezolano Freddy J. Sánchez Leal (2012), analizó el comportamiento mecánico de un suelo para determinar el modulo elástico mediante el ensayo convencional de CBR, considerando que el equipo de CBR simula una placa de carga y utilizando el principio de esfuerzos en los suelos propuesto por Boussinesq. Tras la diversidad de suelos, la investigación de Sánchez y otras investigaciones se basan en proporcionar ecuaciones en correlación con los principios de elasticidad de los cuerpos, así mismo fueron determinados para lugares determinados.

Guerrero, Miranda y Ramírez (2008), en su investigación: “Correlación del módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y coeficiente de capa en bases de suelo cemento”, realizó la evaluación de un material compuesto (suelo cemento) para la conformación de bases o sub bases de la estructura de un pavimento, ya que esta combinación hace que las propiedades físicas y mecánicas del suelo presenten mejoras en resistencia, garantizando una buena calidad. La evaluación consta de la determinación de algunas de las propiedades del suelo cemento, tales como la resistencia a la compresión, el módulo elástico dinámico y el coeficiente de capa, con fines de proporcionar una dosificación de cemento en 2% a 8% en función al peso del suelo natural. Las conclusiones de esta investigación se basan en reducir los espesores de las capas estructurales del pavimento en función del uso del material compuesto suelo cemento, para este caso en particular se llegó al uso del 2% y 2.5% de cemento, esta proporción es variable según el tipo de suelo a mejorar. En conclusión, las propiedades de resistencia a compresión, el

módulo de elasticidad dinámico y el coeficiente de capa, presentan mejoras dependiendo del porcentaje de cemento usado en función al tiempo.

Jaime (2009), en su investigación: “Determinación de las ecuaciones de correlación entre los ensayos que proporcionan los valores de resistencia de la subrasante en el tramo de la Carrera 45 con calle 86 hasta el parque de Aranjuez del sistema de transporte masivo metroplús”, realizó una serie de ecuaciones de correlaciones entre ensayos que determinan la capacidad de soporte de un tipo de suelo evaluado en un determinado lugar y en condiciones variables. Los ensayos evaluados fueron los siguientes: Penetrometro Dinámico de Cono, California Bearing Ratio (CBR) y el de Placa de carga. Las conclusiones sobre las ecuaciones de correlaciones entre los ensayos mencionados son aplicadas explícitamente para cada zona de estudio o realizar los ensayos directos (costosos). Sin embargo, las aplicaciones de estas correlaciones deben ser verificadas y corregidas, en caso sea necesario.

Hajiannia, Dorobati, Kasaeian y Baghbadorani (2016), en su investigación: “Correlation between the results of the PLT and CBR tests to determine the elasticity modulus”, realizó la investigación con el fin de determinar un módulo elástico a partir de los ensayos de PLT (Plate Load Test) y CBR (California Bearing Ratio) aplicando la metodología FEM (Elementos finitos) usando el software ABAQUS en un suelo específico. Las conclusiones de esta investigación son resultados coherentes con las características físicas y mecánicas del suelo estudiado, comparando con resultados de módulos elásticos determinados por otras metodologías empíricas y/o mecánicas.

2.1.2 Antecedentes nacionales

En el Perú la investigación para determinar el módulo elástico es escasa debido a la falta de equipos de laboratorio de mecánica de suelos para ensayos especiales y el alto costo de

inversión. Sin embargo, existen algunas investigaciones en base a la aplicación de correlaciones matemáticas y ensayos factibles de laboratorio para determinar dicho módulo.

Rosales (2014), en su investigación: “Determinación de la deformación elástica y el módulo de elasticidad en suelos expansivos mediante ensayos de expansión libre y consolidación”, realizó la evaluación de las constantes elásticas aplicados a suelos expansivos que permiten determinar asentamientos y la carga admisible. El objetivo de la investigación fue calcular un módulo de elasticidad mediante la deformación elástica que ocurre cuando se aplica una carga en los suelos arcillosos expansivos. Las conclusiones tras la aplicación de esta metodología fue determinar las deformaciones elásticas y el módulo elástico, los cuales coinciden con los rangos establecidos por otros investigadores, tales como Braja M. Das (2001), Jiménez Salas (1975) y Casagrande A. (1948).

Araujo (2014), en su investigación: “Ecuaciones de correlación del CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura”, realizó la evaluación del suelo de la ciudad de Piura con datos históricos de un laboratorio de mecánica de suelos (2004 – 2014) con el fin de proponer un método alternativo para la determinación de la capacidad de soporte CBR. Esta investigación parte del conocimiento de las características físicas y mecánicas (Propiedades de límites de consistencia y compactación) para los suelos que contienen grava, arena, limo y arcilla, existentes en el lugar de estudio. Las conclusiones de esta investigación parten de la combinación de varios parámetros físicos y mecánicas para determinar el valor de CBR deseado.

Rojas (2017), en su investigación: “Obtención del Módulo de elasticidad en arcillas normalmente consolidadas mediante ensayos de consolidación unidimensional”, realizó la evaluación del comportamiento físico y mecánico de suelos arcillosos mediante la aplicación del ensayo de consolidación unidimensional (normado en la NTP 339.154). El análisis parte

del proceso de carga y descarga en el ensayo de consolidación, este comportamiento es particular en los suelos arcillosos, de los cuales según la bibliografía se tienen rangos variables para su módulo elástico. La investigación concluye en proyectar una línea de histéresis en función al origen de la curva de carga y descarga para que posteriormente se determine el modulo elástico, generando así un aporte para identificar dicha característica de manera rápida.

2.2 Base teórica científica

2.2.1 El suelo y su origen

El suelo es una capa delgada perteneciente a la superficie terrestre, la cual es producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de las rocas preexistentes. Villalaz (2008) hace mención de la definición como: “El suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan” (p. 18).

En la superficie terrestre se encuentra una diversidad de suelos, las cuales fueron formadas por la erosión de rocas. Estos suelos presentan características físicas constituyentes por granos minerales derivados de las rocas, las cuales son definidas por el tamaño, la forma y su composición química. (Braja M. Das, 2014)

Tras la existencia de variedad de tipos de suelos, estas son provenientes de tipos básicos de rocas, las cuales se clasifican en: Ígneas, sedimentarias y metamórficas.

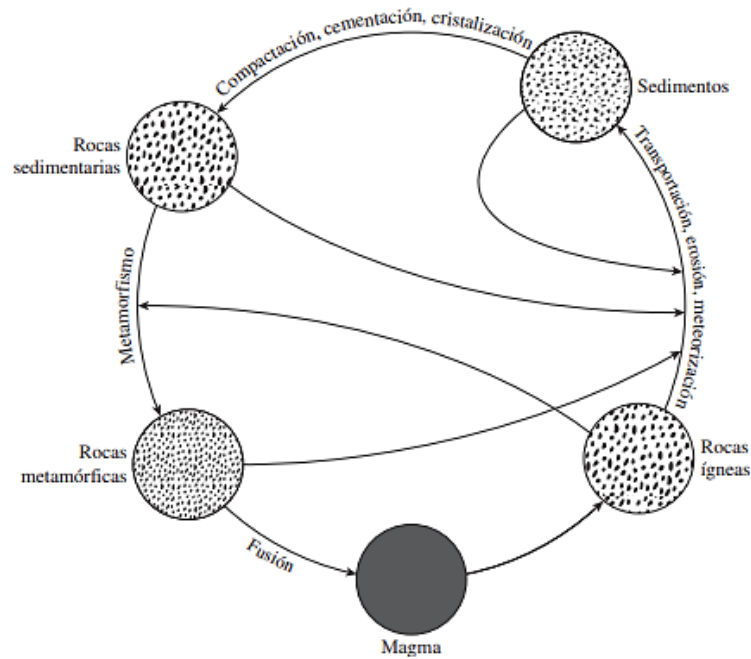


Figura 1. Ciclo de rocas. Fuente: *Fundamento de ingeniería geotécnica* (2014)

2.2.1.1 Rocas ígneas

Este tipo de roca es producto del enfriamiento y solidificación de rocas provenientes del manto de la tierra, también denominado magma, en muchos casos son expulsados por erupciones volcánicas o fisuras. El proceso de enfriamiento y solidificación se puede dar en la superficie terrestre como también bajo la superficie (rocas ígneas intrusivas). (Braja M. Das, 2014)

Existe una explicación para el enfriamiento de este tipo de rocas planteado por Bowen (1922), el cual explica la formación de nuevos minerales a medida que enfría el magma. Este proceso de enfriamiento fue clasificado por Bowen en dos grupos: la serie de reacción discontinua ferromagnesiana y la serie de reacción continua plagioclasa feldespatos.

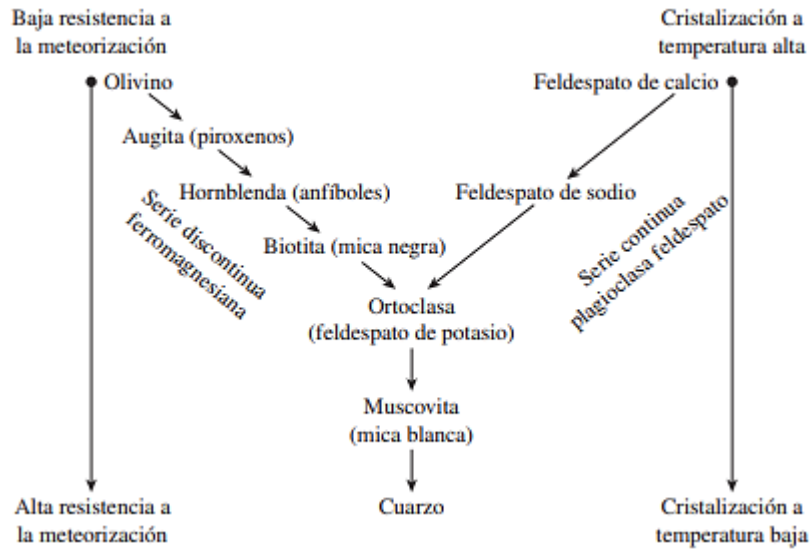


Figura 2. Series de reacción de Bowen. Fuente: *Fundamento de ingeniería geotécnica (2014)*

2.2.1.2 Rocas sedimentarias

El proceso de meteorización en las rocas da como resultado la existencia de suelos como los depósitos de grava, arena, limo y arcilla. Estos tipos de suelos pueden ser cimentadas por agentes cementantes (óxido de hierro, calcita, domolita y cuarzo) o también compactadas por presión de sobre carga. Los agentes cementantes pueden ser transportados por el agua subterránea y llenar los espacios entre las partículas para luego formar las rocas sedimentarias. Las rocas que presentan este tipo de sistema de conformación son denominadas rocas sedimentarias detríticas.

Tabla 1

Ejemplos de rocas detríticas con textura clástica

Tamaño de partícula	Roca sedimentaria
Granular o grande (tamaño de grano 2 mm – 4 mm o más)	conglomerado
Arena	Arenisca
Limo y arcilla	Lutita y limolita

Fuente: *Fundamento de ingeniería geotécnica (2014)*

La roca sedimentaria también puede ser formada por procesos químicos. Las rocas de este tipo son clasificadas como producto químico de rocas sedimentarias. Estas rocas pueden tener una textura clástica o no clástica.

Tabla 2

Ejemplos de rocas sedimentarias químicas

Composición	Roca
Calcita (CaCO_3)	Caliza
Halita (NaCl)	Sal de roca
Dolonita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)$]	Solonita
Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Yeso

Fuente: Fundamento de ingeniería geotécnica (2014)

Lo resaltante de la roca sedimentaria es que puede someterse a la meteorización o también al proceso de metamorfismo generando una nueva roca denominada roca metamórfica.

2.2.1.3 Rocas metamórficas

El cambio en la composición y textura de las rocas se deben a que sufren un proceso denominado metamorfismo, el cual se da mediante el calor y la presión. Este proceso hace que surjan nuevos minerales y los granos minerales sean sometidos a esfuerzos para dar una textura foliada de roca metamórfica. (Braja M. Das, 2014)

2.2.1.4 Suelos residuales

Son aquellos suelos formados en su lugar de origen debido a la meteorización. Su formación depende de la roca madre y están expuestas al intemperismo. Estos tipos de suelos predominan en las regiones cálidas y húmedas, comúnmente son encontrados en las zonas tropicales, se caracterizan por tener una capa superior de suelo arcilloso o limoso. Depende mucho de la profundidad, en la parte superior se constituye por una roca parcialmente intemperizada (espesor que puede variar considerablemente) y luego por una roca madre.

2.2.1.5 *Tamaño de partícula de suelo*

La ingeniería civil denomina a los tipos de suelos de acuerdo a los tamaños de cada partícula, estas comúnmente son: grava, arena, limo y arcillas. Varias organizaciones a nivel latinoamericano han clasificado a las partículas de acuerdo a sus tamaños, estas organizaciones son las siguientes: Instituto de tecnología de Massachusetts, el Departamento de Agricultura de E.U., la Asociación de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U y el Sistema Unificado. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es aceptado casi mundialmente y adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

Tabla 3

Límites de separación de tamaño de suelo

Nombre de la organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (p.ej. limos y arcillas <0.075)	

Fuente: Fundamento de ingeniería geotécnica (2014)

a) Grava

Es un suelo que cuyas partículas son fragmentos de rocas depositadas en estado suelto, varían en tamaño desde 2.00 milímetros hasta 3.00 pulgadas (7.62 centímetros). La forma geométrica de las gravas depende de su formación, esta puede ser elementos rodados o poliédricos.

b) Arena

Villalaz (2008) menciona que: “La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2.00 milímetros y 0.05 milímetros de diámetro” (p.22). La arena tiene un origen similar a la grava, por el cual suelen encontrarse juntos en los mismos depósitos.

c) Limo

El limo es un tipo de suelo clasificado como limo inorgánico y limo orgánico. Para el primer caso se puede considerar como limo (características no plásticas) perteneciente a una cantera, mientras que para el segundo puede considerarse limo (características plásticas) perteneciente al lecho del río. El tamaño de partículas de este tipo de suelo varía entre 0.05 milímetros hasta 0.005 milímetros de diámetro.

d) Arcilla

La arcilla es un tipo de suelo con propiedad plástica al contactarse con el agua, generalmente son partículas sólidas que tienen un tamaño menor a 0.005 mm, su estructura mineral es cristalina y complicada, y sus átomos están dispuestos en forma laminar.

En lo general, la estructura laminar de una arcilla se divide en dos tipos clásicos: tipo silíceo y alumínico. El primero consiste en una estructura conformada por un átomo de silicio rodeado con cuatro átomos de oxígeno, para luego constituirse en forma de un

tetraedro y finalmente se agrupan entre sí para formar una unidad hexagonal de manera indefinida para constituir una retícula laminar. El segundo, consiste en una estructura conformada por un átomo de aluminio rodeado de seis átomos de oxígeno y de oxígeno e hidrogeno, para luego constituirse en forma de un octaedro (proceso de repetición indefinido) y dando como resultado una retícula laminar alumínica.

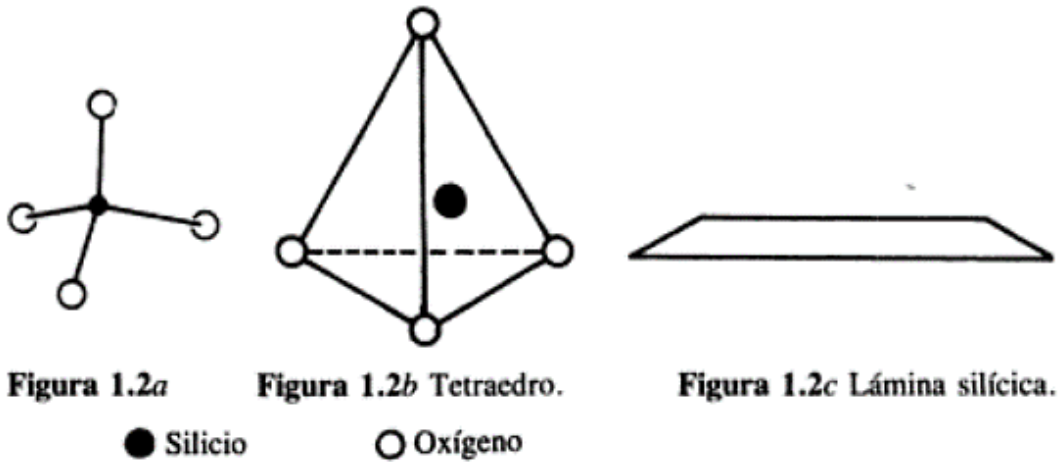


Figura 3. Conformación de la lámina silfca. Fuente: *Mecánica de suelos y cimentaciones* (2008)

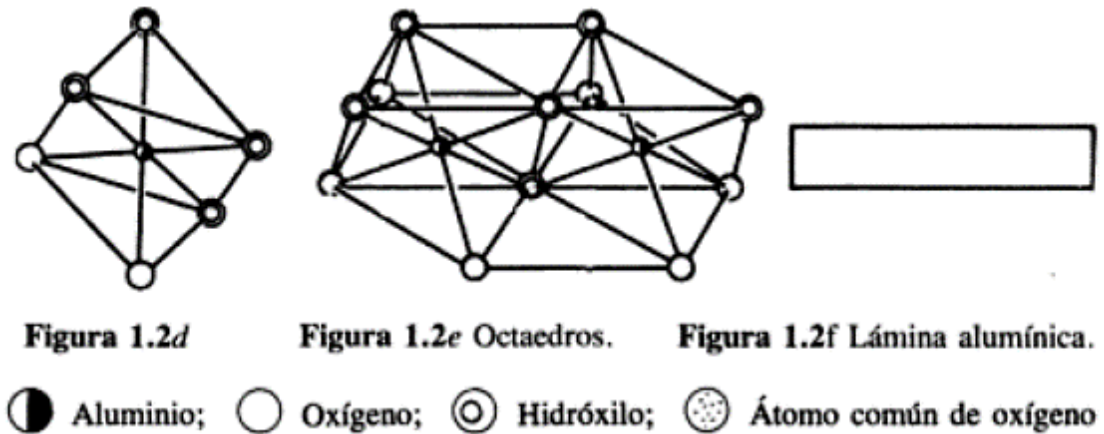


Figura 4. Conformación de la lámina alumínica. Fuente: *Mecánica de suelos y cimentaciones* (2008)

2.2.2 Elasticidad en los cuerpos

La elasticidad es una propiedad mecánica que consiste en que un cuerpo recupera su estado inicial (forma y posición) luego de haber sido sometido a una carga (fuerza), en este

proceso se producen deformaciones. El término “elástico” parte de la teoría física debido a que se trata de analizar dicho comportamiento en un cuerpo que presenta características físicas tales como la estructura atómica, cristalina o granular. La elasticidad se limita cuando esta pasa al estado plástico como efecto de aplicación de grandes cargas (fuerzas).

El proceso físico mecánico de la elasticidad de un cuerpo consiste en un desplazamiento relativo entre cualquier par de partículas y es proporcional a la fuerza aplicada (Véase Figura 5), este proceso es conocido generalmente como la Ley de Hooke. La ley de Hooke determina “módulo elástico” como coeficiente de proporcionalidad, la cual depende de la naturaleza de cada cuerpo.

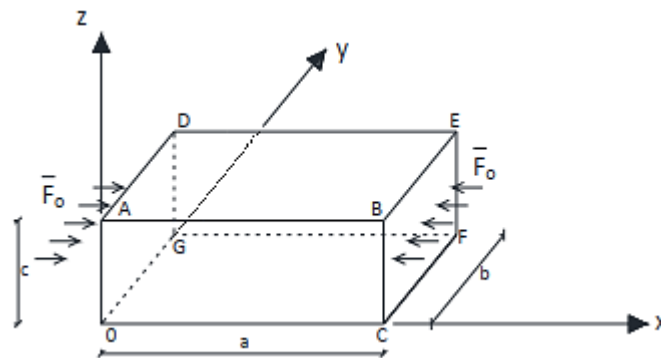


Figura 5. Esfuerzos aplicados a un cuerpo paralelepípedo. Fuente: *problemas fundamentales de elasticidad en suelos (2017)*

La ecuación de la ley de Hooke se representa en la siguiente ecuación:

$$\sigma = E \frac{\Delta a}{a} \quad (1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo (Fuerza / Área).

Δa = desplazamiento.

a = Longitud del cuerpo.

E = Modulo elástico (N/m²).

La deformación considerada en el lado “a” no es el único que recibe dicho efecto por la fuerza aplicada sino también en los otros lados del cuerpo, en los que ocurren deformaciones $(\Delta b/b)$ y $(\Delta c/c)$ proporcionales a $\Delta a/a$. Puesto que, dichas deformaciones son proporcionales a una, el coeficiente de proporcionalidad entre estos cocientes es el llamado coeficiente de Poisson (ν , parámetro adimensional, en general positivo y de valor menor que 0.25).

El coeficiente de Poisson se representa en la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta c}{c} = -\nu \frac{\Delta a}{a} \quad (2)$$

Se tiene como parámetros de elasticidad al Módulo Elástico y el Coeficiente de Poisson, con los cuales se puede caracterizar el comportamiento elástico en cualquier tipo de cuerpo, entre las cuales se tienen a los suelos y rocas.

2.2.2.1 Teoría de Joseph Valentín Boussinesq

El francés Boussinesq fue un profesional hidráulico y físico matemático que dejó su legado en la ingeniería civil con su aporte para el análisis de incremento de esfuerzos provocados por una carga hacia la masa del suelo. En el año 1883, Boussinesq demostró mediante una expresión matemática la explicación del comportamiento (incremento de esfuerzos) de una masa semi-infinita de un suelo frente a la aplicación carga puntual. Esta teoría se basa cuando se considera el suelo como un cuerpo homogéneo, elástico e isotrópico. (Braja M. Das, 2014)

A continuación, se presenta la expresión matemática aplicada por Boussinesq, considerando los esfuerzos normales en un punto A por consecuencia de la aplicación de una carga puntual (ver Figura N° 6):

$$\Delta\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3x^2z}{L^5} - (1 - 2\nu) \left[\frac{x^2 - y^2}{Lr^2(L+z)} + \frac{y^2z}{L^3r^2} \right] \right\} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3y^2z}{L^5} - (1 - 2\nu) \left[\frac{y^2 - x^2}{Lr^2(L+z)} + \frac{x^2z}{L^3r^2} \right] \right\} \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi L^5} = \frac{3Pz^3}{2\pi(r^2+z^2)^{5/2}} \quad (5)$$

Donde:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6)$$

$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{r^2 + z^2} \quad (7)$$

ν = coeficiente de Poisson.

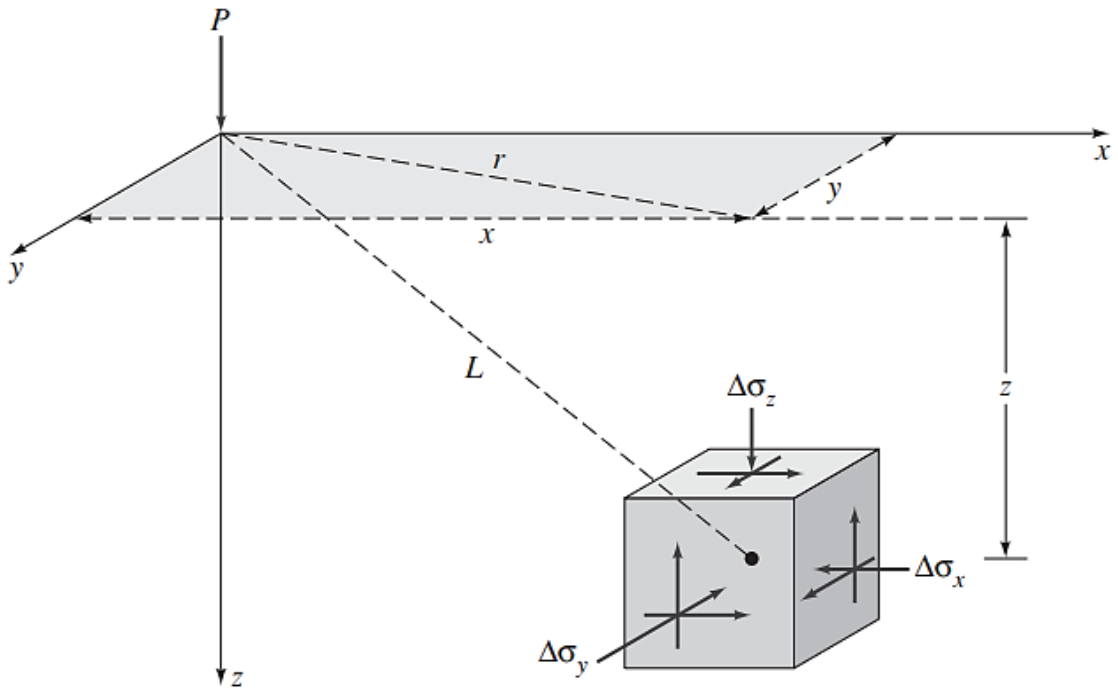


Figura 6. Esfuerzos en un medio elástico causados por una carga puntual. Fuente: *Fundamento de ingeniería geotécnica (2014)*

La siguiente expresión considera una condición generada por la fuerza aplicada a un área y se estima de la siguiente manera:

$$w = \int_{z=0}^{\infty} \varepsilon_z \cdot dz \quad (8)$$

Donde:

w = Deformación.

ε_z = deformación unitaria en una cierta profundidad.

La resolución de la integral anterior considerando diferentes posiciones y por la teoría de elasticidad por debajo de una cimentación rectangular, tanto en una esquina como en el centro son las siguientes:

$$w_{esquina} = \frac{qB}{2E_s} (1 - \nu^2) \cdot I_{ce} \quad (9)$$

$$w_{centro} = \frac{qB}{E_s} (1 - \nu^2) \cdot I_{ce} \quad (10)$$

$$I_{ce} = \frac{1}{\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{\sqrt{1+(L/B)^2}+L/B}{\sqrt{1+(L/B)^2}-L/B} \right) + \frac{L}{B} \cdot \text{Ln} \left(\frac{\sqrt{1+(L/B)^2}+L/B}{\sqrt{1+(L/B)^2}-L/B} \right) \right] \quad (11)$$

Donde:

q = Carga uniformemente distribuida.

ν = Coeficiente de Poisson.

I_{ce} = Coeficiente de influencia.

B = Ancho de placa.

E_s = Modulo Elástico.

Putri, Hameswara y Mannan, mencionan que el Coeficiente de Poisson para suelos de subrasante se encuentra en el intervalo de 0.2 a 0.4.

2.2.3 Ensayo placa de carga

Es un ensayo normado por la American Society for Testing and Materials (ASTM) con designación ASTM D 1194-94, la cual se realiza in situ con la finalidad de determinar propiedades mecánicas del suelo para las consideraciones de diseño para cimentaciones de

infraestructuras. Las propiedades a determinar son las deformaciones y desplazamientos, por consiguiente, el módulo elástico del suelo. Consiste en aplicar una serie de incremento de cargas a través de una placa en el suelo, de manera que cada incremento genera desplazamientos.

2.2.3.1 *Materiales y/o equipos*

Según la norma del ASTM D 1194-94, los materiales y/o equipos usados en el ensayo son los siguientes:

- Plataformas de carga: Plataformas metálicas de acero de suficiente tamaño para soportar la reacción de carga total aplicada.
- Gato hidráulico: Equipo que tenga la capacidad para proporcionar y mantener la carga máxima estimada.
- Placas de carga: Tres placas de carga circulares de acero, no menor a 1 pulgada de espesor y diámetro variable de 12 a 30 pulgadas y diámetro máximo especificado o placas de apoyo cuadradas de acero de área equivalente.
- Dispositivos de registro: Diales capaces de medir el asentamiento de las placas de carga con una precisión de 0.01 pulgadas.
- Aparatos misceláneos, incluyendo columnas de carga, cuñas de acero y otras herramientas para la preparación de los pozos de prueba y los aparatos de carga.

2.2.3.2 *Procedimiento de ensayo*

Según la norma del ASTM D 1194-94, los procedimientos del ensayo son los siguientes:

a) Selección de las áreas de prueba

Se determina el área de prueba en base a las consideraciones de las cimentaciones para las estructuras proyectadas. Para la profundidad del ensayo se simula la proyección de desplante con el área determinada para las placas de carga.

b) Pozos de prueba

Una cantidad mínima de 3 pozos de prueba y la distancia entre ellas no deben ser 5 veces el diámetro de las placas más grandes utilizadas. Nivelar y limpiar la zona para el contacto de las placas para que estas no presenten ninguna perturbación en la medida de cargas.

c) Plataformas de carga

Se apoya las plataformas de carga por medio de un apuntalamiento u otros medios adecuados a una distancia no menor a 2.4 metros. La carga total requerida para prueba deberá estar disponible en el sitio antes que comience la prueba.

d) Carga muerta

Todo equipo usado tales como las placas de acero, gato hidráulico, columna de carga, entre otros, deben estar registrados y pesados antes de la aplicación de incremento de carga.

e) Viga de referencia

Se colocan viga que sujetan de forma independiente los indicadores de cuadrante de apoyo y otros dispositivos de medición de asentamientos, no menos de 2.4 m desde el centro del área.

e) Incrementos de carga

Se realiza la aplicación de carga al suelo en incrementos de 95 kPa o no más de la décima parte de la capacidad de carga estimada en el área que se está probando. La carga debe llegar al suelo como una carga estática, no debe ser con impacto, fluctuación o excentricidad.

f) Intervalos de tiempo de carga

Luego del incremento de carga se procede a mantener la carga acumula en un intervalo de tiempo no menor a 15 minutos.

g) Medición de los asentamientos

Las mediciones de los asentamientos se deben realizar de manera paralela al incremento de cargas en intervalos de tiempos iguales, la cantidad de mediciones no debe ser a seis veces entre aplicaciones de carga.

h) Etapa final de prueba

El ensayo finaliza cuando el incremento de carga sea la máxima o si la relación carga y asentamiento sea mínima a constante. En caso que haya carga aplicable disponible, se procede a continuar hasta que el asentamiento total alcance el 10% del diámetro de placa o se da por concluido cuando se presente una carga de falla bien definida. Por último, se retira la carga aplicada en tres decrementos iguales y se considera las deflexiones de rebote hasta que cese la deformación en intervalos de tiempo no menores a lo aplicado en la aplicación de carga.

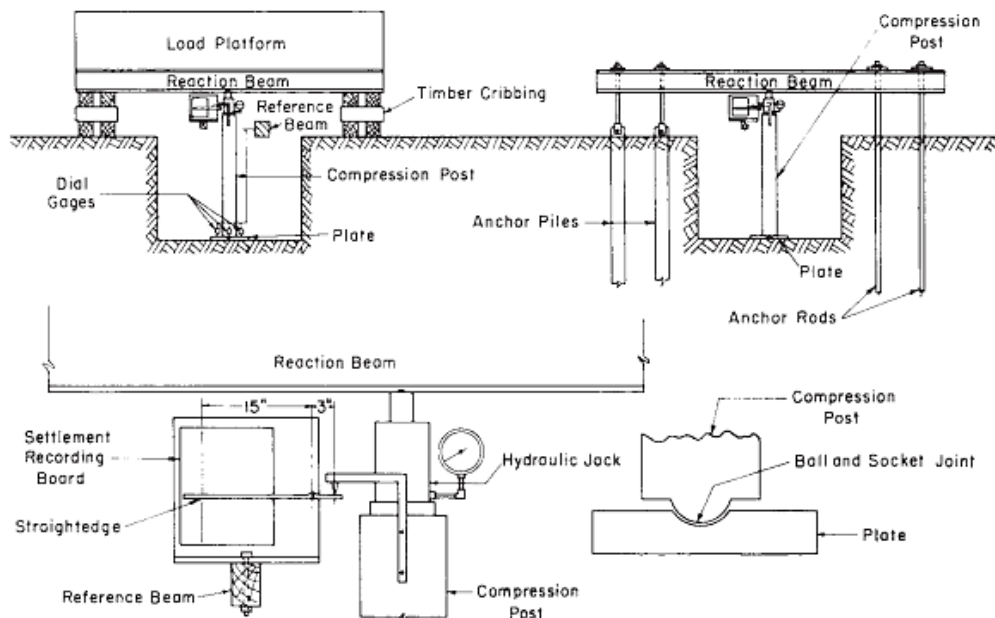


Figura 7. Representación típica de los equipos y/o materiales para la aplicación del ensayo carga de placa. Fuente: ASTM D 1194-94

2.2.3.3 Reporte de datos

Los datos que se reportan deben contener lo descrito en la sección de materiales y/o equipos, también la lista continua de incremento de cargas y asentamientos, incluyendo observaciones relacionados al ensayo. Para determinar el diagrama de tensión-desplazamiento se utiliza la ecuación (12) a partir de la teoría de elasticidad (Modulo de elasticidad o de Young (E)).

$$\Delta\delta = \frac{\sigma}{E} \cdot B \cdot (1 - \nu^2) \cdot I \quad (12)$$

Donde:

$\Delta\delta$ = Deformación.

σ = Esfuerzo aplicado.

B = Ancho de la placa que aplica la carga.

ν = Coeficiente de Poisson.

I = Coeficiente de forma para la placa.

2.2.4 Ensayo de California Bearing Ratio (CBR) of laboratory

Es un ensayo normado por la American Society for Testing and Materials (ASTM) con designación ASTM D 1883-07, la cual se realiza en un laboratorio de mecánica de suelos con la finalidad de medir la resistencia al corte bajo condiciones de humedad y densidad controlada en los suelos. Esta metodología es usada para clasificar al suelo para su utilidad en la subrasante y material de base en la estructura de un pavimento.

Las muestras que se utilizan para el ensayo CBR parten de su óptimo contenido de humedad, que depende del ensayo de compactación Proctor estándar o modificado.

2.2.4.1 *Materiales y/o equipos*

Según la norma del ASTM D 1883-07, los materiales y/o equipos usados en el ensayo son los siguientes:

- Prensa de compresión, cuyas características deben ser para el uso del pisón para este ensayo. La capacidad de prensa debe ser 44.5 kN (10 000 lbf) o más y precisión mínima de 44 N (10 lbf).
- Molde de metal cilíndrico cuyas características son las siguientes: 152.4 mm \pm 0.66 mm de diámetro interior, 177.8 mm \pm 0.46 mm de altura, collar de metal suplementario de 50.85 mm de altura y placa de base perforada de 9.53 mm de espesor.
- Pisón de compactación usado del ensayo de compactación del proctor modificado.
- Aparato para medir la expansión que cumpla las siguientes especificaciones: Placa de metal perforada de 149.2 mm de diámetros, trípode de apoyo para el día (deformímetro) con medición de 0.025 mm.
- Pesas anulares metálicas de masa total de 4.54 \pm 0.02 kg y pesas ranuradas metálicas con masas de 2.27 \pm 0.02 kg. Ambas pesas deben tener 149.23 mm a 150.81 mm de diámetro y un agujero central de 53.98 mm de diámetro.
- Pistón de penetración, cuya sección transversal sea circular de 49.63 \pm 0.13 mm de diámetro, área de 19.35 cm² y con una longitud no menor a 101.6 mm.
- Dos diales de recorrido mínimo de 25 mm y divisiones de 0.025 mm.
- Pozo para el almacenamiento de moldes cubiertos con agua.
- Horno de temperatura 110 \pm 5 °C.
- Balanzas, una capacidad de 20 kg y 1000 g con sensibilidad de 1 g y 0.1 g.
- Tamiz N°4, ¾" y 2".

- Misceláneos, de uso general como cuarteador, mezclador, cápsulas, probetas, espátulas, discos de papel de filtro del diámetro del molde, etc.

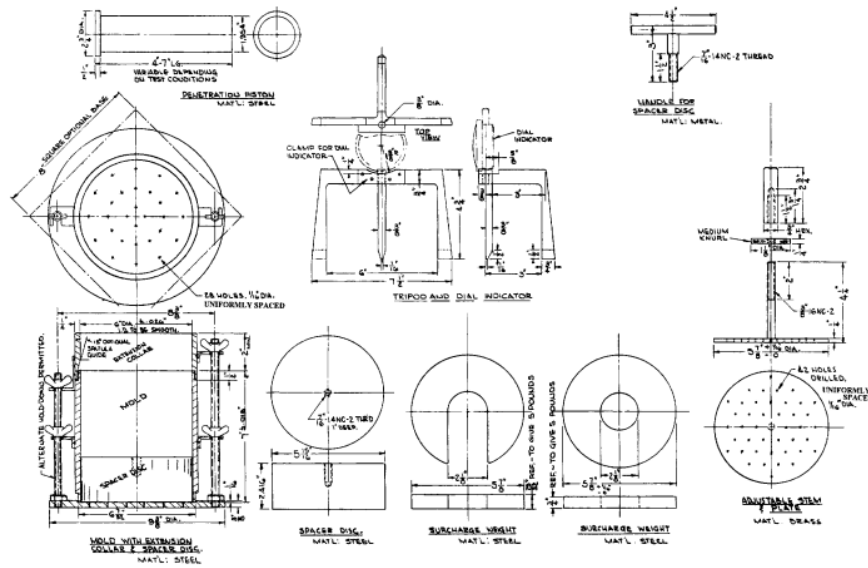


Figura 8. Materiales y/o equipos para el ensayo de CBR. Fuente: ASTM D 1883-07

2.2.4.2 Muestra para el ensayo

Las muestras deben ser preparadas de acuerdo con los procedimientos de compactación en las normas ASTM D 698 o D 1557 en un molde de 152.4 mm de diámetro, sin embargo, puede darse lo siguiente:

- Si el 100% de material pasa la malla de 3/4", toda la muestra puede usarse para la compactación. En caso que haya retenido en la malla 3/4", este retenido debe ser removido y reemplazarlo por la misma cantidad que pase dicho tamiz y retenido en la malla N° 4.

2.2.4.3 Procedimiento de ensayo

Según la norma del ASTM D 1883-07 y el MTC E 132, los procedimientos del ensayo con fines de esta investigación son los siguientes:

a) Preparación de la muestra

Se aplica los ensayos de Proctor estándar o modificado, teniendo en consideración las muestras a usar según su gradación. Se obtiene el óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca para ser usados en las muestras con la cantidad necesaria para el apisonado.

Se halla la humedad natural del suelo a usar mediante el secado en horno, posteriormente se añade el agua para llegar al óptimo contenido de humedad.

b) Elaboración de especímenes

Se halla el peso del molde y su base, el collar y disco espaciador, sobre este un disco de papel filtro grueso del mismo diámetro.

Luego de determinar los pesos, se procede a seleccionar las cantidades de moldes, frecuentemente son de 3 o 9. Considerando la cantidad de moldes a utilizar se continua con la compactación dinámica de los especímenes a 55, 26 y 12 golpes en suelos granulares con el óptimo contenido de humedad y 55, 26 y 12 golpes en suelos cohesivos con distintas humedades para obtener una familia de curva y relacionarlas con su peso específico, humedad y relación de capacidad de soporte.

Finalizada la compactación, se retira el collar y se enrasa, las partículas gruesas que puedan eliminarse luego del enrasado deben ser reemplazadas por partículas finas (comprimidas) que restan de lo utilizado.

Por último, se desmonta el molde y se vuelve a montar invertido, sin disco espaciador, colocando un papel filtro entre el molde y la base. Se pesa.

Si el espécimen será sumergido se toma una porción de 100 a 500 g, antes y después de la compactación para determinar su contenido de humedad. Si no se realiza el sumergido la

muestra para el contenido de humedad será tomada del centro del espécimen luego de la penetración.

c) Inmersión

Se coloca sobre la superficie de la muestra invertida la placa perforada con vástago, también los anillos para completar una sobrecarga equivalente a las capas de materiales superiores, la aproximación de peso correspondiente a cada pesa debe ser de 2.27 kg, la sobrecarga mínima a usar debe ser 4.54 kg.

Se sumerge en el pozo de agua los especímenes en su totalidad y se mide con el dial (deformímetro) el nivel inicial con fines de determinar la expansión. Luego de los 4 días de sumergido se procede a medir el nivel final de los especímenes.

Por último, se procede a escurrir el agua durante 15 minutos y luego se retira las sobrecargas y placa perforada, y se pesa.

d) Penetración

Antes de comenzar la penetración se coloca la sobrecarga de 2.27 kg o no menor a 4.54 kg. Luego de lo anterior, se lleva el molde a la prensa y se coloca el pistón en el centro de la sobrecarga anular y se asienta con una fuerza de 5 kg. Los diales deben ser colocados donde corresponden para medir las penetraciones y cargas que correspondan al comportamiento de reacción del suelo. La velocidad de penetración debe ser uniforme a razón de 1.27 mm por minuto.

Por último, se desmonta el molde y se toma una porción de muestra del lugar de penetración para determinar su humedad.

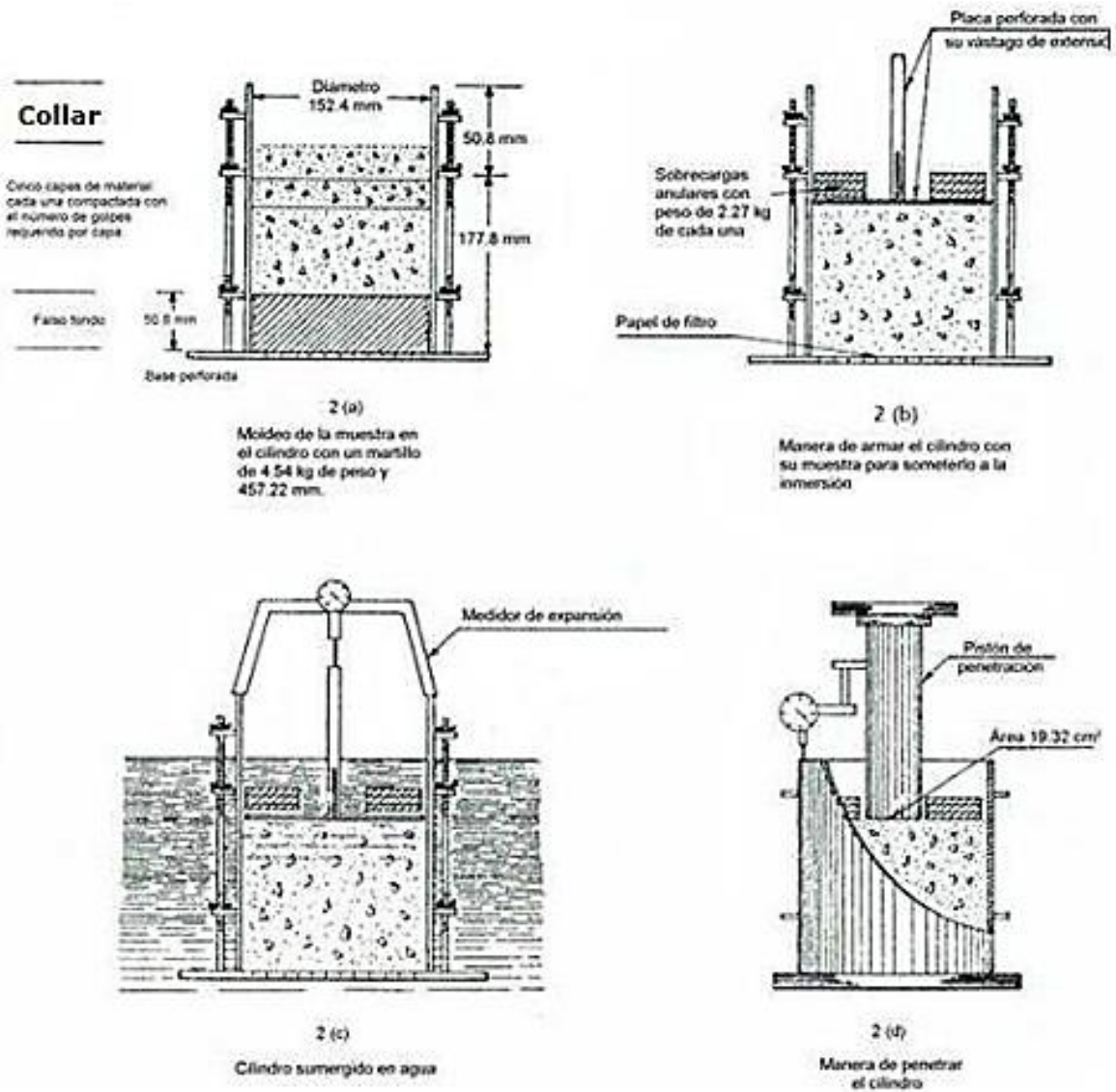


Figura 9. Proceso de conformación de suelo para el ensayo de CBR. Fuente: Manual de ensayo de materiales (2016).

Tabla 4

Penetraciones para el ensayo CBR

Milímetros	Pulgadas
0.630	0.025
1.270	0.050
1.900	0.075
2.540	0.100
3.170	0.125
3.810	0.150
5.080	0.200
7.620	0.300
10.16	0.400
12.70	0.500

Fuente: Manual de ensayo de materiales (2016).

2.2.4.4 Reporte de datos

Los datos que se reportan son las siguientes: Óptimo contenido de humedad, máxima densidad seca, agua absorbida, presión de penetración por cada lectura, expansión, y el valor de la relación de soporte (índice resistente CBR).

El índice de CBR es aquel que se determina a partir de la división de una carga patrón a la presión en una determinada penetración. Las cargas patrón son estándares utilizadas para este ensayo (ver Tabla 5).

Tabla 5

Cargas patrones para determinadas penetraciones

Penetración		Presión		
Milímetros	Pulgadas	MN/m ²	kgf/cm ²	lb/pulg ²
2.54	0.10	70.310	70.310	1000
5.08	0.20	105.46	105.46	1500

Fuente: Manual de ensayo de materiales (2016).

Se genera una curva de presiones (Ordenadas) versus penetración (abscisas), de las cuales se toma el valor de presión a 2.54 y 5.08 mm de penetración y se divide entre 1000 lb/pulg² y 1500 lb/pulg², esto se aplica considerando que la curva no presenta punto de inflexión. En caso que ocurra el punto de inflexión el eje de ordenadas y abscisas será trasladada a dicho punto y se tomaran las nuevas presiones que corresponden a 2.54 y 5.08 mm (a partir del nuevo punto de origen) y se dividen entre las cargas patrones.

Con los índices CBR obtenidos para los casos de 12, 26 y 55 golpes se crean las nuevas curvas de CBR versus densidad seca de penetración 2.54 y 5.08 mm. Esta curva es intersectada con los valor del 100% y 95% MDS (Máxima densidad seca) y el valor intersectado será considerado como el valor de CBR. Las curvas de la penetración de 2.54 y 5.08 mm no deben estar distantes del caso contrario se volverá a realizar el ensayo.

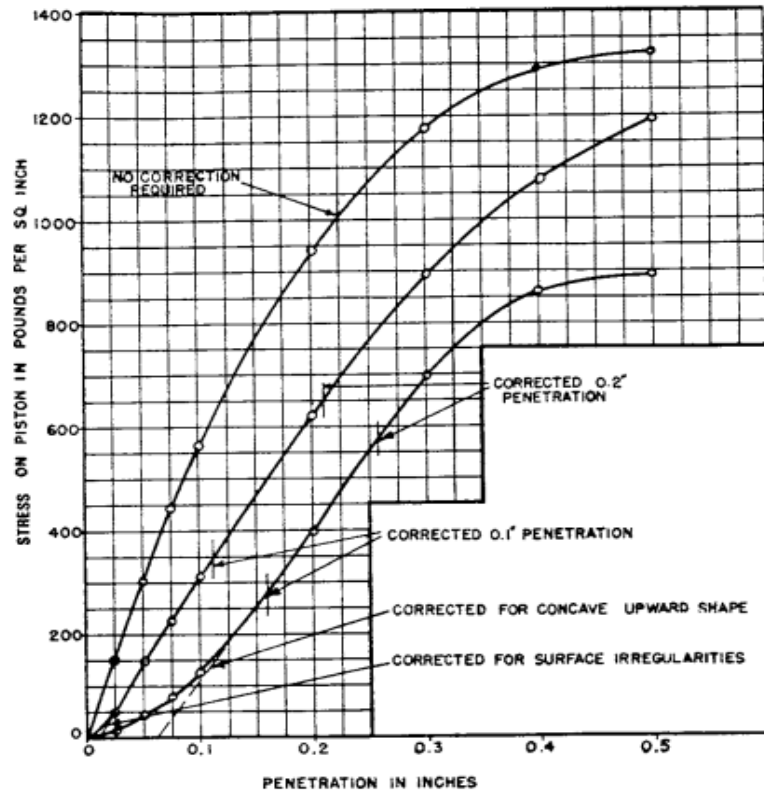


Figura 10. Curva de presiones versus penetraciones y puntos de inflexión. Fuente: ASTM D 1883-07

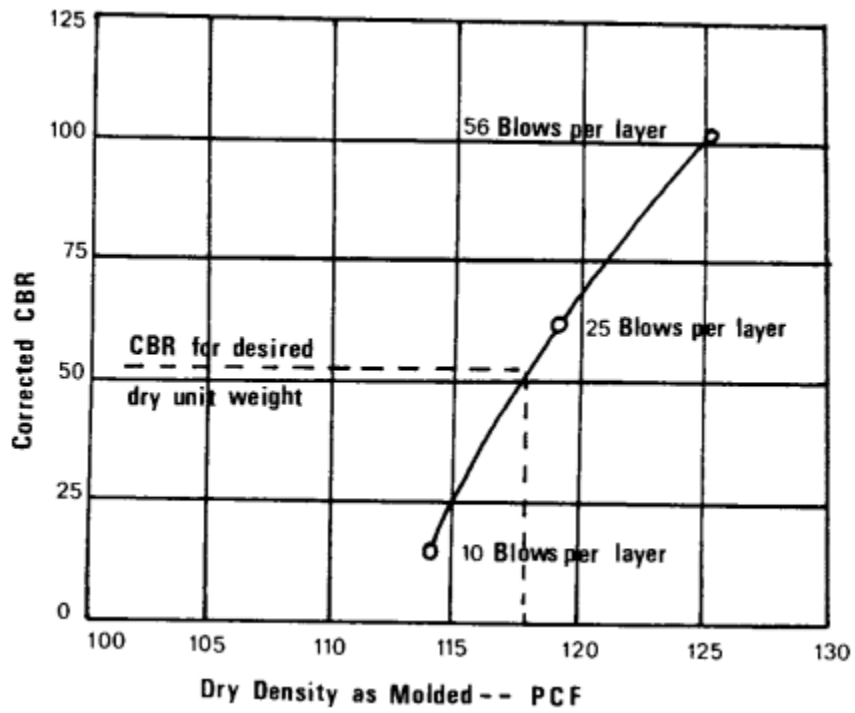


Figura 11. Densidad seca versus CBR. Fuente: ASTM D 1883-07

2.3 Metodologías para determinar el Módulo Elástico

Las investigaciones para determinar una relación entre el Modulo Elástico (E) y el ensayo de CBR son escasas. En 1955, Terzaghi estudio los parámetros que presenta el ensayo de carga de placa usando una placa circular de 760 milímetros de diámetro y 16 milímetros de grosor, buscando una correlación empírica entre el CBR y el modulo elástico. Posteriormente a Terzaghi, otros investigadores propusieron sus correlaciones del E, el ensayo CBR y el ensayo de Carga de Placa en función del tipo de suelo, entre los cuales son los siguientes: Heukelom and Klomp (1962), NAASRA (1950); Powell, Potter, Mayhew y Nunn (1984); Putri, Hameswara y Mannan (2012) y Hajiannia, Dorobati, Kasaeian y Baghbadorani (2016).

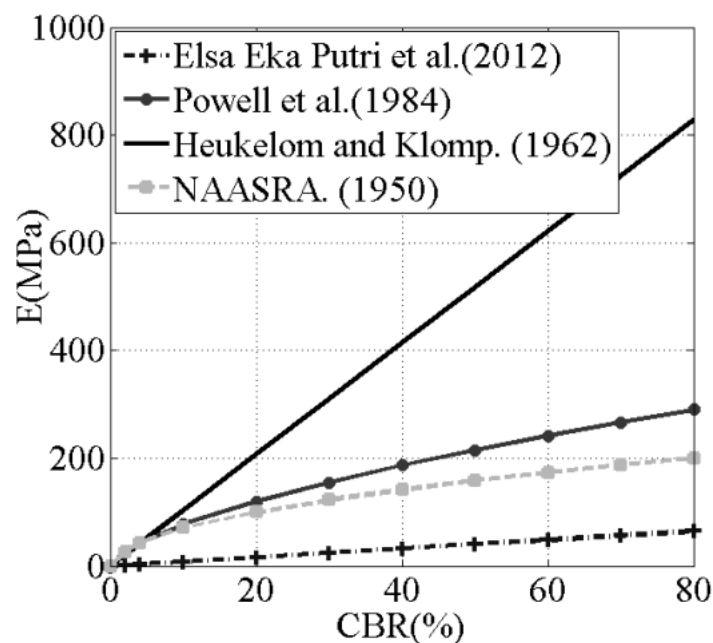


Figura 12. Correlaciones entre el Modulo elástico y el ensayo de CBR. Fuente: *Correlation between the results of the PLT and CBR tests to determine the elasticity modulus (2016)*

La correlación empírica planteada por Heukelom and Klomp (1962) para suelos de granos finos y no expansivos con un CBR menor al 100%, la cual también es usada por la AASHTO 1993, es la siguiente:

$$E = 1500 \text{ CBR (Psi)} \quad (13)$$

Powell, Potter, Mayhew y Nunn (1984), propusieron la siguiente correlación:

$$E = 17.6 \text{ CBR}^{0.64} \text{ (MPa)} \quad (14)$$

NAASRA (1950), propuso la correlación en dos condiciones:

$$- \text{ Para CBR menores al 5\%, } E = 16.2 \text{ CBR}^{0.7} \text{ (MPa)} \quad (15)$$

$$- \text{ Para CBR mayores al 5\%, } E = 22.4 \text{ CBR}^{0.5} \text{ (MPa)} \quad (16)$$

Putri, Hameswara y Mannan (2012), presento las siguientes correlaciones en función al módulo de Poisson:

$$- \nu = 0 ; E = 863.82 \text{ CBR(kPa)} \quad (17)$$

$$- \nu = 0.3 ; E = 840.53 \text{ CBR(kPa)} \quad (18)$$

$$- \nu = 0.4 ; E = 741 \text{ CBR(kPa)} \quad (19)$$

Hajiannia, Dorobati, Kasaeian y Baghbadorani (2016), usando la metodología FEM (Finite Element Model), ensayos de PLT (Plate Load Test) y CBR (California Bearing Ratio) determinaron la siguiente correlación:

$$E_{CBR} = \frac{1.46(1-\nu^{0.983})\sigma_p \cdot r_{CBR}}{u^{1.031}} \quad (20)$$

Donde:

E = Módulo Elástico de CBR

ν = Módulo de poisson.

σ_p =Esfuerzo aplicado.

u =Penetración de pisón.

Existen rangos aproximados de valores módulo elástico según el tipo de suelo, estos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6
Valores del Módulo Elástico (Es) para cada tipo de suelo

Tipo de Suelo	Es (ton/m ²)
Arcilla muy blanda	30-300
Arcilla Blanda	200-400
Arcilla Media	450-900
Arcilla Dura	700-2000
Arcilla arenosa	3000-4250
Suelos graciales	1000-16000
Loess	1500-6000
Arena limosa	500-2000
Arena suelta	1000-2500
Arena Densa	5000-10000
Grava arenosa densa	8000-20000
Grava arenosa suelta	5000-14000
Arcilla exquisita	14000-140000
Limos	200-2000

Fuente: Cimentaciones de concreto armado en edificaciones (1998)

2.4 Definición de términos

- Suelo. Capa perteneciente a la superficie terrestre, que sufre alteración en función al tiempo y agentes ambientales.
- Capa de rodadura. Es la capa superior de una estructura de pavimento, la cual recibe de forma directa las cargas vehiculares.
- Estructura de pavimento. Es la conformación de capas de suelo de un pavimento, diseñado para la resistencia de cargas vehiculares.
- Subrasante. Suelo natural donde reposan las capas estructurales de un pavimento.

- CBR. Ensayo normado por la ASTM INTERNATIONAL para suelos con fines de pavimentación.
- Suelos finos. Son aquellos suelos que presentan 50% o más de material pasante de la Malla N° 200 del ensayo de granulometría.
- Granulometría. Distribución de partículas según sus tamaños diametrales a través de mallas circulares estandarizadas y normalizadas.
- Histéresis. Representación de una función similar a la función de origen.

CAPITULO III: Materiales y métodos

3.1 Descripción de lugares donde se obtuvo la muestra

Las muestras de suelo fino de subrasante son pertenecientes a distintos lugares del territorio nacional, tales como el camino vecinal de la localidad de Yambrasbamba, San Jerónimo del departamento del Amazonas; Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa del departamento de Ucayali y la Avenida San Juan de Dios, Distrito de Puente Piedra del departamento de Lima. En el Anexo 1 se ubican los puntos de exploración evaluados.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

Todas las muestras de suelo ensayado y la evaluación de su comportamiento elástico corresponden a suelos finos de la capa de subrasante con fines de diseño de pavimentos flexibles.

3.2.2 Muestra

Las muestras son pertenecientes al “Proyecto de inversión 1: EMP. PE 5N - Pte. Sichoca - Pte. Goca – Yambrasbamba” es de 01 unidad, “Proyecto de inversión 2: Emp. Am 108 - Dv. La Nueva Unión - San Jerónimo” es de 01 unidad, “Vía de acceso del Aeropuerto Capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa” es de 03 unidades y el proyecto “Mejoramiento y rehabilitación de la infraestructura vial de la Av. San Juan de Dios, tramo Panamericana Norte – Av. Perimétrica en el Distrito de Puente Piedra, Provincia de Lima – Lima” es de 06 unidades.

3.3 Marco metodológico

El marco metodológico de esta investigación está basado en determinar el modulo elástico para los suelos finos de las muestras seleccionadas. Para ello se describe la siguiente secuencia:

- Se recopiló información teórica a nivel nacional e internacional sobre las metodologías existentes.
- Se recopiló e identificó las muestras que presentan solo suelo fino de los distintos puntos de exploración de cada proyecto mencionado.
- Se realizó los ensayos de Análisis Granulométrico, Limites de Consistencia, Proctor y CBR.
- Se procesó los datos de laboratorio para identificar el tipo de suelo fino y su capacidad de soporte CBR.
- Se determinó el módulo elástico usando las variables independientes mediante un análisis matemático.
- Se estableció una metodología de cálculo y se compara los resultados mediante dos ábacos de curvas con los resultados de las metodologías existentes.
- Se realizó las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

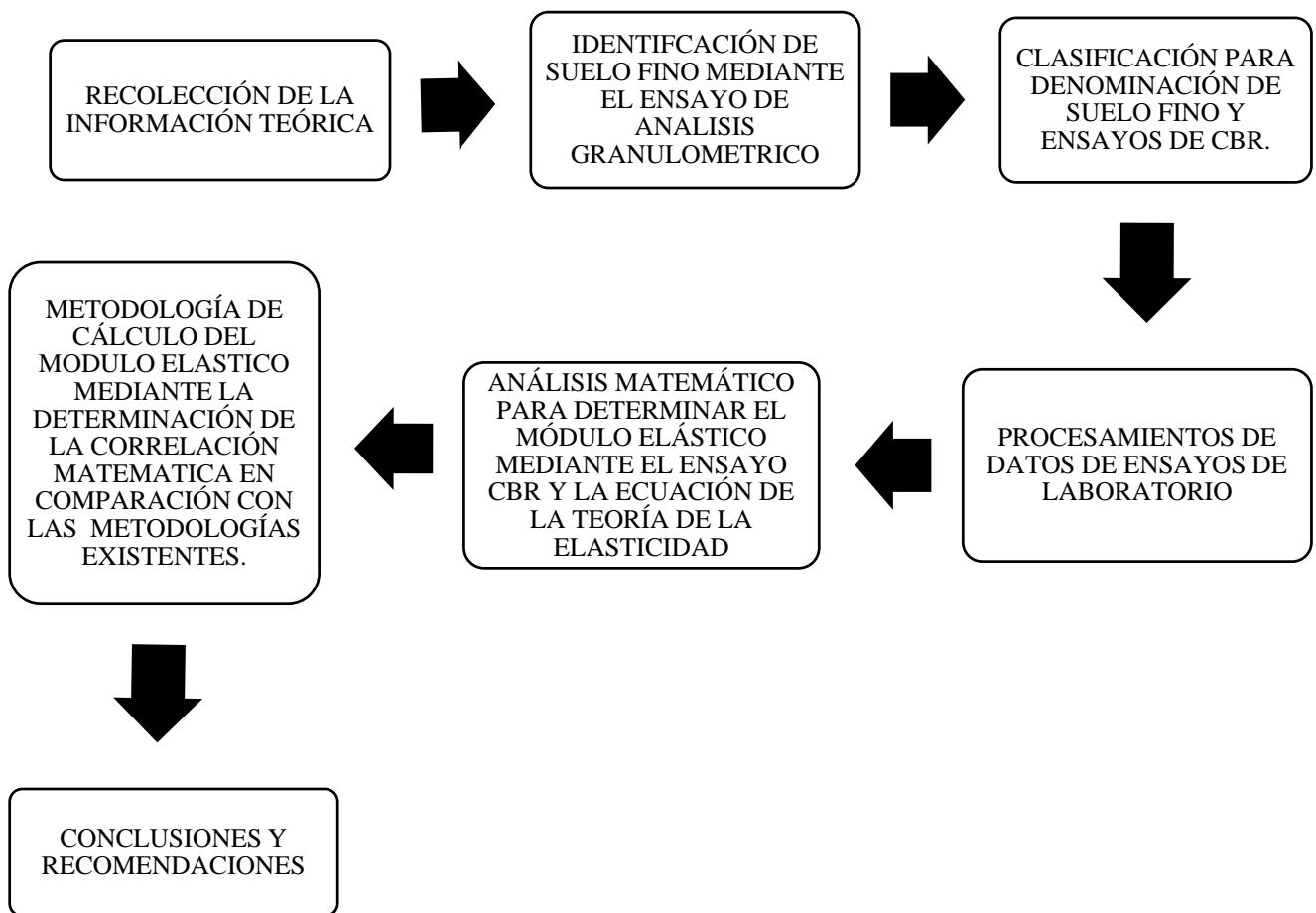


Figura 13. Metodología de la investigación para determinar el Módulo Elástico de los suelos finos de subrasante. *Fuente: Elaboración Propia.*

3.4 Diseño de contrastación de la hipótesis

El diseño de investigación es experimental debido a que la variable independiente causa efecto en la variable dependiente.

3.5 Tipo de investigación

La investigación corresponde a una investigación aplicada, porque se usa el concepto teórico del análisis estático de la elasticidad en suelos. Consiste en determinar un módulo elástico para cada tipo de suelo fino a partir de un ensayo convencional (CBR) en el laboratorio de mecánica de suelos.

El enfoque de investigación es cuantitativo ya que buscó la recolección y análisis de datos emitidos por el laboratorio de mecánica de suelos.

3.6 Hipótesis

3.6.1 Hipótesis general

El módulo elástico es determinado mediante el ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) y la ecuación de la teoría de la elasticidad del Ensayo de placa de carga para suelos finos de subrasante de los pavimentos flexibles.

3.6.2 Hipótesis específicos

- Mediante un esfuerzo aplicado por el pisón de la prensa de compresión (Equipo del CBR) se determina el modulo elástico.
- Mediante una deformación específica del suelo fino de subrasante se determina el módulo elástico.
- El modulo elástico es el mayor valor de los coeficientes de proporcionalidad luego de la aplicación del ensayo CBR y la ecuación de teoría de la elasticidad del Ensayo de Placa de Carga.
- La metodología de cálculo propuesta en esta investigación permite determinar una correlación matemática entre el valor de CBR versus Módulos elásticos, es una evaluación solo para suelo fino en comparación a las metodologías mecanísticas y/o empíricas existentes.

3.7 Definición y medición de variables

Hipótesis General

Variable dependiente: Módulo Elástico

Variable independiente: Ensayo de CBR y ecuación de la teoría de la elasticidad del Ensayo de Placa de Carga.

Hipótesis específico 1

Variable dependiente: Módulo elástico

Variable independiente: Esfuerzo del pisón de la prensa de compresión del CBR.

Hipótesis específico 2

Variable dependiente: Modulo elástico.

Variable independiente: Deformación del suelo fino.

Hipótesis específico 3

Variable dependiente: Valor del módulo elástico.

Variable independiente: Coeficientes de proporcionalidad.

Hipótesis específico 4

Variable dependiente: Módulo Elástico.

Variable independiente: Metodología de cálculo.

3.7.1 Operacionalización de variables

Tabla 7

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión conceptual	Dimensiones	Indicadores
Ensayo de CBR y ecuación de la teoría de la elasticidad del ensayo Placa de Carga	El CBR puede considerarse un ensayo de placa de carga a escala reducida y aplicando la teoría de elasticidad puede ser útil para el cálculo del módulo elástico.	Deformaciones Esfuerzos	Fuerzas Asentamientos Volumen de muestra Diámetro de pistón de prensa Tipo de suelo
Módulo Elástico	EL módulo elástico es la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación en el límite del estado elástico de un cuerpo.	Coefficientes de proporcionalidad	Deformaciones Esfuerzos Módulo de Poisson
Esfuerzo del pistón de la prensa de compresión del CBR	Los valores de CBR en un suelo se deben al esfuerzo límite establecido por las normas para determinar dichos valores.	Rangos de esfuerzo según el tipo de suelo	Fuerzas Asentamientos a 0.1" y 0.2"
Deformación del suelo fino	El suelo fino presenta deformaciones grandes debido a la falta de estabilidad en sus partículas por la presencia de agua.	Plasticidad del suelo Granulometría	Límite líquido Límite Plástico Índice de plasticidad Porcentaje de finos y gruesos
Coefficientes de proporcionalidad	Son los módulos elásticos que existen mediante la aplicación de fuerzas en una superficie de un cuerpo.	Esfuerzos Deformaciones	Tipo de suelo Fuerzas Asentamientos Área del Pistón Módulo de Poisson
Metodología de cálculo	Método que permite determinar el módulo elástico a partir del principio de elasticidad de suelos y el ensayo CBR.	Correlación numérica entre Módulos elásticos versus valores de CBR	Módulos elásticos Valores de CBR del 95% de la Máxima Densidad Seca

Fuente: Elaboración propia.

3.8 Instrumentos y formato de recolección de datos

Los instrumentos para la recolección de datos se basan en el uso de fuentes bibliográficas electrónicas (artículos científicos), libros de mecánica de suelos e investigaciones relacionados al módulo elástico en los suelos. El formato aplicado para recolectar datos se basa en los formatos usados en el laboratorio de mecánica de suelos para almacenar datos de la granulometría, límites de consistencia y datos del ensayo de CBR; estos se presentan en el Anexo 4.

3.9 Técnicas de recolección de datos, instrumentos y validación de instrumentos

La técnica de recolección de datos se realizó con la recopilación y ejecución de ensayos de laboratorio para determinar la clasificación de suelo y el valor de CBR. Los instrumentos y validación que se utilizan en esta investigación están avalados con los certificados de ensayos de laboratorio (ver Anexo 5). Esta investigación recopiló información de los tipos de suelos finos del proyecto “Mejoramiento y rehabilitación de la infraestructura vial de la Av. San Juan de Dios, tramo Panamericana Norte – Av. Perimétrica en el Distrito de Puente Piedra, Provincia de Lima – Lima” y se participó en los ensayos de laboratorio para los siguientes proyectos: “Proyecto de inversión 1: EMP. PE 5N - Pte. Sichoca - Pte. Goca – Yambrasbamba”, “Proyecto de inversión 2: Emp. Am 108 - Dv. La Nueva Unión - San Jerónimo” y “Vía de acceso del Aeropuerto Capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa”.

3.10 Plan de procesamiento de datos

El procesamiento de datos se basa en la clasificación de información y tabulación de datos obtenidos en laboratorio que cumple con las referencias normativas peruanas para el debido cálculo de cada variable que interviene en esta investigación. La clasificación de un suelo

fino parte del ensayo de granulometría, límites de consistencia y clasificación SUCS y ASSTHO, para luego ejecutar los ensayos de Proctor y CBR. Luego de determinar las características físicas y mecánicas con los ensayos mencionados, se realiza el análisis matemático para determinar el modulo elástico. Finalmente, la determinación de una metodología mediante la creación de una correlación matemática de los módulos elásticos de las muestras de suelo, para posteriormente realizar una comparación con las metodologías mecánicas y/o empíricas existentes.

3.11 Metodología de cálculo del módulo elástico mediante la determinación de dos correlaciones matemáticas en comparación con las metodologías mecanísticas y/o empíricas del cálculo del módulo elástico

3.11.1 Determinación de los coeficientes de proporcionalidad

Los módulos elásticos o coeficientes de proporcionalidad para cada muestra evaluada, fueron determinado con la ecuación 10 y muestran valores representativos del comportamiento del suelo fino, es decir, la aplicación de fuerzas iniciales genera esfuerzos y deformaciones iniciales centrales que simbolizan la recuperación al estado inicial del suelo. Considerando los tipos de suelos finos en composición de arena, limos y arcillas; los coeficientes de Poisson asumido para esta investigación es 0.3 y 0.4 debido a las condiciones del suelo para el ensayo CBR. Putri, Hameswara y Mannan (2012), el coeficiente de influencia del pistón de CBR es 0.79. Se considera el módulo elástico del suelo fino a aquel valor mayor registrado dentro de los módulos elásticos iniciales (Ver Anexo 3), debido a que hipotéticamente es el rango donde el suelo pasa a un estado plástico. Estos módulos se determinan a partir de la compactación de 12 y 26 golpes del proceso de compactación del ensayo de CBR.

3.11.2 Determinación de la correlación entre el valor de CBR y el módulo elástico

Para determinar el modulo elástico de un suelo fino, se evalúa módulos elásticos de distintos suelos finos que presentan valores de CBR típicos. Para generar una correlación numérica entre los valores de CBR y E (Módulos elásticos) se aplica una regresión lineal por Mínimos Cuadrados cuantificando el coeficiente de determinación.

3.11.3 Comparación con otras correlaciones existentes

Existen las correlaciones numéricas por distintos autores que a través de la historia fueron propuestas. Estas correlaciones numéricas relacionan el valor de CBR versus el Módulo Elástico (determinado por sus metodologías). Se determinan los módulos elásticos por las distintas correlaciones numéricas mencionadas en esta investigación y se incluye la correlación propuesta (Ver Anexo 3).

CAPITULO IV: Resultados y discusión

4.1 Resultados del ensayo de análisis granulométrico

En Tabla 8 se muestran los resultados del análisis granulométrico realizado a las muestras de los proyectos mencionados en esta investigación.

4.2 Resultados del ensayo de Límites de Consistencia

En Tabla 9 se muestran los resultados de Límites de Consistencia realizado a las muestras de los proyectos mencionados en esta investigación.

4.3 Resultados de la tipología de suelo fino según SUCS y AASTHO

En Tabla 10 se muestran la clasificación de suelos según SUCS y AASTHO realizado a las muestras de los proyectos mencionados en esta investigación.

4.4 Resultados del ensayo de Proctor y CBR

En Tabla 11 se muestran los resultados de Proctor y CBR realizado a las muestras de los proyectos mencionados en esta investigación.

Tabla 8

Resumen de resultados del análisis granulométrico

Procedencia	Identificación			Análisis granulométrico		
	Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)
Avenida San Juan de Dios de Puente Piedra-Lima	C-1A	M-1	0.30-1.50	1.48	31.45	67.07
	C-3A	M-1	0.30-1.50	3.86	43.68	52.46
	C-8	M-1	1.10-1.40	0.24	43.44	56.31
	C-11	M-1	0.30-1.50	0.88	25.21	73.92
	C-11A	M-1	0.30-1.50	1.07	8.17	90.76
Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa	C-12	M-1	0.30-1.00	0.82	36.2	62.98
	APC-1	M-1	0.50-1.50	0.04	0.4	99.56
	APC-2	M-1	0.50-1.50	0.39	15.8	83.82
Camino vecinal de la localidad de San Jerónimo Camino vecinal de la localidad de Yambrasbamba	APC-3	M-1	0.40-1.50	0.16	5.77	94.07
	C-11	M-2	0.25-1.50	0.25	38.73	61.02
	C-15	M-2	0.30-1.50	3.36	13.47	83.17

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Resumen de resultados de los ensayos de Límites de Consistencia

Procedencia	Identificación			Límites de Consistencia		
	Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Limite Líquido	Limite Plástico	Índice Plástico
Avenida San Juan de Dios de Puente Piedra-Lima	C-1A	M-1	0.30-1.50	34	20	14
	C-3A	M-1	0.30-1.50	No Plástico	No Plástico	No Plástico
	C-8	M-1	1.10-1.40	29	19	10
	C-11	M-1	0.30-1.50	33	21	12
	C-11A	M-1	0.30-1.50	35	22	13
	C-12	M-1	0.30-1.00	28	19	9
Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa	APC-1	M-1	0.50-1.50	41	20	21
	APC-2	M-1	0.50-1.50	46	20	26
	APC-3	M-1	0.40-1.50	68	30	38
Camino vecinal de la localidad de Yambrasbamba	C-15	M-2	0.30-1.50	51	29	22
Camino vecinal de la localidad de San Jerónimo	C-11	M-2	0.25-1.50	49	23	26

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

Resumen de resultados de clasificación de suelos

Procedencia	Identificación			Clasificación	
	Calicata	Muestra	Profundidad (m)	SUCS	AASTHO
Avenida San Juan de Dios de Puente Piedra-Lima	C-1A	M-1	0.30-1.50	CL	A-6 (8)
	C-3A	M-1	0.30-1.50	ML	A-4 (0)
	C-8	M-1	1.10-1.40	CL	A-4 (3)
	C-11	M-1	0.30-1.50	CL	4-6 (8)
	C-11A	M-1	0.30-1.50	CL	A-6 (12)
	C-12	M-1	0.30-1.00	CL	A-4 (3)
Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa	APC-1	M-1	0.50-1.50	CL	A-7-6 (23)
	APC-2	M-1	0.50-1.50	CL	A-7-6 (22)
	APC-3	M-1	0.40-1.50	CH	A-7-5 (42)
Camino vecinal de la localidad de Yambrasbamba	C-15	M-2	0.30-1.50	MH	A-7-6 (20)
Camino vecinal de la localidad de San Jerónimo	C-11	M-2	0.25-1.50	CL	A-7-6 (14)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11

Resumen de resultados del ensayo Proctor Estándar y CBR

Procedencia	Identificación			Proctor		CBR	
	Calicata	Muestra	Profundidad (m)	OCH (%)	MDS (g/cm ³)	95% 0.1''	100% 0.1''
Avenida San Juan de Dios de Puente Piedra-Lima	C-1A	M-1	0.30-1.50	16.10	1.843	5.60	19.20
	C-3A	M-1	0.30-1.50	10.7	2.042	11.00	32.00
	C-8	M-1	1.10-1.40	13.4	1.896	9.00	14.00
	C-11	M-1	0.30-1.50	14.70	1.93	6.40	8.20
	C-11A	M-1	0.30-1.50	15.13	1.845	4.30	8.00
	C-12	M-1	0.30-1.00	14.68	1.867	3.30	5.80
Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David	APC-1	M-1	0.50-1.50	14.20	1.881	12.10	20.80
	APC-2	M-1	0.50-1.50	14.3	1.825	9.00	15.00
Abensur Rengifo de Pucallpa	APC-3	M-1	0.40-1.50	15	1.835	3.40	4.70
Camino vecinal de la localidad de Yambrasbamba	C-15	M-2	0.30-1.50	15.24	1.73	1.07	1.22
Camino vecinal de la localidad de San Jerónimo	C-11	M-2	0.25-1.50	18.12	1.742	1.69	1.77

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Resultados del análisis matemático para determinar los módulos

elásticos mediante el ensayo de CBR y la ecuación de la teoría de la elasticidad

Se determina los coeficientes de proporcionalidad, los cuales son los módulos elásticos para cada espécimen donde se aplica las fuerzas por la prensa de compresión de CBR. Para determinar estos módulos elásticos (tangentes), se realiza el análisis de esfuerzo y deformación propuesto por la teoría de la elasticidad (ver Anexo 3), el cual es usado en el ensayo Placa de Carga.

En el Anexo 3 se presenta los módulos elásticos para cada muestra analizada.

4.6 Determinación del módulo elástico por cada muestra evaluada

El modulo elástico determinado dentro del conjunto de módulos elásticos, es el más alto valor debido a que hipotéticamente se encuentra en el rango donde el suelo pasa a un estado

plástico. La Figura 14 se presenta la curva típica de penetración del ensayo CBR del suelo fino perteneciente al Proyecto de San Jerónimo, en la cual se aprecia el módulo elástico determinado a partir de la evaluación de coeficientes de proporcionalidad, considerando los coeficientes de Poisson como 0.3 y 0.4.

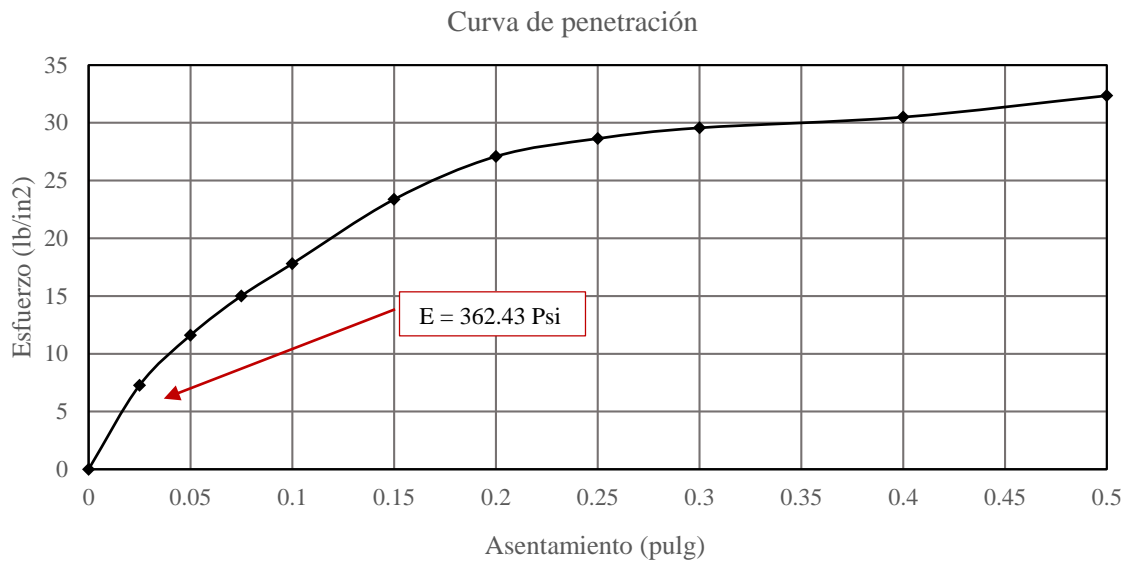


Figura 14. Curva de penetración típica del ensayo de CBR para la muestra C-11 / M-2 del Proyecto San Jerónimo, coeficiente de Poisson 0.3. Fuente: *Elaboración propia.*

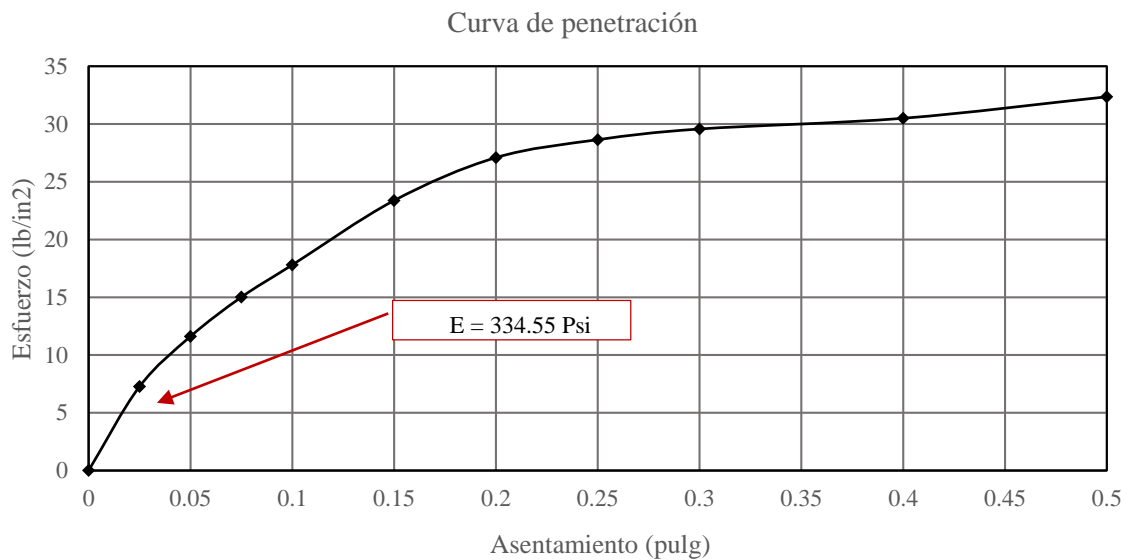


Figura 15. Curva de penetración típica del ensayo de CBR para la muestra C-11 / M-2 del Proyecto San Jerónimo, coeficiente de Poisson 0.4. Fuente: *Elaboración propia.*

En la Tabla 12 y 13 se muestran los módulos elásticos determinados a partir del incremento de esfuerzos y Asentamiento para cada muestra.

Tabla 12

Resumen de módulos elásticos determinado para cada muestra con coeficiente de Poisson 0.3

Procedencia	Identificación			Esfuerzo (lb/in ²)	Asentamiento (in)	Módulo Elástico (Psi)
	Calicata	Muestra	Profundidad (m)			
Avenida San Juan de Dios de Puente	C-1A	M-1	0.30-1.50	16.06	0.025	918.42
	C-3A	M-1	0.30-1.50	41.72	0.025	2385.38
Piedra-Lima	C-8	M-1	1.10-1.40	28.91	0.025	1653.08
	C-11	M-1	0.30-1.50	9.64	0.025	551.19
Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa	C-11A	M-1	0.30-1.50	11.76	0.025	672.12
	C-12	M-1	0.30-1.00	25.70	0.050	734.59
San Jerónimo	APC-1	M-1	0.50-1.50	52.18	0.025	2983.30
	APC-2	M-1	0.50-1.50	30.50	0.025	1743.70
Yambrasbamba	APC-3	M-1	0.40-1.50	16.56	0.025	946.81
	C-11	M-2	0.25-1.50	6.34	0.025	362.43
	C-15	M-2	0.30-1.50	4.64	0.025	265.03

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Resumen de módulos elásticos determinado para cada muestra con coeficiente de Poisson 0.4

Procedencia	Identificación			Esfuerzo (lb/in ²)	Asentamiento (in)	Módulo Elástico (Psi)
	Calicata	Muestra	Profundidad (m)			
Avenida San Juan de Dios de Puente	C-1A	M-1	0.30-1.50	16.06	0.025	847.77
	C-3A	M-1	0.30-1.50	41.72	0.025	2201.89
Piedra-Lima	C-8	M-1	1.10-1.40	28.91	0.025	1525.92
	C-11	M-1	0.30-1.50	9.64	0.025	508.79
Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa	C-11A	M-1	0.30-1.50	11.76	0.025	620.42
	C-12	M-1	0.30-1.00	25.70	0.050	678.08
San Jerónimo	APC-1	M-1	0.50-1.50	52.18	0.025	2753.82
	APC-2	M-1	0.50-1.50	30.50	0.025	1609.57
Yambrasbamba	APC-3	M-1	0.40-1.50	16.56	0.025	873.98
	C-11	M-2	0.25-1.50	6.34	0.025	334.55
	C-15	M-2	0.30-1.50	4.64	0.025	244.64

Fuente: Elaboración propia.

La deformación parcial tiene por consiguiente su esfuerzo parcial, con los cuales se determinan los coeficientes de proporcionalidad. En la Tabla 14 se muestra las deformaciones y esfuerzos parciales con los cuales se determinó los módulos elásticos.

Tabla 14

Resumen de esfuerzos y deformaciones para cada muestra con coeficiente de Poisson 0.3 y 0.4

Procedencia	Calicat a	Identificación		Deformación Parcial (%)	Esfuerzo Parcial (%)
		Muestr a	Profundidad (m)		
Avenida San Juan de Dios de Puente Piedra-Lima	C-1A	M-1	0.30-1.50	5	18
	C-3A	M-1	0.30-1.50	5	28
Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa	C-8	M-1	1.10-1.40	5	15
	C-11	M-1	0.30-1.50	5	16
	C-11A	M-1	0.30-1.50	5	8
San Jerónimo	C-12	M-1	0.30-1.00	10	38
	APC-1	M-1	0.50-1.50	5	13
Yambrasbamba	APC-2	M-1	0.50-1.50	5	17
	APC-3	M-1	0.40-1.50	5	17
	C-11	M-2	0.25-1.50	5	21
	C-15	M-2	0.30-1.50	5	18

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de deformación parcial para cada muestra es de 5%, excepto la muestra C-12/M-1, esto significa que el módulo elástico se encuentra en un incremento de asentamiento de 0.025 pulgadas. La muestra C-12 / M-1 presentó una deformación parcial de 10% significando que su módulo elástico se encuentra en un incremento de asentamiento de 0.05 pulgadas.

Los porcentajes de esfuerzos parciales para todas las muestras se encuentran en un promedio de 19%. El 19% es el porcentaje del esfuerzo total aplicado en las muestras de suelos finos evaluados para determinar sus módulos elásticos.

4.7 Resultados de la correlación matemática propuesta en comparación con las metodologías del cálculo del módulo elástico

Según las características físicas y mecánicas del suelo fino, estos presentan rangos de capacidad de soporte de CBR. Considerando estos valores y los módulos elásticos se determina la correlación numérica por regresión lineal aplicando la teoría de Mínimos Cuadrados cuantificando el coeficiente de determinación.

Para las muestras de pertenecientes al Proyecto de la Av. San Juan de Dios de Puente Piedra, Camino vecinal de San Jerónimo y Camino Vecinal de Yambrasbamba se consideraron la energía de compactación de 26 golpes debido a que su CBR de 95% de MDS (Máxima densidad seca del Proctor) se encuentra cercano a su densidad seca. Para la muestra APC-1 y APC-3 del Proyecto “Vía de acceso del aeropuerto capitán FAP David Abensur Rengifo de Pucallpa” se consideró la energía de compactación de 26 golpes debido a la misma condición del Proyecto de la Av. Av. San Juan de Dios de Puente Piedra y la Muestra APC-2 se consideró la energía de compactación de 12 golpes debido a que su CBR de 95% de MDS (Máxima densidad seca del Proctor) se encuentra cercano a su densidad seca.

En la Figura 15 y 16 se muestran las regresiones lineales de los módulos elásticos evaluados con el CBR y la ecuación de la teoría de la elasticidad, determinando las siguientes correlaciones numéricas:

Para un coeficiente de Poisson de 0.3:

$$E = 222.32CBR - 166.54 \quad (21)$$

Para un coeficiente de Poisson de 0.4:

$$E = 205.22CBR - 153.73 \quad (22)$$

Donde:

E = Modulo Elástico (Psi)

CBR = Valor de CBR obtenido al 95% de la Máxima Densidad Seca de la penetración de 0.1 pulgadas.

La cuantificación del error o el coeficiente de determinación de la regresión lineal para los datos de entrada (CBR vs E) en ambas correlaciones es la siguiente:

$$R^2 = 0.88 \quad (23)$$

Donde:

R = Coeficiente de determinación.

Esto significa que el modelo lineal propuesto explicó el 88% de variabilidad de los datos.

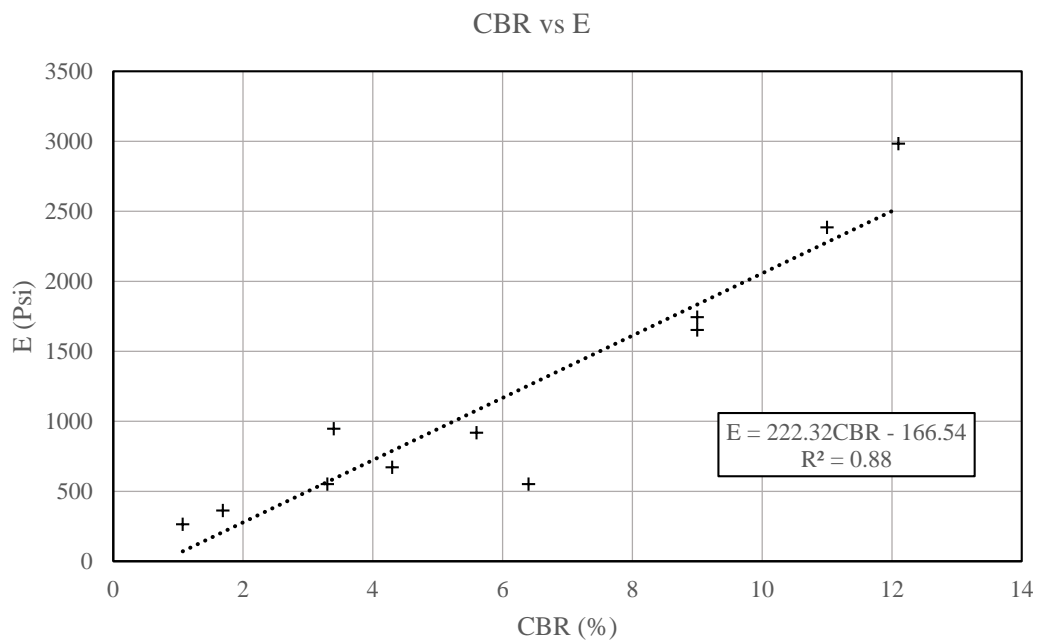


Figura 16. Regresión lineal para determinar la correlación numérica del Módulo Elástico con coeficiente de Poisson 0.3. Fuente: *Elaboración Propia.*

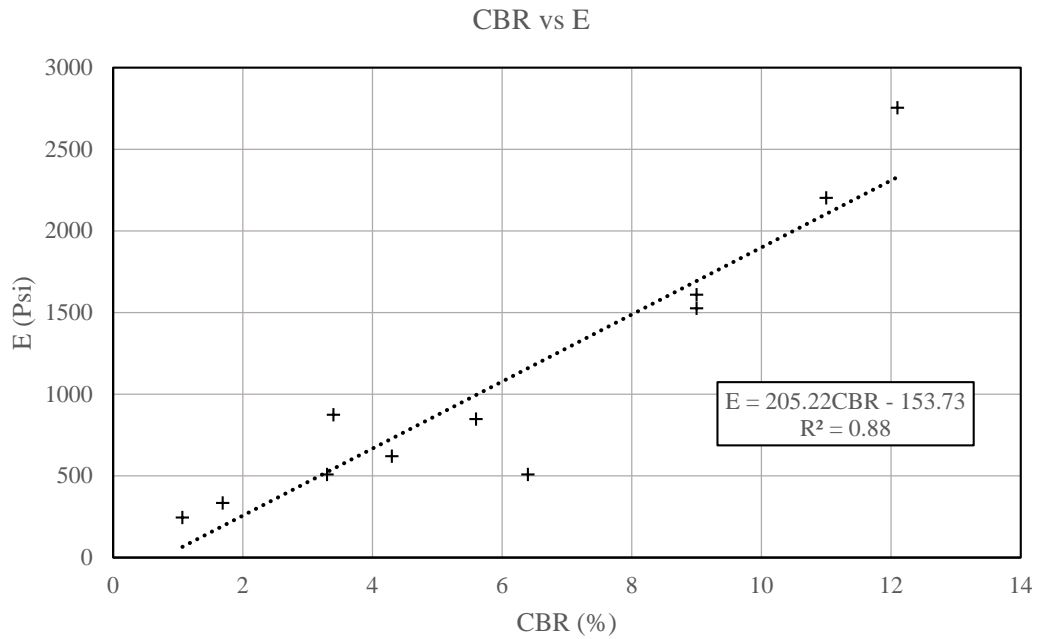


Figura 17. Regresión lineal para determinar la correlación numérica del Módulo Elástico con coeficiente de Poisson 0.4. Fuente: *Elaboración Propia*.

Se calculó los módulos elásticos con las metodologías existentes y se realizó las comparaciones de resultados incluyendo la metodología propuesta en esta investigación. En la Figura 17 y 18 se muestra el ábaco de las curvas de CBR (%) versus Módulos Elásticos.

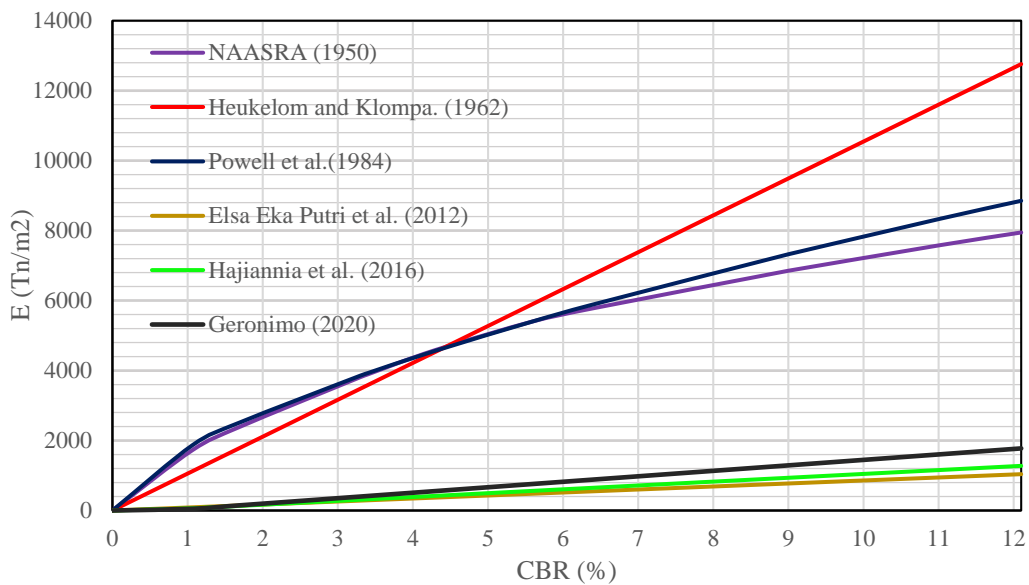


Figura 18. Abaco de curvas para determinar el módulo elástico según las investigaciones, coeficiente de Poisson 0.3. Fuente: *Elaboración Propia*.

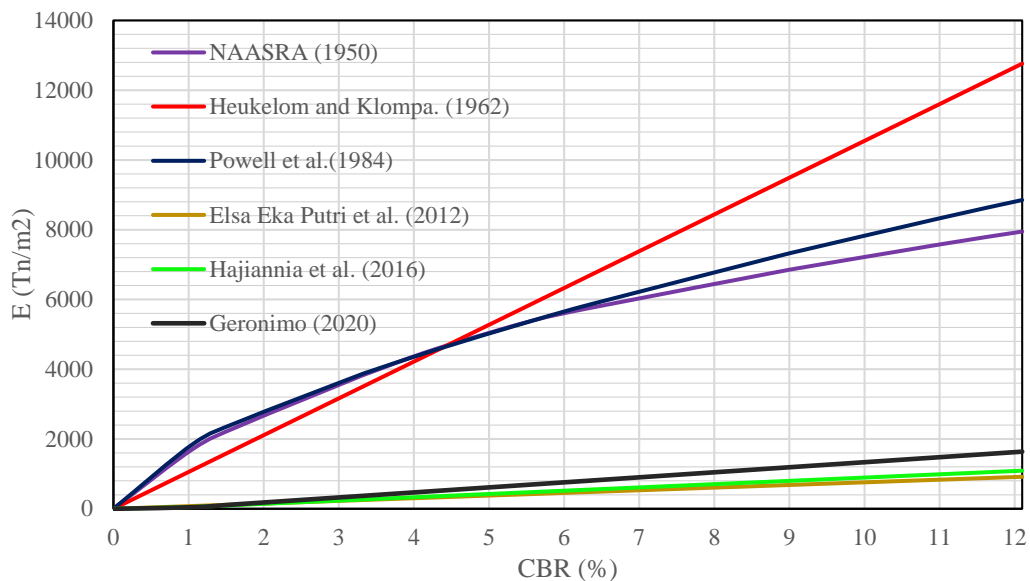


Figura 19. Abaco de curvas para determinar el modulo elástico según las investigaciones, coeficiente de Poisson 0.4. Fuente: *Elaboración Propia*.

El ábaco de curvas de CBR vs E (Módulo elástico) para suelos finos presenta diferencias en resultados. Las tres últimas investigaciones (incluyendo la metodología propuesta en esta investigación) muestran que los suelos finos presentan valores muy inferiores a las primeras investigaciones. En la Tabla 6 se presentan los módulos elásticos para cada tipo de suelo, entre ellos se encuentran los suelos finos (limos y arcillas), relacionando hipotéticamente estos módulos con los determinados por las tres últimas investigaciones, estas tienden a tener valores cercanos.

CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Del objetivo específico 1. Esfuerzo para determinar el Módulo Elástico

Entre el conjunto de esfuerzos aplicados por el pisón de la prensa de compresión del equipo de CBR para una determinada muestra, se encuentran diversos esfuerzos que definen los coeficientes de proporcionalidad (módulos elásticos). Entre estos esfuerzos se encuentra un esfuerzo que define al Módulo Elástico, en esta investigación se presenta que dicho esfuerzo se encuentra en un promedio del 19% del esfuerzo total aplicado en el ensayo de CBR.

Del objetivo específico 2. Deformación del suelo fino de subrasante para determinar el Módulo Elástico

Entre el conjunto de deformaciones del suelo fino de subrasante para una determinada muestra, se encuentran diversas deformaciones que definen los coeficientes de proporcionalidad (módulos elásticos). Entre estas deformaciones se encuentra una deformación que define al Módulo Elástico, en esta investigación se presenta que dicha deformación es al 5% de un asentamiento de 0.5 pulgadas, dependiendo del comportamiento del suelo fino.

Del objetivo específico 3. Módulo Elástico a partir del conjunto de coeficientes de proporcionalidad

Entre los conjuntos de coeficientes de proporcionalidad (módulos elásticos) determinados mediante el ensayo de CBR y la aplicación de la ecuación de la teoría de la elasticidad, se encuentra el máximo valor, el cual hipotéticamente es el valor que define al límite del estado plástico de un suelo fino de subrasante para una determinada muestra. Por lo tanto, se

comprueba la hipótesis de la investigación, definiendo al módulo elástico como el valor mayor del conjunto de coeficientes de proporcionalidad.

Del objetivo específico 4. Metodología de cálculo para determinar la correlación matemática en comparación con las metodologías existentes del cálculo de módulo elástico

La evaluación de resultados de módulos elásticos de las muestras usadas en esta investigación consideró coeficientes de Poisson de 0.3 y 0.4, factor de influencia de pisón de 0.79 y la energía de compactación superior, igual o cercana al 95% MDS del CBR; permitieron determinar dos nuevas correlaciones matemáticas. Se aplicó el teorema de mínimos cuadrados y el coeficiente de determinación, entre los valores de CBR al 95% de la Máxima Densidad Seca del Proctor y los Módulos Elásticos determinados a partir del análisis teórico de elasticidad en el suelo (usado en el ensayo Placa de Carga). Esta nueva correlación de modelo lineal permite determinar el Módulo Elástico para suelos finos (limos y arcillas), teniendo una variabilidad del 88% de los datos. Asimismo, los resultados de estas nuevas correlaciones se encuentran cercanos a la de Hajiannia et al. (2016) y Elsa Eka Putri et al. (2012) y lejanos a los de Powell et al. (1984), Huekelom and Klomp. (1962) y NAASRA (1950).

Del objetivo general. El módulo elástico a partir del ensayo CBR y la ecuación de la teoría de la elasticidad del ensayo de Placa de carga para suelos finos de subrasante

Se concluye que el módulo elástico se determina a partir del ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) y la ecuación de teoría de la elasticidad del Ensayo de Placa de carga.

- El suelo fino (limos y arcillas) presentan inestabilidad al contacto con el agua, por lo cual es necesario determinar su módulo elástico con fines de diseño de pavimentos flexibles.

- El ensayo de CBR es considerado en esta investigación como un ensayo de placa de carga a escala reducida, por ende, puede aplicarse la teoría de elasticidad.
- Basado en la data obtenida, se presentó una nueva correlación matemática para determinar el módulo elástico a partir del resultado de CBR.

Finalmente, se concluye que la determinación del módulo elástico de un suelo fino de subrasante es a partir de las nuevas ecuaciones numéricas o por el análisis de esfuerzo-deformación de esta investigación, logrado a través de un ensayo convencional (CBR). Este ensayo se encuentra disponible y su costo es factible en los laboratorios nacionales.

5.2 Recomendaciones

Para determinar deformaciones más controladas se recomienda realizar las evaluaciones de lecturas de carga aplicadas por la prensa de CBR en asentamientos menores a lo convencional del ensayo. De lo anterior, se determina nuevos esfuerzos y, por ende, nuevos coeficientes de proporcionalidad.

Para aumentar la variabilidad con tendencia a llegar al 100%, se recomienda ampliar la data de distintos tipos de suelos finos en distintas regiones del Perú.

Mediante una investigación basada en el análisis de esfuerzo y deformación para suelos, se podría correlacionar con el servicio del equipo de CBR para determinar un módulo elástico según la sollicitación de cimentación que se requiera.

CAPITULO VI: Referencias

- Alhama, I., García, G., & Alhama, F. (2017). *Problemas fundamentales de elasticidad de suelos*. Cartagena: Rai UPCT.
- Alva Hurtado, J. E., Scaletti, H. F., Luis, Z. C., Julio, R. F., Roberto, M. M., Carlos, C. R., . . . Sandra, S. Q. (1998). *Cimentaciones de concreto armado en edificaciones*. Lima: ACI.
- Araujo Navarro, W. (2014). Ecuaciones de correlación del CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura. *Tesis de pregrado*. Piura, Perú: Universidad de Piura.
- ASTM, I. (2018). Standard Test Method for Bearing Capacity of soil Static Load and Spread Footings. *ASTM D 1194-94*, 1-3.
- ASTM, I. (2018). Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. *ASTM D 1883-07*, 1-9.
- Badillo, J., & Rodríguez, R. (1995). *Mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Guerrero Urquilla, L. E., Miranda Martínez, H. A., & Antonio, R. J. (2008). Correlación del módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y coeficiente de capa en bases de suelo cemento. *Tesis de pregrado*. Ciudad Universitaria, El Salvador: Universidad de el Salvador.
- Hajiannia, A., Dorobati, M. T., Kasaeian, S., & Baghbadorani, S. B. (2016). Correlation between the results of the PLT and CBR tests to determine the elasticity modulus. *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 5*, 1-6.
- Jaime Gómez, G. (2009). Determinación de las ecuaciones de correlación entre los ensayos que proporcionan los valores de resistencia de la subrasante en el tramo de la Carrera

45 con calle 86 hasta el parque de Aranjuez del sistema de transporte masivo metroplús. *Tesis de pregrado*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín .

M. Das, B. (2014). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Cengage Learning Editores.

Otálvaro, I. F., & Nanclares, F. J. (2008). Elementos para obtener el Módulo de reacción de subrasante. *Universidad Nacional de Colombia*, 1-9.

Putri, E. E., Kameswara Rao, N. S., & Mannan, M. A. (2012). Evaluation od Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test. *Journal of Civil Engineering Research*, 1-7.

Rojas Huamaní, J. (2017). Obtención del Módulo de elasticidad en arcillas normalmente consolidadas mediante ensayos de consolidación unidimensional. *Tesis de pregrado*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Rosales Asto, E. A. (2014). Determinación de la deformación elástica y el módulo de elasticidad en suelos expansivos mediante ensayos de expansión libre y consolidación. *Tesis de pregrado*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Villalaz, C. (2008). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa .

CAPITULO VII: Anexos

Anexo 1. Planos de ubicación

PLANOS DE UBICACIÓN

PANEL FOTOGRAFICO

MEMORIA DE CÁLCULO

FORMATOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

CERTIFICADO DE ENSAYOS DE LABORATORIO

CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

**CERTIFICADO DE TITULO
TÉCNICO DEL PARTICIPANTE EN LA
INVESTIGACIÓN**

MATRIZ DE CONSISTENCIA