

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La compactación de los suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas como lo es la resistencia, la compresibilidad y su relación con el módulo de elasticidad, el proceso de compactación es para obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra.

En el medio local para determinar el grado de compactación en una subrasante es a través de la razón de la densidad seca del material in-situ para la densidad máxima de un material obtenido previamente en un ensayo Proctor modificada (norma AASHTO T-99), lo que comúnmente se deja de lado el comportamiento mecánico del suelo, el mismo que es variado por factores que intervienen durante el tendido del material, por cambios naturales en la cantera, entre otros.

Es por ello que se pretende comprobar que la densidad de un material guarda una relación con su módulo de elasticidad, es decir que a mayor nivel de compactación mayor será su módulo de elasticidad y que es más beneficioso conocer el valor de esta constante ya que se tiene una idea del esfuerzo que resiste un suelo antes de que llegue a deformarse por completo.

En todo proyecto de ingeniería civil el estudio de suelos juega un papel importante antes de levantar cualquier tipo de estructura ya que gracias a esta se define la calidad del suelo, la cimentación requerida o el espesor de las capas de suelos empleadas en un pavimento, etc.

1.2. Situación problemática

El cambio de volumen de la masa de suelo depende de la magnitud del cambio de la humedad y de la cantidad y la clase de arcilla presente en el suelo, por esto la compactación es un tratamiento mecánico que se emplea principalmente en campo con el fin de tener que mejorar sus condiciones de resistencia, compresibilidad y el módulo de elasticidad.

Así mismo se debe considerar que el módulo de elasticidad puede variar significativamente debido a factores como la granulometría y el contenido de humedad siendo estas dos las más importantes y entre otras tenemos la dureza y la forma de las partículas.

Comúnmente se deja de lado el comportamiento mecánico del suelo, pero por razones prácticas es conveniente tratar al suelo como un material con parámetros elásticos para estimar asentamientos, ya que debido a los cambios de esfuerzos en el terreno generan deformaciones y mayores cambios de esfuerzos generan mayores deformaciones.

Es necesario analizar a mayor detalle cómo la densidad de un material en sitio como en laboratorio se relaciona con el módulo de elasticidad y establecer una relación adecuada entre ambos, tomando en cuenta que trabajaremos en arcillas de media a baja compresibilidad.

1.2.1. Problema

¿De qué manera incide la variación del grado de compactación en el comportamiento del módulo de elasticidad de una arcilla de media a baja compresibilidad que conforma una subrasante?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

En nuestro medio, generalmente el control de compactación de alguna obra vial o una subrasante en este caso específico se realizará a través de ensayos que miden la densidad seca de un material para determinar el grado de compactación de un suelo (método de cono y arena), otorgada por una curva de densidad máxima que a la vez es obtenida por el ensayo Proctor en laboratorios o por dispositivos que miden este mismo valor, entonces estos métodos no evalúan cual será el comportamiento de dicho material al estar bajo la acción de cargas.

Entonces podemos decir que al realizar el análisis de cómo afecta o como hace variar el grado de compactación al comportamiento del módulo de elasticidad en un suelo se verá y podrá anticipar lo que va ocurrir con la deformación de dicho tramo para la futura doble vía que se tiene planificada en el mismo.

La utilización de la información recabada en esta investigación permitirá conocer cuál será el comportamiento mecánico del material al estar sometido a cargas antes que éste llegue a deformarse por completo.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

La presente investigación tendrá validez hasta que las condiciones del terreno donde se hizo la extracción del material analizado cambien, por consecuencia cambiarán las propiedades mecánicas, químicas y físicas del mismo, entonces presentarán características diferentes a los resultados obtenidos en este proyecto.

Este proyecto pertenece al área de la mecánica de suelos, será desarrollado y analizado en la ciudad de Tarija provincia Cercado, tanto en el campo de estudio, el laboratorio de suelos e instalaciones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho zona El Tejar, el material analizado es extraído de un tramo de la ciudad, específicamente de la Segunda Circunvalación, dicho proyecto se aplicará a los trabajos de investigación en la deformación de suelos.

1.3. Justificación

En Mecánica de Suelos, es común el empleo de correlaciones para estimar parámetros geo mecánicos de diferentes tipos de suelos naturales, basándose en el tipo de material, clasificación, propiedades índice o resultados de ensayos in situ.

La incidencia del grado de compactación se considera de suma importancia práctica, ya que suele haber gran variación de criterios al momento de determinar los parámetros elásticos para estimar las deformaciones del material, lo cual puede resultar en la subestimación o sobrestimación en el diseño definitivo de futuras cimentaciones.

Al igual que para suelos naturales, en el cálculo y diseño de fundaciones que se apoyarán en subrasantes es primordial el conocimiento de los parámetros fundamentales asociados a la resistencia al corte y a la deformabilidad de los mismos. En este punto, es importante considerar que no siempre es posible determinar tales parámetros mediante ensayos de laboratorio o de campo, debido a limitaciones a nivel de anteproyecto, falta de préstamos por motivos legales o desconocimiento de la ubicación de los mismos al momento de realizar el estudio geotécnico.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

Analizar el grado de compactación en arcillas de media a baja compresibilidad mediante la compresión no confinada a través de la curva esfuerzo-deformación para definir el comportamiento del módulo de elasticidad en una subrasante.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales a utilizar en los ensayos.
- Calcular la densidad in situ del material.
- Obtener la densidad seca máxima.
- Establecer la variación del módulo de elasticidad con el contenido de humedad.
- Analizar la variación del módulo de elasticidad con la densidad seca.
- Definir el módulo de elasticidad para cada una de las curvas esfuerzo- deformación obtenidas de ensayos de compresión no confinada.
- Desarrollar la curva Módulo de elasticidad vs Grado de compactación para los valores promedios obtenidos de cada rango.

1.5. Hipótesis

Si al analizar la incidencia de la variación del grado de compactación en una arcilla de media a baja compresibilidad se podrá establecer una relación en el comportamiento del módulo de elasticidad para una subrasante.

1.6. Operacionalización de las variables

Se trata de establecer y analizar la incidencia del grado de compactación en el comportamiento del módulo de elasticidad de material conformado por arcillas de media a baja compresibilidad en una sub rasante.

1.6.1. Variable independiente

El módulo de elasticidad.

1.6.2. Variable dependiente

El grado de compactación.

1.6.3. Conceptualización de las variables y operacionalización de variables

Tabla 1.1 Variable independiente

Variable independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
El módulo de elasticidad en sub rasantes	Puede definirse como la relación de los esfuerzos a los que el suelo es sometido entre los asentamientos que se producen en el cuándo estos esfuerzos son aplicados.	Esfuerzos a los que se somete la muestra	N/m ²	Preparación previa del equipo para la administración de cargas.
		Muestras no saturadas	Se hará el ensayo de compresión no confinada	Para este ensayo las muestras no son saturadas.
		Muestras alteradas	Se harán las probetas a diferentes grados de compactación	En laboratorio se realizarán las probetas para la prueba.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.2 Variable dependiente

Variable dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/acción
El grado de compactación en una sub rasante	Depende de la compactación ya que este proceso busca mejorar sus propiedades en términos de resistencia, compresibilidad y comportamiento esfuerzo-deformación	Humedad optima	Porcentaje (%)	Valor extraído de la curva de Compactación de los materiales.
		Densidad máxima	(gr/cm ³)	Valor extraído de la curva de Compactación de los materiales.
		Densidad seca In Situ	(gr/cm ³)	Valor extraído de la curva de Compactación de los materiales obtenidas en campo.

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de Investigación

El tipo de investigación para el desarrollo de este proyecto es el diseño experimental, basado en el tipo descriptivo donde solo una de las variables es manipulable.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

Las unidades de estudio y decisión ayudan a visualizar los elementos sobre el cual se desarrolló la investigación, para ello se tiene lo siguiente:

1.8.1. Unidad de estudio

Se denomina unidad de estudio a aquel elemento que nos brindará la información necesaria, en este caso llegan a ser los siguientes:

Los ensayos de suelo fino clasificados como A-4; A-6; y A-7 o (CL – ML) desarrollados en el laboratorio de suelos y una práctica en campo.

1.8.2. Población

La caracterización de suelos, tiene una lista extensa de ensayos, que se realizan en un laboratorio de suelos. Podemos citar algunos como una población de ensayos cercana a la realidad y condiciones del laboratorio de suelos:

Ensayo de Contenido de Humedad

Ensayo de Granulometría

Ensayo de límites de Atterberg

Ensayo de Compactación (Proctor modificada T-99)

Ensayo Densidad In Situ

Elaboración de probetas alteradas

Ensayo de compresión no confinada.

1.8.3. Muestra

Las muestras son de un tramo en este caso a cada cincuenta metros. Sin embargo, la muestra respecto a la población, se refiere a los ensayos que realmente se requirieron en la presente investigación.

Tamaño de muestra

Tamaño de la muestra (n): desconocido

Nivel de confianza: NC=95%, la variable estandarizada de la tabla de distribución normal es Z=1,96

El margen de error es: e=5%, deducido por el nivel de confianza.

La varianza $\sigma^2 = 0,12$, asumida en función al tiempo asignado.

Utilizando la ecuación de medias poblacionales para una población infinita:

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

$$n = \frac{1,96^2 * 0,12^2}{0,05^2} = 184,39$$

n= 185 ensayos

Considerando que son muchos ensayos la muestra encontrada se lleva a ser la población.

Población(N)=185 ensayos.

Muestra (n)=desconocido

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}}$$

Ensayo	Ni	Σ	Ni*σ	fi	ni
Granulometría	60	0,1	6	0,3243243	10
Compactación	40	0,1	4	0,2162162	6
Densidad In Situ	40	0,1	4	0,2162162	6
Compresión no confinada	45	0,1	4,5	0,2432432	8
	185		18,5		30

$$n = \frac{18,5}{185 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{18,5}{185}} = 30$$

Tenemos 10 rangos de variación en función al grado de compactación posibles para esta investigación que va de (10%-100%) con un 10% de diferencia por lo que tomaremos los 10 como población para calcular la muestra de cada rango aplicado en este caso

$$n = \frac{1}{10 * \left(\frac{0,15}{1,96}\right)^2 + \frac{1}{10}} = 6$$

Si $n=6$, que son los rangos de 30 ensayos que debemos realizar, entonces:

Donde:

m = Número de probetas por cada rango

$$m = \frac{30}{6} = 5 \text{ probetas}$$

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

El muestreo que fue seleccionado para esta investigación es el sistemático, ya que se vio conveniente para saber las características del tramo en estudio.

Para ello es necesario seleccionar un punto de partida para la muestra y un tamaño de muestra que pueda repetirse a intervalos regulares. Este tipo de método de muestreo tiene un alcance predefinido y, por lo tanto, esta técnica de muestreo es la que menos tiempo consume.

Se procedió a extraer muestras de un tramo de 1500 metros aproximadamente ubicado en la ciudad de Tarija, llamado segunda Circunvalación, se extrajo cada muestra a 50 metros de distancia aproximadamente, ya que el suelo tiene similar clasificación en todo el tramo y cuenta con la capa de subrasante necesaria para este análisis.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

Se utilizó dos métodos y técnicas de investigación: Empíricos y teóricos.

Empíricos porque nos iremos a realizar pruebas al laboratorio para ver si nuestra hipótesis es verdadera, y teórico porque el proceso que realizaremos para saber estos detalles de la muestra en estudio ya está plasmado en una bibliografía.

1.9.1. Métodos

Experimentales:

Empezando con la observación en campo, extracción de material requerido a cierta distancia para evaluar como un tramo, los ensayos de caracterización del mismo y los ensayos que definirán su comportamiento frente a las observaciones que se plantean en este tema de investigación.

Teóricos:

Estos métodos permiten describir las relaciones esenciales del objeto de investigación no observables directamente, cumpliendo con la construcción del conocimiento que facilite a interpretación conceptual de los datos empíricos obtenidos durante el proceso y la construcción del desarrollo de estas teorías.

En este caso usaremos el método analítico ya que es el que más se adecúa a nuestra investigación en curso, ya que no se trata de comparaciones, siendo más útil el hecho de ver el comportamiento de una sola de las variables en específico.

1.9.2. Técnicas

Las técnicas de estudio son herramientas, procedimientos o métodos que se utilizan para el estudio o la investigación de un determinado tema, existen variedad de técnicas que son empleadas en el análisis de algo en particular.

Aplicaremos la técnica experimental, que está basada en la realización de experimentos que buscan hallar resultados de diferentes pruebas, de los cuales se obtienen parámetros para un determinado elemento que todavía no ha sido establecido oficialmente. Se utiliza la técnica experimental con el fin de obtener nuevas soluciones, posibilidades y elementos que puedan ser aplicados o usados de tal modo que a partir de varios ensayos se llegue a establecer una conclusión que pueda ser útil a futuro. En nuestro caso se realizarán la pruebas o ensayos de laboratorio de suelos, necesarios para definir el comportamiento del

módulo de elasticidad a partir de diferentes cargas en material que compone una subrasante.

1.10. Procesamiento de la información

Análisis con la estadística descriptiva:

La Estadística Descriptiva

Es el estudio de los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir a un conjunto de datos. Se asume que es descriptivo el estudio de un conjunto de datos, cuando simplemente se describen o analizan a los datos.

En nuestro caso estamos viendo y sacando valores mayores, promedios y mínimos para analizar el comportamiento del suelo.

1.11. Alcance de la investigación

Para el siguiente proyecto se usará muestras de arcillas de clasificación A-4; A-6 y A-7 que conforman una subrasante para poder realizar un análisis del comportamiento del módulo de elasticidad con respecto al grado de compactación, para lo cual se extraerá las muestras del tramo escogido, ubicado en la Ciudad de Tarija, llamado segunda Circunvalación, en este caso las muestras extraídas son a cada 50 metros de distancia en un tramo que contiene 1500 metros de longitud aproximadamente ya que son 30 puntos de muestras los que se analizarán. Se desarrollarán los ensayos en el laboratorio de la universidad, como ser clasificación de suelos, compactación, y la compresión no confinada de las probetas elaboradas en función a cada grado de compactación al cual se realizará el análisis, por último, la densidad In Situ se la realizara en el tramo ya que es un dato que necesitamos para saber el grado de compactación al cual se encuentra la subrasante en su estado natural.

CAPÍTULO II

**LA COMPACTACIÓN EN EL
COMPORTAMIENTO DEL
MÓDULO DE ELASTICIDAD**

CAPÍTULO II

LA COMPACTACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

2.1. Suelos finos

Figura 2.1 Suelo fino



Fuente: Elaboración propia

Se consideran suelos finos los que pasan por la malla N°200 (0,074 mm). Para reconocer si un suelo fino es limo o arcilla se recurre a ensayos sencillos.

Arcilla. - Suelo de granos finos (compuesto por partículas menores a 5 micrones), que posee alta plasticidad dentro de ciertos límites de contenido de humedad y que, secado al aire, adquiere una resistencia importante.

Las arcillas constituyen aproximadamente un 70% de la corteza terrestre, presentan una estructura laminar, son plásticos y su resistencia depende tanto del rozamiento interno de sus partículas sólidas como de la fuerza de cohesión de las mismas, por lo que también se denominan suelos cohesivos. Presentan una facilidad para modificar sus propiedades adecuándolas a cualquier aplicación y son geológicamente inestables.

Los suelos arcillosos, son suelos desintegrados, transportados por el agua y por el viento hasta que se depositan y se acumulan como sedimentos. Estos depósitos se compactan por el peso de las sucesivas capas de material y se disponen en forma de capas y estratos.

2.2. Características de suelos arcillosos

- Formados por arcilla.
- Partículas diminutas menos de 0,002 mm de diámetro.
- Impermeables (pasa poca agua).
- Suelos pesados.
- Cuando este húmedo es pegajoso y se hace una bola.
- Un suelo arcilloso es un terreno pesado que no filtra casi el agua.
- Es plástico en estado húmedo y posee muchos nutrientes y materia orgánica.

2.3. Compresibilidad

La compresibilidad es el grado en que una masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga. Es mínima en los suelos de textura gruesa, que tienen las partículas en contacto. Aumenta a medida que crece la proporción de partículas pequeñas y llega al máximo en los suelos de grano fino que contienen materia orgánica. A continuación, se dan algunos ejemplos de compresibilidad para diversos suelos:

Las gravas y las arenas son prácticamente incompresibles. Si se comprime una masa húmeda de estos materiales no se produce ningún cambio significativo en su volumen;

Las arcillas son compresibles. Si se comprime una masa húmeda de arcilla, la humedad y el aire pueden ser expelidos, lo que trae como resultado una reducción de volumen que no se recupera inmediatamente cuando se elimina la carga.

Los suelos de grano fino que contienen por lo menos 50% de limo + arcilla, pueden clasificarse de acuerdo a tres clases de compresibilidad sobre la base de su límite líquido, Estas clases son las siguientes:

- Compresibilidad baja: LL inferior a 30
- Compresibilidad media: LL de 30 a 50
- Compresibilidad alta: LL superior a 50

2.4. Importancia del estudio de la compresibilidad

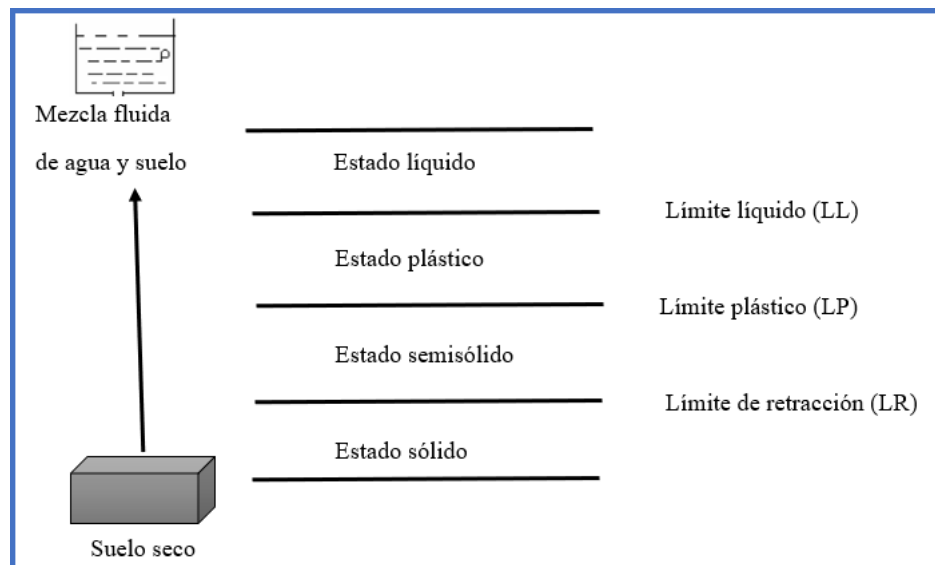
El estudio de la compresibilidad de los suelos es de suma importancia por su aplicación en la ingeniería, dado que trata de evaluar dos grandes cuestiones:

1. Cuánto se deforma un estrato bajo una cierta carga.
2. Cuánto tiempo tarda en deformarse el estrato.

2.5. Límites de Atterberg

Los límites se basan en el concepto de que un suelo de grano fino solamente puede existir en cuatro estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco, pasando al añadir agua a los estados semisólido, plástico y finalmente líquido, como se indica en la siguiente figura. Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan límite de retracción o contracción, límite plástico y límite líquido.

Figura 2.2 Estados del suelo



Fuente: Guía de laboratorio de suelos

Índice de plasticidad. - El índice de plasticidad se expresa con el porcentaje del peso en seco de la muestra de suelo, e indica el tamaño del intervalo de variación del contenido de humedad con el cual el suelo se mantiene plástico. En general, el índice de plasticidad

depende sólo de la cantidad de arcilla existente e indica la finura del suelo y su capacidad para cambiar de configuración sin alterar su volumen. Un IP elevado indica un exceso de arcilla o de coloides en el suelo. Siempre que el LP sea superior o igual al LL, su valor sera cero, está expresado por la siguiente ecuación:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de plasticidad

LL = Límite líquido

LP = Límite plástico

El límite líquido se determina midiendo la humedad y el número de golpes necesarios para cerrar en una determinada longitud una ranura de un determinado ancho mediante un aparato normalizado. El límite plástico se obtiene midiendo el contenido de humedad del suelo cuando comienzan a desmoronarse pequeños cilindros de suelo de 3 mm de diámetro. El límite de retracción se define como la humedad presente al haber añadido agua suficiente para llenar todos los huecos de una pastilla de suelo seca (mecánica de suelos William lambe).

Clasificación de la AASHTO

Este es el sistema del Departamento de Caminos de U.S.A., introducido en 1929 y adoptado por la “American Association of State Highway Officials” entre otras. Es de uso especial para la construcción de vías, en especial para manejo de subrasantes y terraplenes.

Está basado en características de estabilidad de los suelos empleados en la construcción de caminos, se fundamenta en distribución granulométrica, límite líquido y límite plástico. Los tamices estándar N°10, N°40 y N°200.

De acuerdo con este sistema y con base en su comportamiento, los suelos están clasificados en ocho grupos designados por lo símbolos del A-1 al A-8. En este sistema de clasificación los suelos inorgánicos se clasifican en siete grupos que van del A-1 al A-7. Estos a su vez se dividen en un total de doce subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8.

Suelos granulares

Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz N° 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 y A-3.

Grupo A-1

El material de este grupo comprende las mezclas bien graduadas, compuestas de fragmentos de piedras, grava, arena y material ligante poco plástico. Se incluyen también en este grupo mezclas bien graduadas que no tienen material ligante.

Subgrupo A-1a: Comprende aquellos materiales formados predominantemente por piedra o grava, con o sin material ligante, estos materiales son bien graduados.

Subgrupo A-1b: Incluye aquellos materiales formados predominantemente por arena gruesa bien graduada, con o sin ligante.

Grupo A-2

Comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material fino.

Subgrupo A-2-4 y A-2-5: Pertenecen a estos subgrupos aquellos materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiz N° 40 tiene las mismas características de los suelos A- 4 y A- 5 respectivamente.

Subgrupo A-2-6 y A-2-7: Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz N° 40 tiene las mismas características de los suelos A-6 y A-7.

Grupo A-3

En este grupo se encuentra incluidas las arenas finas, de playa y aquellas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye, además, las arenas de río que contengan poca grava y arena gruesa.

Suelos finos

Contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz N° 200. Estos suelos constituyen los grupos A- 4, A-5, A-6, y A-7.

Grupo A-4

Pertenecen a este grupo los suelos limosos poco o nada plásticos que tienen un 75% o más del material fino que pasa el N° 200. Además, se incluye en este grupo las mezclas de limo con grava y arena hasta en un 64%.

Grupo A-5

Los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tiene un límite líquido elevado.

Grupo A-6

El material típico de este grupo es la arcilla plástica. Por lo menos el 75% de estos suelos debe pasar el tamiz N° 200, pero se incluyen también las mezclas arcillo-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%. Estos materiales presentan, generalmente, grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

Grupo A-7

Los suelos de este grupo son semejantes a los suelos A-6 pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados.

Subgrupo A-7-5: Incluye aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

Subgrupos A-7-6: Comprende aquellos suelos cuyos índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además experimentan cambios de volumen extremadamente grandes.

Índice de grupo

Aquellos suelos que tienen un comportamiento similar se hallan dentro de un mismo grupo, y están representados por un determinado índice. La clasificación de un suelo en un determinado grupo se basa en su límite líquido, grado de plasticidad y porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200. Los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4; los correspondientes a los suelos limosos entre 8 y 12 y los de los suelos arcillosos entre 11 y 20 o más. Para una adecuada comprensión se presenta la siguiente tabla para la clasificación AASHTO.

Tabla 2.1 Clasificación AASHTO

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos del total pasa el tamiz N°200)							Materiales limos arcillosos (más del 35% del total pasa el tamiz N°200)			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Clasificación de grupo	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A - 7 - 5 A - 7 - 6
Porcentaje de material que pasa el tamiz											
N° 10	50 máx										
N° 40	30 máx	50 máx	51 min								
N° 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de la fracción que pasa el tamiz N° 40											
LL:				40 máx	41 min	40 máx	40 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min
IP:	6 máx		NP	10 máx	10 máx	11 min	11 min	10 máx	10 máx	11 min	11 min
Índice de grupo	0		0	0		4 máx		8 máx	12 máx	16 máx	20 máx

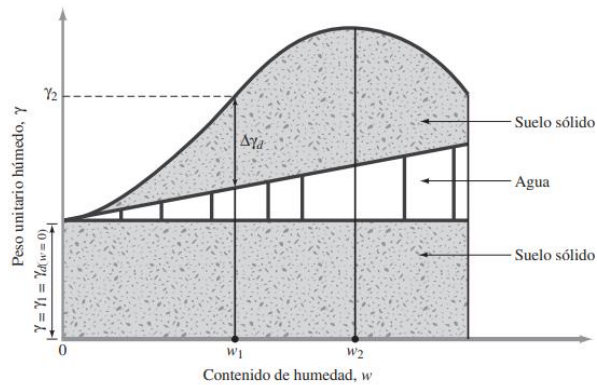
Fuente: AASHTO

2.6. Compactación del suelo

La compactación del suelo es todo proceso que genere la densificación de la masa de suelo por medios mecánicos. Cuando se compacta un suelo se busca mejorar sus propiedades en términos de resistencia, compresibilidad y comportamiento esfuerzo-deformación. Las ventajas de la compactación principalmente son la disminución de asentamientos considerables de la masa de suelo bajo la aplicación de cargas y con ello la disminución de los asentamientos de las estructuras que se cimenten sobre él, debido a que durante la compactación se disminuye el volumen de aire y se incrementa la fricción entre partículas. Así mismo aumenta la resistencia al corte del suelo, su compacidad es mayor y se obtiene un suelo más impermeable (Ugas, 1985). La eficiencia de la compactación depende de diversas variables, siendo las más relevantes el contenido de agua y la energía de compactación. Con el paso de los años han sido muchas las teorías que se han desarrollado sobre el efecto de la compactación, específicamente en subrasantes, y el comportamiento de las partículas que lo componen.

Proctor sostiene que la humedad en un suelo relativamente seco crea efectos capilares, lo que evita que se produzca fricción entre las partículas, manteniéndolas unidas gracias a la cohesión, lo que favorece a la densificación del suelo. Así, para contenidos de humedad relativamente bajos, se obtiene un relleno firme y duro. A medida que aumenta el contenido de humedad, hay una mayor reorganización de las partículas debido al aumento de la lubricación. Esto da como resultado un suelo de mayor densidad, pero menos firme. Este proceso continúa hasta que la humedad ocupa el mayor volumen de vacíos posibles y queda una cantidad de aire que compactación no puede eliminar, en este punto se llega a la densidad máxima.

Figura 2.3 Principios de compactación

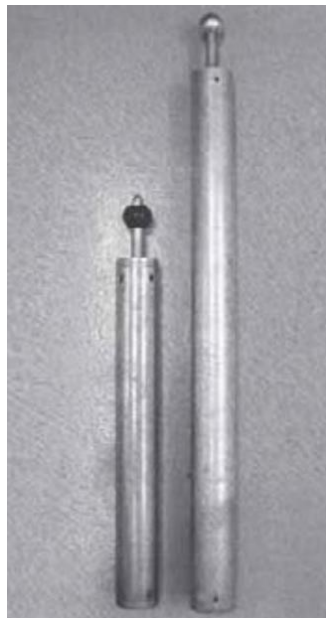


Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica BRAJA M. DAS

2.7. Prueba Proctor modificada

Para la realización de la prueba Proctor modificada se utiliza el mismo molde, con un volumen de 943,3 cm³, como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un martillo que pesa 44,5 N (masa = 4,536 kg) y tiene una caída de 457,2 mm. El número de golpes de martillo para cada capa se mantiene en 25, como en el caso de la prueba Proctor estándar. En la figura se muestran los martillos utilizados para las pruebas Proctor estándar y modificada.

Figura 2.4 Comparación de los martillos para la prueba estándar y modificada



Fuente: Braja M. Das, Henderson, Nevada

Tabla 2.2 Especificaciones de la prueba Proctor Modificada (Norma ASTM)

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101,6 mm	101,6 mm	152,4 mm
Volumen del molde	943,3 cm ³	943,3 cm ³	2124 cm ³
Peso del martillo	44,5 N	44,5 N	44,5 N
Altura de la caída del martillo	457,2 mm	457,2 mm	457,2 mm
Número de golpes de martillo por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 KN-m/m ³	2696 KN-m/m ³	2696 KN-m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz N°4 (4,57 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz N°4	Porción que pasa el tamiz de 9,5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz N°4 es más de 20% o menos del peso es retenido en el tamiz 9,5 mm.	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9,5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm.

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica

2.8. Contenido de agua

La lubricación del suelo, es decir la humedad que requiere para formar una película de agua que favorezca la compactación del suelo, es fundamental durante el proceso. Un alto contenido de agua puede reducir los efectos de compactación. Es por ello que Ugas (1985) afirma que se hace necesario calcular debidamente la cantidad de agua, o sea la humedad óptima que debe tener un suelo, a fin de obtener una buena lubricación que permita, al compactarlo, alcanzar la mayor densidad posible, es decir, la densidad máxima.

El comportamiento del suelo al ser compactado está muy relacionado con el contenido de agua presente en él. Las investigaciones realizadas a lo largo del siglo XX dan como factor más importante el agua presente en el suelo y la resistencia que ésta le otorga.

2.9. Energía de compactación

Es la energía aplicada a una masa de suelo por unidad de volumen durante el proceso de compactación.

En campo, la energía de compactación que se puede aplicar a un suelo depende del procedimiento de compactación utilizado. Existen diversas formas de compactar el suelo en campo, siendo las más comunes por amasado, por presión, por impacto, entre otros. En general, la energía de compactación de cada método depende principalmente del área de contacto entre el instrumento (rodillo, pisón, placas, entre otros) y el suelo; del espesor de la capa que se compacte y del peso de los equipos. Adicionalmente, en el caso de uso de rodillos influyen también el número de pasadas y la presión; en el caso de compactación por impacto influye en mayor proporción la altura de caída del pisón; y en el caso de compactación por vibración las variables que más afectan el proceso son la frecuencia, la amplitud y el empuje dinámico (Rodríguez & Del Castillo, 1974). La variación de estos factores tiene influencia sobre la energía de compactación entregada al suelo.

Es importante mencionar que la densidad a obtener en campo se fija con base en una prueba de laboratorio, en la cual se reporta la densidad máxima seca y la humedad óptima de compactación, parámetros que deben ser empleados como patrón de compactación. En laboratorio la energía de compactación viene expresada por la siguiente ecuación:

$$EC = \frac{N * n * W_m * h}{V}$$

Donde:

EC= Energía de compactación.

n= Número de golpes por capa.

N= Número de capas.

W_m = Peso del martillo.

h= Altura de caída del martillo.

V= Volumen del molde de compactación.

La energía de compactación en laboratorio dependerá de estas variables, así como de la capacidad de deformación del suelo.

Resulta imposible, desde el punto de vista práctico, que la densidad obtenida en campo sea idéntica a la densidad patrón determinada en laboratorio. Es por ello que debe introducirse el concepto de grado de compactación.

2.10. Densidad In Situ – método del cono de arena

Es un ensayo que permite calcular in situ el valor de la densidad natural de los suelos, especialmente en suelos sin cohesión, arenas y gravas, los cuales representan un reto al usar otros métodos, ya que por lo general no se logran obtener muestras inalteradas en suelos con estas características. El ensayo del cono de arena se utiliza principalmente con el fin de comprobar el grado de compactación en materiales de rellenos, subrasantes compactados artificialmente, en los que existan especificación en cuanto a humedad y densidad. Estos rellenos y subrasantes pueden ser desde terraplenes de tierra, rellenos de carreteras y ferrocarriles, hasta depósitos de suelos naturales, agregados o mezcla de otros suelos.

El método de cono de arena se recomienda para suelos cohesivos en condiciones no saturadas, ya que en suelos que se desmoronan fácilmente y/o el contenido de humedad es muy alto el orificio excavado puede presentar deformaciones y llegar a sufrir derrumbamientos parciales o totales.

2.11. Grado de compactación

El grado de compactación se define como la relación entre la densidad seca obtenida en campo y la densidad máxima seca obtenida en laboratorio (Rodríguez & Del Castillo, 1974).

El grado de compactación viene expresado por la siguiente ecuación:

$$GC\% = \frac{\rho_{in\ situ}}{\rho_{max}} * 100$$

Donde:

GC%= Grado de compactación en porcentaje.

$\rho_{in\ situ}$ = Densidad seca obtenida en campo.

ρ_{max} = Densidad máxima seca obtenida en laboratorio.

La diferencia entre ambos valores, se mide a través del grado de compactación.

2.11.1. Control del grado de compactación en obra

El control en obra se hace generalmente realizando ensayos de determinación del grado de compactación y comparando sus resultados con el porcentaje prescrito en pliegos (70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%, 100%, etc.), lo cual depende del destino y de la importancia de la obra.

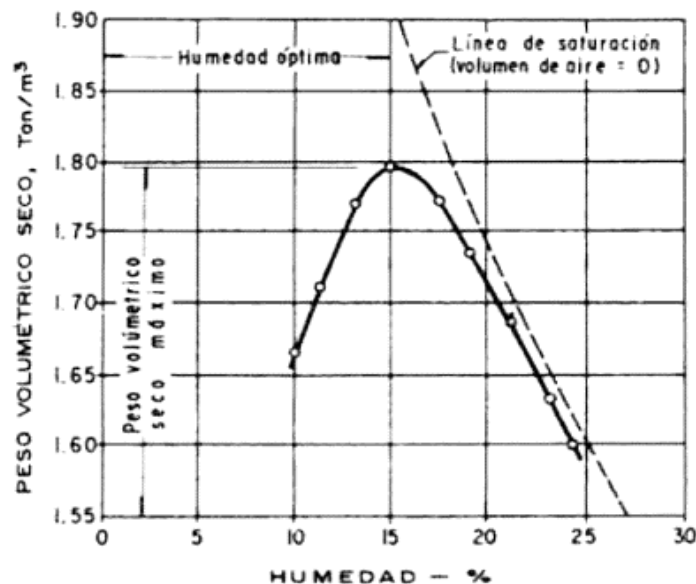
Entre los métodos para determinar la Densidad Seca en obra, son tres los más utilizados:

- Método del cono de arena.
- Método del volúmenómetro (o de la membrana de goma).
- Densímetros nucleares.

Se indica que ninguna compactación debe ser inferior al 90% del ensayo correspondiente, por muy modesta que sea la obra o el destino (Rosetti & Begliardo, 2005).

Curva de compactación:

Figura 2.5 Curva de compactación típica



Fuente: Rodríguez & Del Castillo, 1974

Durante la colocación de una sub rasante, el ingeniero debe tener los medios para determinar si la compactación especificada se está alcanzando adecuadamente, aun cuando las características del material de préstamo cambien de tiempo en tiempo (Terzaghi & Peck, 1948); es por ello que se recurren a ensayos de compactación de laboratorio, los cuales se emplean como patrón de compactación para el material o mezcla de materiales que se están utilizando en obra, como ya se mencionó anteriormente. El departamento de Caminos de California (1930, CP Terzaghi & Peck, 1948) desarrolló el Ensayo Proctor normal (también conocido como estándar) para ser empleado como patrón de compactación. Sin embargo, al modernizarse los equipos de compactación e incrementarse el peso de los mismos, fue necesario modificar dicho patrón de laboratorio, por lo que se desarrolló el Ensayo Proctor modificado, en el que se aplican mayores energías de compactación que en el Ensayo de Proctor estándar. Así, con el ensayo de compactación modificada se obtiene un patrón de laboratorio acorde a los equipos y energía de compactación usualmente empleados en la práctica moderna durante la conformación de rellenos. Básicamente, ambos ensayos tienen como finalidad obtener la curva de compactación, que muestra los valores de densidades secas o pesos volumétricos secos del suelo en condiciones variables de humedades y energías de compactación, permitiendo así conocer la humedad óptima que produzca la máxima densidad seca.

El pico de la curva, valor asociado a la humedad óptima que produce la máxima densidad seca, corresponde al punto donde se obtiene la máxima eficiencia de compactación, es decir el 100% de compactación del suelo. La curva de compactación posee dos ramas: rama seca y rama húmeda. Dependiendo del material a compactar y los requerimientos de diseño del relleno, se compactará ya sea por la rama seca o la rama húmeda, siendo la recomendación usual para los proyectos de ingeniería compactar a una densidad seca del 95% de la máxima, y a un contenido de humedad que resulte ± 2 % alrededor de la humedad óptima obtenidos de la curva de compactación. De acuerdo a Rodríguez & Del Castillo (1974) se debe tomar en cuenta las siguientes propiedades del suelo como requisito de compactación:

1. Homogeneidad
2. Características favorables de permeabilidad.

3. Baja compresibilidad para evitar el desarrollo de presiones de poro excesivas o deformaciones inaceptables.
4. Razonable resistencia al esfuerzo cortante.
5. Permanencia de las propiedades mecánicas en condiciones de saturación.
6. Flexibilidad, para soportar asentamientos diferenciales sin agrietamiento.

2.11.2. Eficacia de la compactación en obra

Rosetti y Begliardo (2005), sostienen que algunos factores para lograr la eficacia de la compactación son:

- Naturaleza del suelo a compactar.
- Elección adecuada del equipo: tipo, peso, presión de inflado de neumáticos, área de contacto, frecuencia de vibración, etc.
- La energía específica de compactación (energía que se le entrega al suelo por unidad de volumen durante el proceso mecánico de que se trate).
- Contenido de humedad del suelo.
- Cantidad y espesor de las capas del terraplén.
- Número de pasadas del equipo de compactación.

Los métodos usados para la compactación dependen del tipo de suelo. Los friccionales, como las arenas, se compactan eficientemente por métodos vibratorios (placas vibratorias), mientras que los suelos tipo arcillosos se compactan mejor por métodos estáticos (rodillos pata de cabra, rodillos neumáticos, rodillos lisos).

2.12. Esfuerzo – deformación

Cuando un material es sujeto a esfuerzos, este responde con deformaciones. Entonces es necesario trazar una historia de los cambios entre los esfuerzos y las deformaciones y así obtener una curva esfuerzo-deformación. El ingeniero debe comprobar que las deformaciones producidas en el suelo al aplicar las cargas exteriores son menores a la deformación admisible y así asegurar la estabilidad del suelo y obtener la curva esfuerzo deformación del suelo.

El grado de deformación producido por un esfuerzo dependerá de la composición, relación de vacíos, historia del esfuerzo, y forma en que se apliquen los nuevos esfuerzos. Para poder hallar la deformación de un suelo muchas veces es mejor medir directamente las deformaciones producidas en un ensayo de laboratorio bajo los esfuerzos que existirán en el terreno real. En otros casos, suele ser muy útil recurrir a conceptos y fórmulas de la teoría de elasticidad.

2.13. Módulo de elasticidad o módulo de Young

El Módulo de Young o de elasticidad de un suelo puede definirse como la relación de los esfuerzos a los que el suelo es sometido entre los asentamientos que se producen en él cuando estos esfuerzos son aplicados. Registrando y graficando una serie de esfuerzos con sus respectivas deformaciones, obtenemos una curva esfuerzo- deformación, la cual nos permite a partir de métodos gráficos calcular el Módulo de Young.

En el laboratorio, el módulo de deformación puede ser estimado a partir del ensayo triaxial, ensayo de compresión no confinada. Una vez que se obtiene la curva esfuerzo- deformación a partir de dicho ensayo, puede emplearse la pendiente inicial o modulo tangente de dicha curva. Como valor alternativo que puede emplearse el módulo secante determinado para esfuerzos de $1/2$ o $1/3$ del esfuerzo máximo vertical (Holtz 1991).

La determinación del Módulo de elasticidad presenta tres limitaciones importantes (Bowless, 1996):

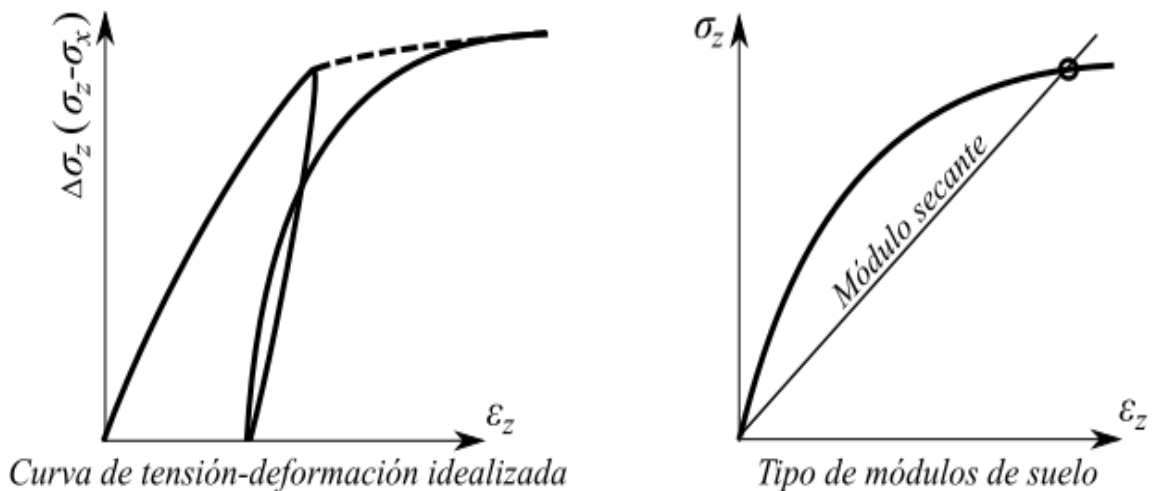
- Es complicado poder obtener una muestra totalmente imperturbada al momento de su extracción, ya que ésta pierde sus propiedades al cambiar sus condiciones naturales. Por lo tanto, los valores obtenidos a partir de ensayos de laboratorio son típicamente considerablemente inferiores a los de campo, incluso con una diferencia de 50% o superior.
- Los ensayos in situ representan un problema para la obtención del módulo. En primer lugar, los equipos requieren de personal con experiencia y son de difícil instalación para ensayos de rutina, y la mayoría de equipos (presiómetro de Menard, dilatómetro de Marchetti, entre otros) aportan información de parámetros elásticos horizontales, muy diferentes a los verticales que son los que usualmente se emplean para el cálculo de asentamientos.

- Los ensayos geofísicos in situ, tales como down-hole y cross-hole, que permiten estimar los módulos de elasticidad y de corte máximos o iniciales en condiciones elásticas a partir de mediciones de velocidades de onda de compresión y corte, no tienen un uso extendido en estudios geotécnicos.

En la bibliografía, aparece doblemente marcado el módulo del suelo E_s . Según la Poulos et. Davis (1980) este parámetro se conoce como el módulo de elasticidad del suelo (módulo de Young), mientras que Briaud (2001) y Gopal Ranjan (2000) llaman a este parámetro el módulo secante del suelo. Ambos títulos del módulo E_s tiene el mismo significado. Sin embargo, el suelo se comporta elásticamente sólo en el campo con pequeñas tensiones (generalmente se trata de un material heterogéneo), y por lo tanto es más apropiado hablar de módulo secante de suelo E_s .

En la etapa inicial de la curva tensión-deformación la dependencia es casi lineal, pero la deformación elástica de los suelos es muy pequeña debido a valor global de la tensión. Se definen varios tipos de módulos - módulo de suelo tangente, módulo secante del suelo y el módulo tangente inicial. La introducción de esta simple suposición asume que es posible utilizar la teoría de la elasticidad para la detección del estado de tensión-deformación en los suelos

Figura 2.6 Distribución de la curva de tensión – deformación idealizada



Fuente: Lambe et. Whitman 1969

Lambe et. Whitman (1969) dice que el módulo de elasticidad para un suelo es por lo general el módulo secante de desviador cero de la tensión normal a un esfuerzo desviador igual a la mitad o a un tercio de la tensión de pico del desviador.

2.13.1. Factores que influyen en el módulo del suelo

El contenido de agua también afecta a los módulos. A bajos contenidos de agua el agua une las partículas, aumenta el estrés y la succión entre las partículas y da lugar a un alto módulo de suelo. Esto es especialmente evidente cuando se considera la rigidez de arcilla seca. Sin embargo, esto no es cierto para los suelos de grano grueso.

El módulo de elasticidad es una característica propia del suelo, pero varía con el confinamiento, es decir, un suelo resistirá mayores esfuerzos con menores deformaciones cuanto mayor sea el confinamiento. Un suelo consolidado tendrá generalmente un módulo más alto que en el mismo suelo normalmente consolidado.

2.14. Carga unidimensional de suelos

Todos los materiales, al ser sujetos o sometidos a cargas, experimentan deformaciones (reducción de volumen y forma), que pueden o no ser dependientes del tiempo. Las relaciones entre los esfuerzos, las deformaciones y el tiempo, varían según el material a analizar. Las relaciones más sencillas se producen en los materiales elásticos lineales, donde el esfuerzo y la deformación son proporcionales e independientes del tiempo.

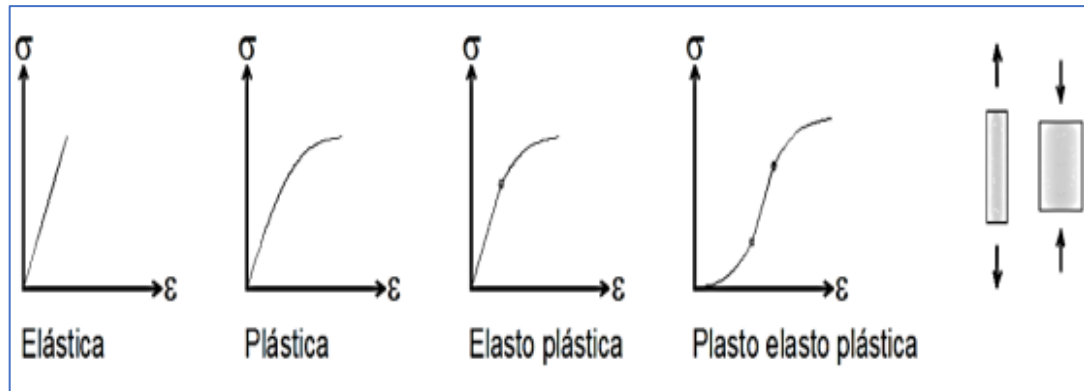
Las características esfuerzo-deformación-tiempo de un suelo dependerán, no solo del tipo de suelo y su estado de consistencia, sino también de la forma en que es cargado, de su ubicación estratigráfica, etc. Es necesario estudiar estas características del suelo, debido a que en general éstos sufren deformaciones superiores a las de la estructura que le transmite la carga y no siempre se producen instantáneamente ante la aplicación misma de la carga.

Dentro de la Mecánica de Suelos se han establecido diferentes teorías del comportamiento de un suelo, las cuales han evolucionado de acuerdo a la aplicación de condiciones o hipótesis más cercanas a la realidad, sin embargo, los principios no dejan de ser los mismos.

2.15. Deformaciones en el suelo

Un suelo puede presentar deformaciones permanentes o no, a causa de las cargas que soporta. Las deformaciones pueden ser:

Figura 2.7 Deformaciones del suelo



Fuente: Duque y Gonzalo Escobar (2016)

Donde:

σ = Esfuerzo

ε = Deformación.

2.16. Respecto a su recuperación en descarga

2.16.1. Deformación elástica

El suelo puede recobrar forma y dimensiones originales, cuando cesa la fuerza de deformación.

2.16.2. Deformación plástica

Se da corrimiento de la masa del suelo, pero la relación de vacíos permanece constante. Al retirar las cargas el suelo queda deformado, pero su volumen casi se mantiene. En un suelo corresponden a un reordenamiento de las partículas.

2.17. Respecto a su evolución en el tiempo

2.17.1. Deformaciones instantáneas en el tiempo

Se producen instantáneamente tras la carga correspondiente. La mayor parte de ellas es recuperable.

2.17.2. Deformaciones diferidas en el tiempo

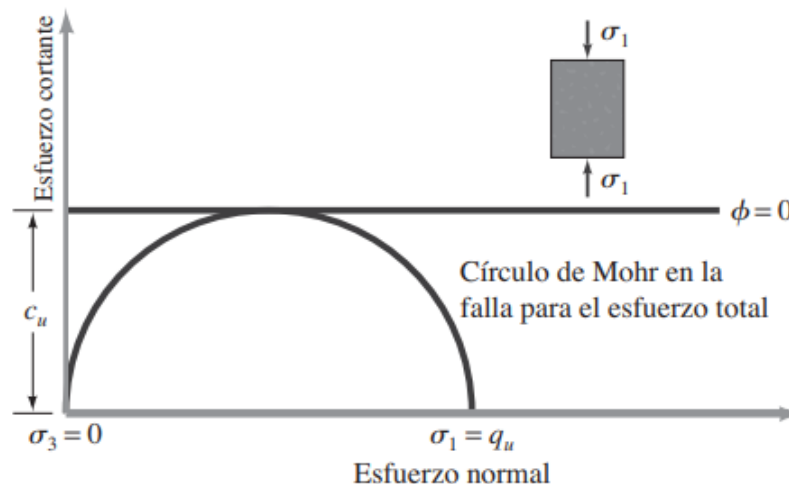
Se extienden en el tiempo tras la aplicación de la carga correspondiente). Habitualmente las deformaciones irrecuperables son mayores que las recuperables. Principalmente en función de la permeabilidad.

2.18. Prueba de compresión no confinada

La prueba de compresión no confinada es un tipo especial de prueba no consolidada-no drenada que se utiliza comúnmente para las muestras de arcilla. En esta prueba la presión de confinamiento σ_3 es 0. A la muestra se le aplica rápidamente una carga axial para provocar una falla.

El ensayo de compresión no confinada, también conocido como ensayo de compresión simple o ensayo de compresión uniaxial, es muy importante en la mecánica de suelos, ya que permite obtener un valor de carga última de suelo, el cual se relaciona con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que puede utilizarse en proyectos que no requieran de un valor impreciso, ya que entrega un resultado conservador.

Figura 2.8 Prueba de compresión no confinada



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica

En ésta, el esfuerzo principal menor total es 0 y el esfuerzo principal mayor total es σ_1 . Dado que la resistencia de corte no drenada es independiente de la presión de confinamiento, tenemos:

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = C_u$$

donde q_u es la resistencia a la compresión no confinada.

Es importante comprender el comportamiento de los suelos sometidos a cargas, ya que es en ellos que van a fundar las estructuras, ya sea puentes edificios o carreteras, que requieren de una base firme, o más aún que puedan aprovechar la resistencia del suelo en beneficio de su propia capacidad y estabilidad, siendo el estudio y la experimentación las herramientas para conseguirlo, y finalmente poder predecir, con una cierta aproximación, el comportamiento ante las cargas de estas estructuras.

El ensayo de compresión no confinada se utiliza ampliamente porque constituye un método rápido y económico de obtener aproximadamente la resistencia al corte de un suelo cohesivo. Se destaca también que los resultados del experimento de compresión no confinada son confiables debido a que existen muy pocos métodos de ensayo que permitan resultados mucho mejores, a menos que se refinen considerablemente los procedimientos y esfuerzos del experimento. Los resultados de este ensayo son razonablemente confiables si se interpretan adecuadamente.

Este método es aplicable a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que admiten su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o suelos cementados. Los suelos secos friables, los materiales fisurados, laminados, los limos, las turbas y las arenas no pueden ser analizados por este método para obtener valores significativos de la resistencia a la compresión no confinada

El experimento de compresión no confinada puede hacerse con control de deformación unitaria o con control de esfuerzo, el experimento de deformación unitaria controlada es casi universalmente utilizado, también se encontró que el ensayo es bastante sensible a la tasa de deformación unitaria. Como las muestras del experimento de compresión no

confinada se exponen usualmente al aire seco del laboratorio (baja humedad), deberían llevarse a la falla antes de 10 minutos, de otra forma el cambio de contenido de humedad podría llevar a afectar la resistencia a la compresión. Las muestras de suelo se prueban hasta que la carga en la misma comience a decrecer o hasta que por lo menos se haya desarrollado una deformación unitaria del 20%.

Se efectúan los cálculos de esfuerzo y deformación unitaria axial de forma que se pueda dibujar una curva esfuerzo- deformación unitaria para obtener el máximo esfuerzo que se toma como la resistencia a la compresión no confinada del suelo. (Bowles, 1981)

La deformación unitaria se calcula de la mecánica de materiales como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ mm/mm}$$

Donde:

ε = Deformación unitaria

ΔL = Deformación total de la muestra (axial), en mm.

L_0 =Longitud original de la muestra, en mm.

El esfuerzo instantáneo σ del ensayo sobre la muestra se calcula como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \text{ (KPa)}$$

Donde:

P = Carga sobre la muestra en cualquier instante para el correspondiente valor de ΔL en KN

A = Área de la sección transversal de la muestra para la carga correspondiente P , en m^2 .

En mecánica de suelos es practica convencional corregir el área sobre la cual actúa la carga P . Una de las razones para esta corrección de área es la de permitir cierta tolerancia sobre la forma como el suelo es realmente cargado en el terreno. Aplicar esta corrección

al área original de la muestra es algo conservativo también pues la resistencia última calculada de esta forma será menor que la que se podría calcular utilizando el área original. Esta área se corrige considerando que el volumen total del suelo permanece constante. (Bowles, 1981)

2.18.1. Equipo de compresión

El aparato de compresión puede ser una báscula de plataforma equipada con un marco de carga activado con un gato de tornillo, o con un mecanismo de carga hidráulica, o cualquier otro instrumento de compresión con suficiente capacidad de control para proporcionar la velocidad de carga. En lugar de la báscula de plataforma es común que la carga sea medida con un anillo o una celda de carga fijada al marco. Para suelos cuya resistencia a la compresión no confinada sea menor de 100 kPa (1kg/cm²) el aparato de compresión debe ser capaz de medir los esfuerzos compresivos con una precisión de 1 kPa (0,01 kg/cm²); para suelos con una resistencia a la compresión no confinada de 100 kPa (1kg/cm²) o mayor el aparato de compresión debe ser capaz de medir los esfuerzos compresivos con una precisión de 5 kPa (0,05 Kg/cm²).

Para el ensayo la longitud de la muestra cilíndrica es de 2 a 3 veces su diámetro, con el objeto de reducir al mínimo el efecto, sobre las condiciones de rotura, ya que los ensayos con muestras demasiado bajas o demasiado altas no dan resultados confiables.

Deformímetro: El indicador de deformaciones debe ser un comparador de carátula graduado a 0,02 mm, y con un rango de medición de por lo menos un 20% de la longitud del espécimen para el ensayo, o algún otro instrumento de medición, como un transductor que cumpla estos requerimientos.

Dimensiones de la muestra: La muestra debe tener un diámetro mínimo de 33 mm. La partícula más grande contenida en ellos debe ser menor de (1/10) del diámetro de la muestra.

La relación altura-diámetro de las muestras debe estar comprendida entre 2 y 3 veces el diámetro de la misma.

Figura 2.9 Equipo de prueba de compresión no confinada



Fuente: Elaboración propia

2.18.2. Tipos de rotura

En un ensayo de compresión no confinada se pueden producir distintos tipos de rotura, los cuales son la rotura frágil y la rotura dúctil. En la primera predominan las grietas paralelas a la dirección de la carga, y la rotura ocurre de un modo brusco y bajo deformaciones muy pequeñas, presentándose después de ella un desmoronamiento de la resistencia. En la segunda la muestra se limita a deformarse, sin que aparezcan zonas de discontinuidad en ella. De forma intermedia, la rotura se produce a través de un plano inclinado, apareciendo un pico en la resistencia y un valor residual. En arcillas blandas aparece la rotura dúctil en el ensayo de compresión simple, mientras que en suelos cementados se suele registrar rotura frágil en este tipo de ensayos. Las teorías de rotura frágil fueron iniciadas por Allan Griffith en 1920, al atribuir la reducida resistencia a la tracción de muchos materiales a la

presencia de diminutas fisuras en su interior, en cuyos extremos se produce concentración de tensiones. La rotura se produce debido a la propagación de las micro fisuras existentes bajo dicha concentración de tensiones.

Figura 2.10 Tipos de rotura



Fuente: Elaboración propia

En una probeta sometida a compresión no confinada también se pueden producir tracciones locales en el contorno de las fisuras, especialmente sobre planos paralelos a la dirección de la compresión. Esto explica la aparición de grietas verticales. En suelos blandos sometidos a presiones no muy altas, la rotura dúctil se presenta bajo la forma de un ensanchamiento sólo por el centro, ya que por los extremos lo impide la fricción entre el suelo y las placas de carga.

Según el valor de la resistencia máxima a compresión simple, una arcilla se puede clasificar del modo que se indica a continuación (Terzaghi y Peck, 1955).

Tabla 2.3 Clasificación de arcillas según su consistencia

Consistencia del Suelo	Carga última (Kg. /cm ²)
Muy blanda	< 0,25
Blanda	0,25-0,50
Media	0,50-1
firme	1-2
Muy firme	2-4
dura	>4

Fuente: Terzaghi y Peck, 1955

2.19. Capa subrasante

Generalmente es el terreno natural en la cual se apoya toda la estructura del pavimento, es decir que no forma parte de la estructura en sí. Sin embargo, la capacidad soporte de la subrasante es un factor básico que afecta directamente la selección de los espesores totales de las capas del pavimento. Su finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo del terraplén, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo del terraplén contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.

La capa superior de la capa subrasante coincide con la línea subrasante del proyecto geométrico. Es indispensable tomar en cuenta las especificaciones de la pendiente longitudinal. La altura para las obras de drenaje para que el agua capilar no afecte el pavimento.

2.19.1. Requisitos de calidad

Los materiales que se utilicen para la formación de la capa subrasante, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de (8,2) toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento.

2.19.2. Condiciones básicas a cumplir por las subrasantes

Ejecutabilidad: significa que sea posible su puesta en obra en debidas condiciones y de forma tecnológica (es decir, con medios mecánicos de alto rendimiento).

En especial, este aspecto hace referencia a los suelos excesivamente húmedos o secos, que son los que plantean problemas a ese respecto.

Estabilidad: se refiere a que la propia estructura de tierra sea estable frente al deslizamiento, tanto desde el punto de vista interno (la propia sección de la subrasante, con superficies de deslizamiento que se inscriban fundamentalmente en su seno) como extremo, en el sentido que exista suficiente estabilidad sobre el terreno⁹ en el que se asientan.

Deformabilidad: hace referencia a que las deformaciones (verticales- asientos, u horizontales- desplazamientos) que se produzcan, una vez que se construya el firme a soportar, deben ser admisibles y compatibles con la funcionalidad y servicio del mismo, incluyendo la regularidad superficial de la capa de rodadura.

En este sentido han d tenerse en cuenta los asientos o movimientos totales y sobre todo los diferenciales, que pueden dar lugar a agrietamientos longitudinales transversales del firme, disfunciones del servicio del firme, etc.

Dentro de este contexto, se deben tener en cuenta todo tipo de fenómenos que puedan originar movimientos y por tanto, además de las deformaciones propias del relleno, hay que considerar los posibles fenómenos de hinchamiento- retracción debido a cambios de humedad- temperatura, los asientos del cimiento (apoyo sobre suelos blandos), etc.

Durabilidad: que hace referencia, por último, a que la obra ha de ser duradera en su vida de servicio útil) y también garantizar la permanencia de las condiciones de servicio durante ese periodo de diseño (amortización de la inversión).

En ese sentido, son básicos los procesos de alteración y sus factores más influyentes, como el agua, la temperatura, y los agentes biológicos o químicos y por supuesto, el tipo de material utilizado en el propio relleno.

El material deberá cumplir con las normas y características de calidad, a continuación, presentamos tablas en las cuales clasificamos de acuerdo al C.B.R., el tipo de terracerías y subrasantes:

Tabla 2.4 Categorías de suelos para capa subrasante

Características	Suelos tolerables	Suelos adecuados	Suelos seleccionados
Tamaño máximo	25% > 15 cm	< 10 cm	< 8 cm
Contenido de finos %	.....	≤ 35	≤ 25
Límite líquido %	≤ 40	≤ 40	≤ 30
Índice de plasticidad %	.....	.....	≤ 10
Peso vol. Máximo (kg/m ³)	≥ 1450	≥ 1750	.....
C.B.R. %	> 3	> 6	> 10
Expansión %	.....	< 2	0

Fuente: Instituto Mexicano del cemento y concreto IMCYC

2.20. Estadística descriptiva

Media aritmética

Es una medida de tendencia central que denota el promedio de un conjunto de datos. Se calcula dividiendo la suma del conjunto de datos entre el total de ellos. Simbólicamente se representa por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x$$

Donde:

x= Datos de la serie

n= Número de datos de la serie

∑=Sumatoria

Moda

Es una medida de tendencia central o el valor de la variable que tiene mayor frecuencia absoluta, la que más se repite es la única medida de centralización que tiene sentido estudiar en una variable cualitativa, pues no precisa la realización de ningún cálculo. Por su propia definición, la moda no es única, pues puede haber dos o más valores de la

variable que tengan la misma frecuencia siendo esta máxima. Entonces tendremos una distribución bimodal o polimodal según el caso.

Mediana

Es una medida de tendencia central. Es el valor que divide al conjunto de datos ordenados, en aproximadamente dos partes: 50% de valores son inferiores y otro 50% son superiores.

Desviación estándar

Conocida también como desviación típica, es una medida de dispersión que se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Donde:

S^2 =Desviación estándar

\sum =Sumatoria x_i = Observación número i de la variable x

n=Número de observaciones

\bar{x} = Media de la variable x

Varianza

Conocida también como variancia, es una medida de dispersión de la información. Se obtiene como el promedio de los cuadrados de las desviaciones de los valores de la variable respecto de su media aritmética.

$$V = S^2$$

Donde:

V= Varianza

S^2 = Desviación estándar

Coefficiente de variación

Es una medida de dispersión relativa y se calcula dividiendo la desviación típica entre la media aritmética:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100$$

Donde:

CV= Coeficiente de variación

S= Desviación estándar de la población

\bar{X} =Media aritmética de la población

La ventaja de este coeficiente es que no lleva asociada ninguna unidad de medida. Se interpreta como porcentaje, por lo que nos permitirá decidir entre dos muestras, cuál es la que presenta mayor dispersión. Simbólicamente se denota por CV.

CAPÍTULO III
APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

La obtención del módulo de elasticidad se realizó en laboratorio, empleando muestras de suelo fino alteradas. Para las pruebas de laboratorio y la obtención del módulo de elasticidad se realizaron la clasificación de suelos, el contenido de humedad, densidad in situ para el cálculo del grado de compactación, al igual que la obtención de la densidad seca máxima del laboratorio y las probetas para el ensayo de compresión no confinada de la cual se obtuvo el módulo de elasticidad mediante la gráfica de esfuerzo – deformación.

3.1. Ubicación de procedencia de materiales para la investigación

La ubicación de los materiales para la siguiente investigación se extrajo de un tramo de la ciudad de Tarija llamado segunda Circunvalación, del cual se obtuvieron los treinta puntos de análisis en la subrasante que conforma este tramo.

Figura 3.1 Puntos de extracción de muestras del tramo



Fuente: Foto satelital Google Earth

Los puntos de extracción de este tramo se realizaron a cada cincuenta metros aproximadamente como se especifica en la figura 3.1. en total se tuvo un tramo de 1500 metros aproximadamente.

Tabla 3.1 Coordenadas del tramo segunda Circunvalación

Muestra	Coordenadas	
	Latitud "S"	Longitud "W"
Punto N° 1	21° 30' 38,64"	64° 42' 13,83"
Punto N° 2	21° 30' 37,36"	64° 42' 14,96"
Punto N° 3	21° 30' 36,08"	64° 42' 16,16"
Punto N° 4	21° 30' 35,15"	64° 42' 17,58"
Punto N° 5	21° 30' 34,17"	64° 42' 18,88"
Punto N° 6	21° 30' 33,34"	64° 42' 20,40"
Punto N° 7	21° 30' 32,67"	64° 42' 21,96"
Punto N° 8	21° 30' 31,97"	64° 42' 23,58"
Punto N° 9	21° 30' 31,37"	64° 42' 25,35"
Punto N° 10	21° 30' 30,64"	64° 42' 26,97"
Punto N° 11	21° 30' 29,91"	64° 42' 28,56"
Punto N° 12	21° 30' 29,17"	64° 42' 30,19"
Punto N° 13	21° 30' 28,41"	64° 42' 31,64"
Punto N° 14	21° 30' 27,55"	64° 42' 33,12"
Punto N° 15	21° 30' 27,11"	64° 42' 34,93"
Punto N° 16	21° 30' 26,28"	64° 42' 36,51"
Punto N° 17	21° 30' 25,48"	64° 42' 37,99"
Punto N° 18	21° 30' 24,17"	64° 42' 39,23"
Punto N° 19	21° 30' 23,57"	64° 42' 40,86"
Punto N° 20	21° 30' 23,77"	64° 42' 43,02"
Punto N° 21	21° 30' 23,56"	64° 42' 45,03"
Punto N° 22	21° 30' 23,15"	64° 42' 46,69"
Punto N° 23	21° 30' 22,03"	64° 42' 48,35"
Punto N° 24	21° 30' 21,78"	64° 42' 50,15"
Punto N° 25	21° 30' 21,57"	64° 42' 51,92"
Punto N° 26	21° 30' 21,39"	64° 42' 53,69"
Punto N° 27	21° 30' 21,14"	64° 42' 55,63"
Punto N° 28	21° 30' 21,67"	64° 42' 57,48"
Punto N° 29	21° 30' 21,46"	64° 42' 59,22"
Punto N° 30	21° 30' 21,34"	64° 43' 1,13"

Fuente: Elaboración propia

3.2. Extracción de muestras

En primer lugar, se realizó la limpieza de cada punto en la zona de muestreo para quitar el material de arrastre que se encuentra en la superficie, para esto se extrae el material de encima por lo menos unos 10 cm.

Figura 3.2 Limpieza del área de extracción de muestra



Fuente: Elaboración propia

Procedemos a extraer la muestra a una bolsa usando una pala, en este caso se sacó 40 kilos aproximadamente de cada punto, ya que necesitaremos para hacer los diferentes tipos de ensayos, por lo que se usara una cantidad considerable.

Figura 3.3 Extracción de muestra



Fuente: Elaboración propia

También se detalló el número de punto en cada bolsa para su posterior uso en el laboratorio.

3.3. Caracterización de suelos

La extracción o muestreo debe ser adecuado y representativo para poder determinar de forma correcta las características y propiedades mecánicas del suelo mediante ensayos de laboratorio.

Con las muestras extraídas obtenidas, se llevaron a cabo los siguientes ensayos de caracterización: Contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, compactación, densidad In Situ y compresión no confinada.

3.3.1. Ensayo contenido de humedad (ASTM D2216)

El contenido de humedad o más comúnmente la humedad de la muestra, es la relación entre el peso del agua contenido en la muestra y el peso de la muestra después de ser secada en el horno.

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, es por medio del secado a horno, su demora es de aproximadamente de 24 horas.

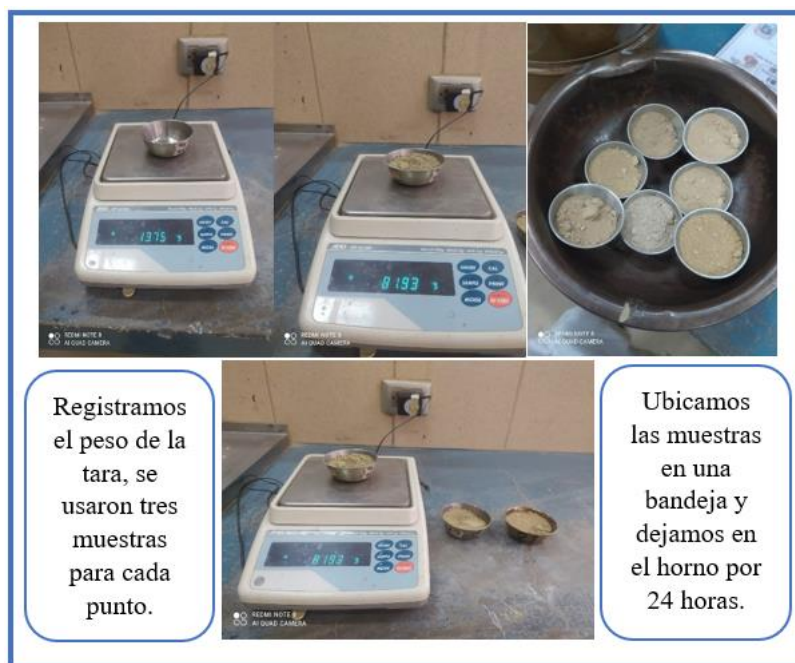
Este método es el más eficaz, su demora es de aproximadamente de 24 horas y la muestra a secar en horno, se realiza a una temperatura de 110 °C.

Figura 3.4 Materiales para el ensayo de contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5 Práctica de contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2 Contenido de humedad del tramo

Muestra	Contenido de humedad natural (%)	Muestra	Contenido de humedad natural (%)
Punto N° 1	8	Punto N° 16	4
Punto N° 2	5	Punto N° 17	7
Punto N° 3	8	Punto N° 18	7
Punto N° 4	7	Punto N° 19	5
Punto N° 5	4	Punto N° 20	4
Punto N° 6	5	Punto N° 21	4
Punto N° 7	5	Punto N° 22	3
Punto N° 8	6	Punto N° 23	6
Punto N° 9	6	Punto N° 24	5
Punto N° 10	5	Punto N° 25	5
Punto N° 11	8	Punto N° 26	5
Punto N° 12	8	Punto N° 27	5
Punto N° 13	4	Punto N° 28	4
Punto N° 14	4	Punto N° 29	4
Punto N° 15	6	Punto N° 30	5

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Ensayo granulometría (ASTM D422; AASHTO T88)

Se denomina granulometría, a la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación de suelo, para un análisis de sus propiedades mecánicas, el objetivo de ensayo es obtener el porcentaje de material que pasa cada tamiz.

El procedimiento para el ensayo de granulometría comienza con el cuarteo del material, hasta la obtención de la cantidad de material necesario, con la finalidad de que las muestras a utilizar tengan las características representativas del lugar de extracción.

Luego se seca la muestra obtenida por cuarteo en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, para su posterior lavado, y nuevamente se introduce la muestra al horno hasta que esté completamente seca.

Para el tamizado se realizó con la serie de tamices: N°10, N°40, y N°200.

Figura 3.6 Materiales para el ensayo de granulometría



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 Práctica de granulometría



Fuente: Elaboración propia

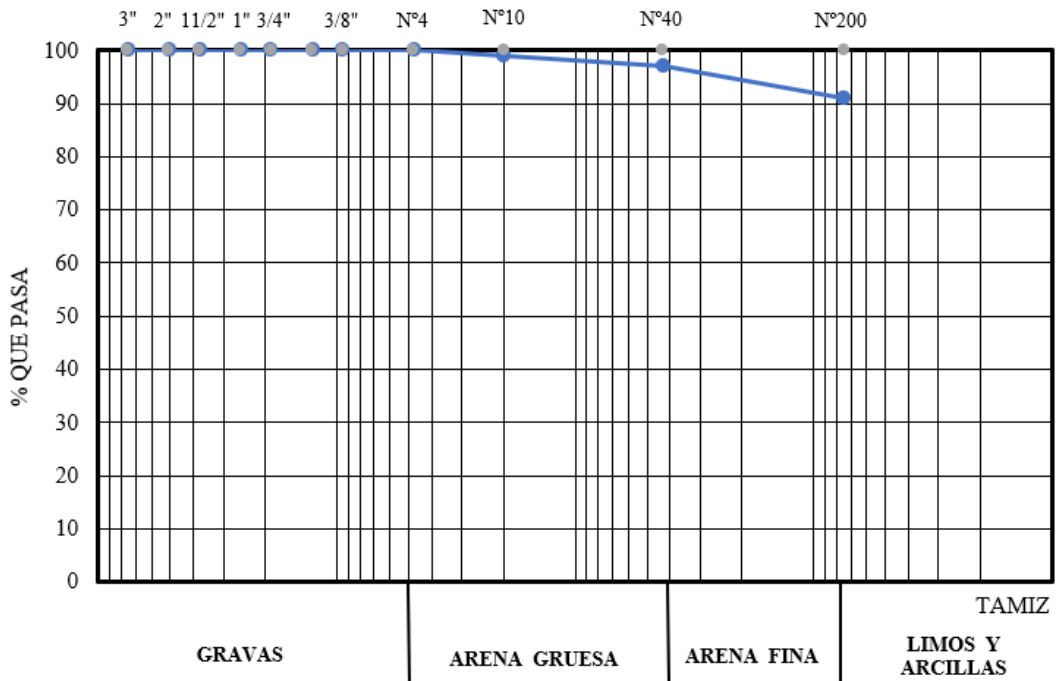
Tabla 3.3 Granulometría del tramo

Muestra	% que pasa tamiz			
	N°4	N°10	N°40	N°200
Punto N° 1	100	100	97,02	90,90
Punto N° 2	100	100	96,47	88,64
Punto N° 3	100	100	95,31	91,68
Punto N° 4	100	100	94,99	87,56
Punto N° 5	100	100	96,94	85,46
Punto N° 6	100	100	88,61	79,45
Punto N° 7	100	100	99,07	94,60
Punto N° 8	100	100	99,09	78,40
Punto N° 9	100	100	97,39	85,21
Punto N° 10	100	100	97,17	86,54
Punto N° 11	100	100	93,13	85,86
Punto N° 12	100	100	93,23	79,26
Punto N° 13	100	100	99,77	97,62
Punto N° 14	100	100	95,81	79,67
Punto N° 15	100	100	91,69	86,41
Punto N° 16	100	100	92,75	79,81
Punto N° 17	100	100	98,98	95,10
Punto N° 18	100	100	92,77	79,76
Punto N° 19	100	100	96,91	87,58

Muestra	% que pasa tamiz			
	N°4	N°10	N°40	N°200
Punto N° 20	100	100	99,83	82,11
Punto N° 21	100	100	93,8	80,44
Punto N° 22	100	100	95,07	79,53
Punto N° 23	100	100	95,76	84,93
Punto N° 24	100	100	98,25	91,92
Punto N° 25	100	100	94,03	85,06
Punto N° 26	100	100	95,66	83,82
Punto N° 27	100	100	97,18	89,43
Punto N° 28	100	100	97,3	90,76
Punto N° 29	100	100	99,26	96,43
Punto N° 30	100	100	98,75	94,62

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 Curva granulométrica del punto N°1



Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Ensayo de límites de Atterberg

Estos ensayos se realizan en el laboratorio y miden la cohesión de la muestra y su contenido de humedad.

3.3.3.1. Determinación del límite líquido (ASTM D4318; AASHTO T89)

Se ensayará en una muestra seca que haya pasado por el tamiz N°40, en una cantidad mínima de 100 gramos.

A la muestra que pasa la malla N°40 se la deposita en un plato y agregamos agua, mezclamos con una espátula para que se forme una pasta de consistencia suave, ubicar el aparato de Casagrande en una superficie plana, segura y limpia, pesamos cuatro taras vacías y limpias para poner las muestras.

Ponemos con la espátula la muestra en la copa del aparato Casagrande tratando siempre que sea de manera horizontal, logrado esto, usamos el ranurador con una mano y con la otra sujetamos la copa, tratando de que en el fondo de la ranura se encuentre visible el color de la copa, una vez realizada la ranura, accionar la copa de Casagrande al ritmo de dos golpes por segundo hasta que la ranura se una aproximadamente 1,27 cm, registrando el número de golpes.

Con la espátula y en forma perpendicular a la ranura realizamos dos cortes a la muestra justo por donde se une la ranura para luego extraerlo, colocar la muestra en la tara y pesamos ambas, por último, introducimos al horno esta muestra más la tara y dejar calentar durante 24 horas a una temperatura de 100 a 105 °C.

Figura 3.9 Materiales para el ensayo de límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10 Práctica de límite líquido



Fuente: Elaboración propia

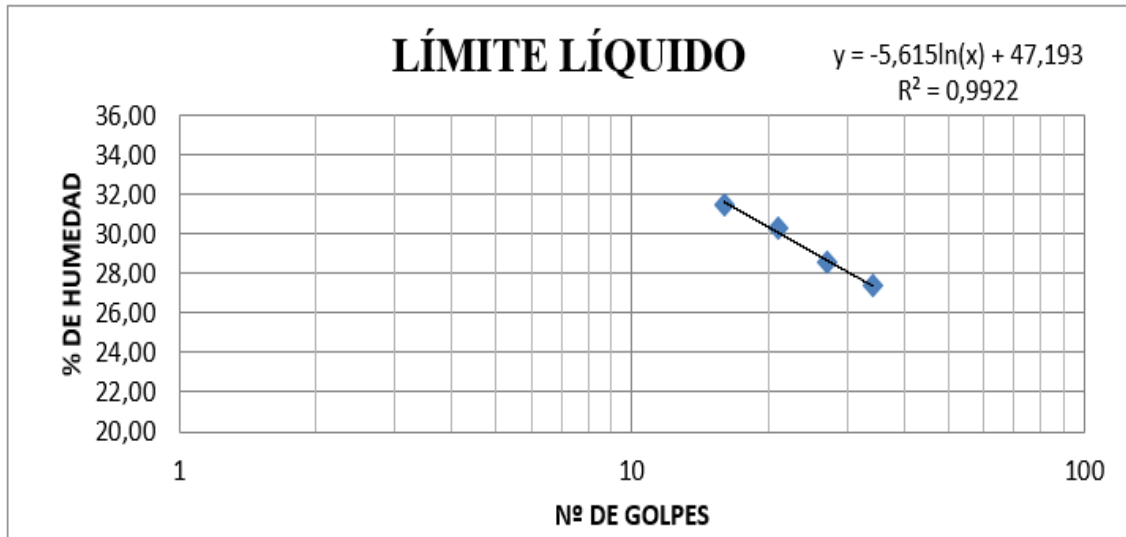
Tabla 3.4 Límite líquido del tramo

Muestra	Límite líquido	Muestra	Límite líquido
Punto N° 1	29	Punto N° 16	26
Punto N° 2	33	Punto N° 17	28
Punto N° 3	39	Punto N° 18	23
Punto N° 4	31	Punto N° 19	27
Punto N° 5	27	Punto N° 20	25
Punto N° 6	32	Punto N° 21	28
Punto N° 7	45	Punto N° 22	24
Punto N° 8	23	Punto N° 23	24
Punto N° 9	31	Punto N° 24	26
Punto N° 10	30	Punto N° 25	30
Punto N° 11	30	Punto N° 26	28
Punto N° 12	27	Punto N° 27	25

Punto N° 13	30	Punto N° 28	33
Punto N° 14	21	Punto N° 29	27
Punto N° 15	25	Punto N° 30	32

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11 Curva de fluidez del punto N°1



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2. Determinación del límite plástico e Índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90)

A la muestra preparada con agua debemos agregarle un poco más de muestra seca que haya pasado la malla N°40, se notará que la misma adquiere una consistencia más plástica.

Ocupamos la base de vidrio sobre una superficie limpia y plana, pesamos las 3 taras que se usarán para las muestras, agarramos con la mano una porción de la muestra y procedemos a amasarlo, se hace una pelotita de material para luego convertirlo en un pequeño rollito, rodándolo sobre la base de vidrio hasta que el mismo tenga un diámetro de aproximadamente tres milímetros.

Una vez que el rollito a los tres milímetros presente los agrietamientos buscados, procedemos a cortar pequeños trocitos del material en el cual se encuentren las rajaduras para ponerlas en la tara, para luego llevarla al horno, el peso de los rollitos en cada tara debe superar los tres gramos como mínimo.

Figura 3.12 Materiales para el ensayo de límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Son los materiales que se encuentran disponible en el laboratorio, los cuales fueron muy útiles para este ensayo.

Figura 3.13 Práctica de límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Se muestran en la figura los pasos realizados durante el ensayo para la obtención del límite plástico con la muestra que habíamos usado para obtener el límite líquido primeramente ya que la muestra debe tener menos humedad para que se puedan formar los rollitos.

Tabla 3.5 Límite plástico del tramo

Muestra	Límite plástico	Muestra	Límite plástico
Punto N° 1	23	Punto N° 16	21
Punto N° 2	21	Punto N° 17	19
Punto N° 3	25	Punto N° 18	13
Punto N° 4	21	Punto N° 19	19
Punto N° 5	18	Punto N° 20	17
Punto N° 6	24	Punto N° 21	20
Punto N° 7	30	Punto N° 22	17
Punto N° 8	16	Punto N° 23	17
Punto N° 9	21	Punto N° 24	15
Punto N° 10	18	Punto N° 25	22
Punto N° 11	15	Punto N° 26	20
Punto N° 12	19	Punto N° 27	13
Punto N° 13	21	Punto N° 28	20
Punto N° 14	14	Punto N° 29	16
Punto N° 15	10	Punto N° 30	21

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Clasificación de suelos (Sistema AASHTO)

Como ya tenemos los datos de granulometría y de plasticidad, procedemos a clasificar la muestra verificando que se cumpla cada condición requerida en la tabla del Sistema AAHSTO.

Tabla 3.6 Clasificación de todo el tramo

Muestra	%Que pasa N°200	Consistencia del suelo			Clasificación AASHTO
		LL	LP	IP	Grupo
Punto N° 1	90,90	29	23	7	A - 4 (8)
Punto N° 2	88,64	33	21	12	A - 6 (9)
Punto N° 3	91,68	39	25	14	A - 6 (10)
Punto N° 4	87,56	31	21	10	A - 4 (8)
Punto N° 5	85,46	27	18	9	A - 4 (8)
Punto N° 6	79,45	32	24	8	A - 4 (8)
Punto N° 7	94,60	45	30	15	A - 7 - 5 (11)

Muestra	%Que pasa N°200	Consistencia del suelo			Clasificación AASHTO
		LL	LP	IP	Grupo
Punto N° 8	78,40	23	16	8	A - 4 (8)
Punto N° 9	85,21	31	21	10	A - 4 (8)
Punto N° 10	86,54	30	18	12	A - 6 (8)
Punto N° 11	85,86	30	15	15	A - 6 (7)
Punto N° 12	79,26	27	19	8	A - 4 (8)
Punto N° 13	97,62	30	21	9	A - 4 (8)
Punto N° 14	79,67	21	14	8	A - 4 (8)
Punto N° 15	86,41	25	10	15	A - 6 (10)
Punto N° 16	79,81	26	17	9	A - 4 (8)
Punto N° 17	95,10	28	19	9	A - 4 (8)
Punto N° 18	79,76	23	13	10	A - 6 (8)
Punto N° 19	87,58	27	19	8	A - 4 (8)
Punto N° 20	82,11	25	17	8	A - 4 (8)
Punto N° 21	80,44	28	20	8	A - 4 (8)
Punto N° 22	79,53	24	17	9	A - 4 (8)
Punto N° 23	84,93	24	17	8	A - 4 (8)
Punto N° 24	91,92	26	15	11	A - 6 (8)
Punto N° 25	85,06	30	22	8	A - 4 (8)
Punto N° 26	83,82	28	20	8	A - 4 (8)
Punto N° 27	89,43	25	13	12	A - 6 (9)
Punto N° 28	90,76	33	20	13	A - 6 (10)
Punto N° 29	96,43	27	16	11	A - 6 (8)
Punto N° 30	94,62	32	21	11	A - 6 (8)

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Ensayo de compactación

Para el siguiente ensayo comenzamos tamizando la muestra aproximadamente unos 15 kilogramos en el tamiz N°4, una vez seca la muestra procedemos a darle rangos de

contenido de humedad para desarrollar la curva de compactación, en este caso los rangos hicimos variar entre 3% y 4% a partir del 8%.

Pesamos 3 kilos aproximadamente para cada probeta ya que usaremos el molde T-99, luego mezclamos la cantidad de agua de acuerdo al porcentaje que queremos llegar en humedad, se debe homogeneizar muy bien la mezcla.

Se debe registrar también el peso del molde sin el collarín, sacamos las dimensiones del molde a usar para el cálculo del volumen de la muestra posteriormente, aseguramos el molde a la base y empezamos a compactar en capas, exactamente cinco capas de 25 golpes en este caso, los golpes deben estar uniformemente distribuidos con el martillo.

Una vez realizado esto se procede a retirar el collarín para luego enrasar el material con la regla metálica y si se tiene huecos se debe rellenar con el material sobrante para que quede bien enrasado.

Luego de enrasado, se pesa el molde con su base más suelo húmedo, registrando ese dato en la planilla, luego quitamos la muestra del molde y debemos extraer el corazón de la misma para determinar el contenido de humedad real del suelo compactado.

Se repite los anteriores pasos secuencialmente, con los diferentes contenidos de humedad, para tener los puntos necesarios para graficar la curva de compactación.

Figura 3.14 Materiales para el ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15 Práctica de compactación



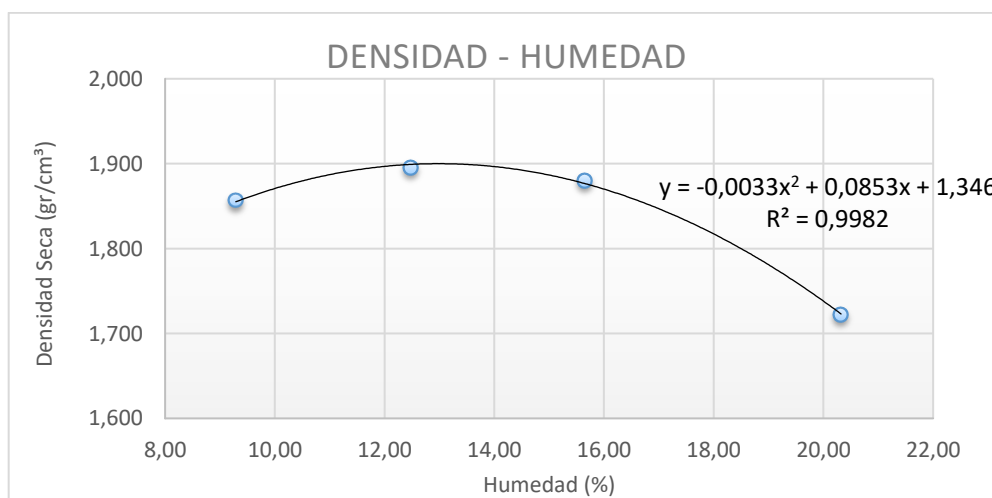
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Humedad óptima y densidad seca máxima del punto N°1

Ensayo	1	2	3	4
Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	25	25	25	25
Peso molde + suelo húmedo (gr)	6045	6140	6180	6085,0
Peso molde (gr)	4160	4160	4160	4160
Peso suelo húmedo (gr)	1885	1980	2020,0	1925
Volumen de la muestra (cm ³)	929,0	929,0	929,0	929,0
Densidad de suelo húmedo (gr/cm ³)	2,03	2,13	2,17	2,07
Capsula N°	1	2	3	4
Peso de suelo húmedo + capsula (gr)	75,27	97,37	84,4	91,87
Peso de suelo seco + capsula (gr)	69,92	87,97	74,70	78,47
Peso del agua (gr)	5,35	9,4	9,7	13,4
Peso de la cápsula (gr)	12,3	12,6	12,7	12,5
Peso de suelo seco (gr)	57,6	75,35	61,98	65,94
Contenido de humedad (%)	9,29	12,48	15,65	20,32
Densidad de suelo seco (gr/cm ³)	1,857	1,895	1,880	1,722

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16 Curva de compactación del punto N°1



Fuente: Elaboración propia

Densidad Máxima	1,90	gr/cm³
Humedad Óptima	13	%

Tabla 3.8 Densidad máxima y humedad óptima del tramo

Muestra	Densidad seca máxima (gr/cm³)	Contenido de humedad óptima (%)	Muestra	Densidad seca máxima (gr/cm³)	Contenido de humedad óptima (%)
Punto N° 1	1,9	13	Punto N° 16	1,97	11
Punto N° 2	1,79	16	Punto N° 17	1,98	11
Punto N° 3	1,69	12	Punto N° 18	1,82	13
Punto N° 4	1,9	14	Punto N° 19	1,95	11
Punto N° 5	1,9	13	Punto N° 20	1,99	10
Punto N° 6	1,88	13	Punto N° 21	1,96	10
Punto N° 7	1,8	13	Punto N° 22	1,98	11
Punto N° 8	1,96	12	Punto N° 23	2,03	9
Punto N° 9	1,91	14	Punto N° 24	1,83	13
Punto N° 10	1,9	13	Punto N° 25	1,98	12
Punto N° 11	1,9	12	Punto N° 26	1,94	11
Punto N° 12	1,98	11	Punto N° 27	1,9	12
Punto N° 13	1,91	13	Punto N° 28	1,85	13
Punto N° 14	1,97	11	Punto N° 29	1,89	12
Punto N° 15	1,89	11	Punto N° 30	1,8	13

Fuente: Elaboración propia

3.3.6. Densidad In Situ Método del cono de arena (ASTM D1516; AASHTO T191)

Esta prueba se utiliza para determinar la densidad de los suelos en terraplenes, bases, subrasantes, etc. En el lugar de la obra vial.

Figura 3.17 Materiales para el ensayo de densidad In Situ



Fuente: Elaboración propia

3.3.6.1. Calibración del frasco

En primer lugar, se llena el frasco con agua y enroscamos el cono al frasco y registramos el peso del aparato más agua, cuidando que por la rosca no escurra agua. Posteriormente se pesa el aparato para tener el peso del agua y también se debe tomar la temperatura del agua para la corrección en la estimación de la densidad del agua, entonces con estos datos se puede calcular el volumen del equipo hasta la llave de paso.

Figura 3.18 Práctica de calibración del frasco



Fuente: Elaboración propia

3.3.6.2. Calibración de arena

La arena que se usó fue tamizada en el tamiz N°16 y retenida en el N°30, procedemos a llenar la arena en el equipo totalmente secado previo a esto, se debe introducir la arena necesaria para llenar hasta la llave de tal manera que el acomodamiento de la arena sea uniforme en toda la sección del frasco, cuando ya se encuentre la arena al nivel de la llave se debe registrar el peso para luego restar el del equipo y obtener el peso de la arena pura.

Con este dato y el volumen del frasco podemos calcular la densidad de la arena, luego debemos obtener también la arena que puede entrar en el cono, la forma fue dejando salir la arena en una superficie plana y pesarla posteriormente cuando ya no tenía más espacio en el mismo.

Figura 3.19 Práctica de la calibración de arena



Fuente: Elaboración propia

3.3.6.3. Metodología en campo

En primer lugar, se limpia el lugar donde se realizará el ensayo, luego aseguramos la placa al suelo con unos clavos para poder excavar el hoyo de manera cómoda, la profundidad del hoyo en este caso fue de 12 a 15 cm, cuando ya se logra este paso seguimos a extraer la muestra de suelo que sacamos del hoyo en una bolsita para llevarla al laboratorio a obtener su peso, el cual sería en la tabla el peso de suelo húmedo retirado del hoyo.

Seguidamente debemos volcar el equipo sobre la placa y abrir la llave para dejar caer la arena del mismo al hoyo hasta que éste quede completamente lleno y la arena ya no disminuya del frasco, una vez hecho esto se cierra la llave del cono para después pesar el equipo más la arena que está dentro del mismo, ya que nos interesa saber la cantidad de arena que queda en el frasco después del ensayo.

Éstos son todos los pasos que se realizaron en el tramo de análisis en los 30 puntos que se extrajeron las muestras.

Figura 3.20 Práctica en campo del cono de arena



Fuente: Elaboración propia

Se muestran algunas fotos del trabajo en campo que se realizó durante el ensayo para la obtención de la densidad in situ.

Tabla 3.9 Valores obtenidos de densidad In Situ

Muestra	Densidad In Situ (gr/cm ³)	Contenido de humedad (%)	Muestra	Densidad In Situ (gr/cm ³)	Contenido de humedad (%)
Punto N° 1	1,5	7,87	Punto N° 16	1,47	3,35
Punto N° 2	1,41	4,22	Punto N° 17	1,59	5,68
Punto N° 3	1,4	8,94	Punto N° 18	1,51	6,42
Punto N° 4	1,59	6,21	Punto N° 19	1,37	4,88
Punto N° 5	1,46	3,98	Punto N° 20	1,51	3,6
Punto N° 6	1,51	3,98	Punto N° 21	1,37	3,3
Punto N° 7	1,52	4,22	Punto N° 22	1,39	2,79
Punto N° 8	1,56	3,97	Punto N° 23	1,54	5,1
Punto N° 9	1,4	5,9	Punto N° 24	1,4	4,58
Punto N° 10	1,58	4,98	Punto N° 25	1,41	3,57
Punto N° 11	1,58	7,37	Punto N° 26	1,36	3,64
Punto N° 12	1,42	7,65	Punto N° 27	1,39	4,5
Punto N° 13	1,45	4,08	Punto N° 28	1,36	5,29
Punto N° 14	1,54	3,43	Punto N° 29	1,48	5,71
Punto N° 15	1,47	5,71	Punto N° 30	1,56	4,22

Fuente: Elaboración propia

3.3.7. Compresión no confinada

Con el ensayo de compresión no confinada se busca determinar la carga última de una muestra cilíndrica de suelo, este ensayo se puede realizar en condiciones de compresión intactas o alteradas, en este caso realizamos el ensayo con probetas alteradas ya que necesitábamos variar el contenido de humedad de las mismas.

Para esto se somete la muestra cilíndrica de suelo a un esfuerzo vertical con la deformación controlada, y se mide la máxima carga que resiste, es decir solo tomamos en cuenta la fuerza axial, con las lecturas realizadas podemos obtener la gráfica de esfuerzo – deformación, a partir del cual tendremos el valor de la resistencia a la compresión simple (q_u), calculamos el módulo de elasticidad el cual nos interesa para este análisis.

Figura 3.21 Práctica de compresión no confinada



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10 Obtención de la carga última y gráfica esfuerzo - deformación

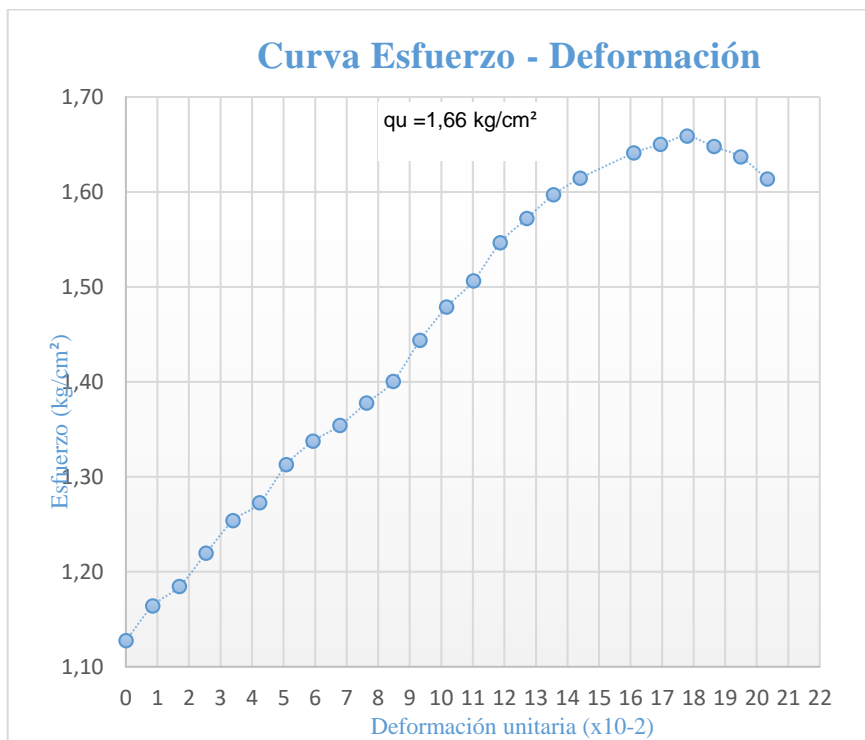
Lectura del deformímetro (0.001")	Deformímetro de carga (mm)	Deformación de la muestra (mm)	Deformación unitaria dl/l (x10-2)	Coefficiente de área	Área corregida (cm ²)	Carga total sobre la muestra (kgf)	Esfuerzo sobre la muestra (kgf/cm ²)
0	0,000	0,000	0,000	1,000	39,480	44,513	1,127
5	0,006	0,127	0,847	0,992	39,818	46,347	1,164
10	0,010	0,254	1,694	0,983	40,161	47,569	1,184
15	0,016	0,381	2,542	0,975	40,510	49,402	1,220
20	0,022	0,508	3,389	0,966	40,865	51,236	1,254
25	0,026	0,635	4,236	0,958	41,227	52,458	1,272
30	0,033	0,762	5,083	0,949	41,595	54,597	1,313
35	0,038	0,889	5,931	0,941	41,970	56,125	1,337
40	0,042	1,016	6,778	0,932	42,351	57,348	1,354
45	0,047	1,143	7,625	0,924	42,739	58,876	1,378
50	0,052	1,270	8,472	0,915	43,135	60,404	1,400
55	0,060	1,397	9,320	0,907	43,538	62,848	1,444
60	0,067	1,524	10,167	0,898	43,949	64,988	1,479
65	0,073	1,651	11,014	0,890	44,367	66,821	1,506

Lectura del deformímetro (0.001")	Deformímetro de carga (mm)	Deformación de la muestra (mm)	Deformación unitaria dl/l (x10-2)	Coefficiente de área	Área corregida (cm ²)	Carga total sobre la muestra (kgf)	Esfuerzo sobre la muestra (kgf/cm ²)
70	0,081	1,778	11,861	0,881	44,794	69,266	1,546
75	0,087	1,905	12,708	0,873	45,228	71,099	1,572
80	0,093	2,032	13,556	0,864	45,672	72,933	1,597
85	0,098	2,159	14,403	0,856	46,124	74,461	1,614
95	0,107	2,413	16,097	0,839	47,055	77,211	1,641
100	0,111	2,540	16,945	0,831	47,535	78,433	1,650
105	0,115	2,667	17,792	0,822	48,025	79,656	1,659
110	0,116	2,794	18,639	0,814	48,525	79,961	1,648
115	0,117	2,921	19,486	0,805	49,036	80,267	1,637
120	0,116	3,048	20,334	0,797	49,557	79,961	1,614

Fuente: Elaboración propia

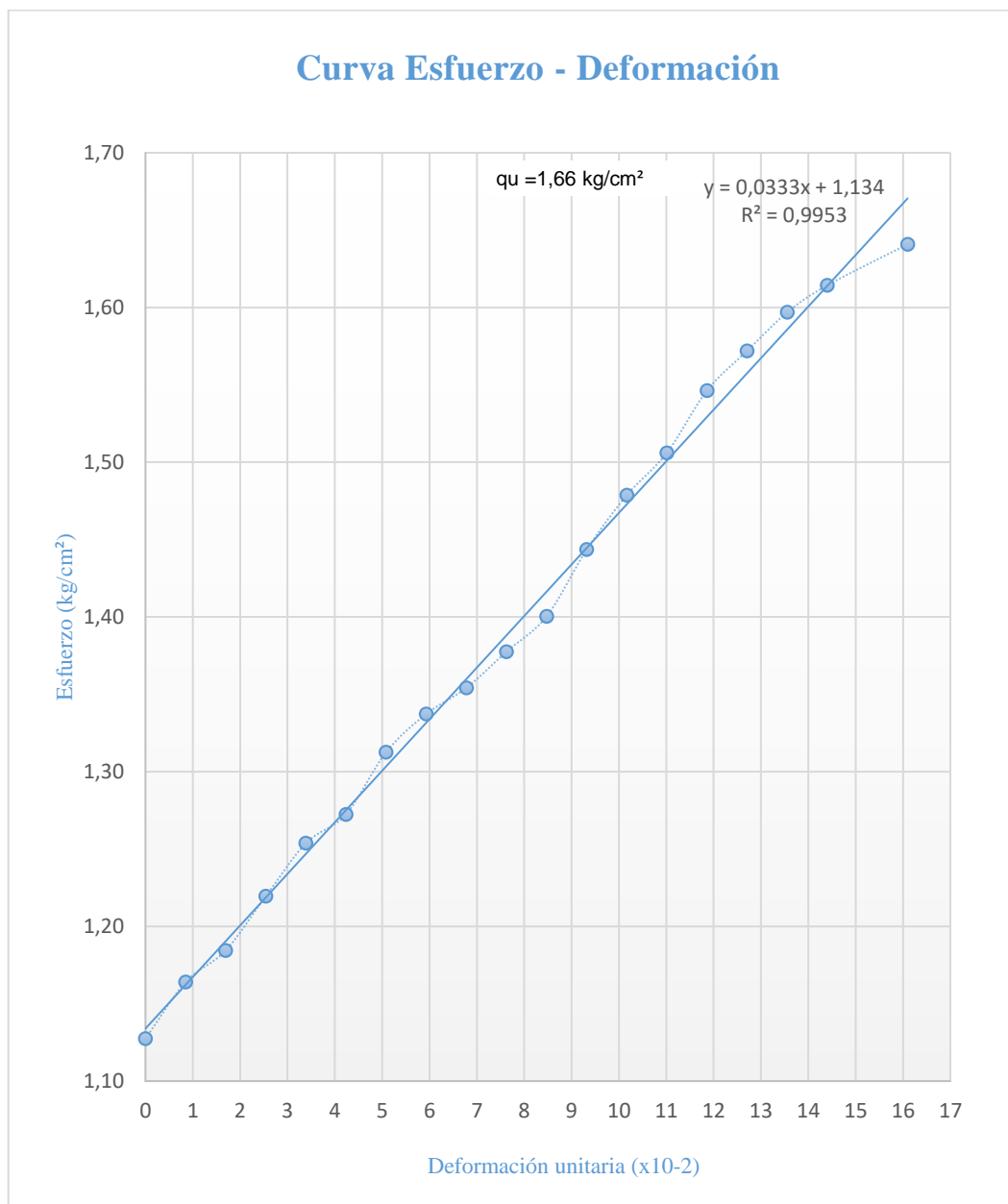
De la tabla 3.10 podemos obtener los datos que necesitamos para conocer el valor del módulo de elasticidad, es decir como sabemos el módulo elasticidad es la pendiente de la curva, entonces de la siguiente figura podemos observar que tenemos las tres zonas de deformación de todo material, en este proyecto solo se tomará en cuenta la zona elástica para el cálculo del módulo de elasticidad.

Figura 3.22 Curva esfuerzo - deformación



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.23 Obtención del módulo de elasticidad



Fuente: Elaboración propia

En la bibliografía estipula que el módulo secante del suelo es la tangente de la curva de deformación, teniendo que cumplir esta con un valor mínimo de R² igual a 0,96 por lo que comprobamos este dato durante el proceso para que nuestros datos sean confiables, entonces obtenemos de esa manera los valores del mismo.

En la tabla 3.11 detallaremos los datos más importantes que nos brinda la curva realizada con los resultados obtenidos del ensayo de compresión no confinada.

Tabla 3.11 Datos obtenidos de la curva esfuerzo vs deformación

Muestra	Esfuerzo (kgf/cm²)	Cohesión (kgf/cm²)	Deformación en la zona plástica (mm)	Módulo de elasticidad (kgf/cm²)
Punto N° 1	1,66	0,83	2,41	0,0333
Punto N° 2	1,71	0,86	4,45	0,0167
Punto N° 3	1,85	0,92	1,14	0,0828
Punto N° 4	2,23	1,11	2,67	0,0510
Punto N° 5	1,98	0,99	2,54	0,0528
Punto N° 6	2,18	1,09	2,03	0,0737
Punto N° 7	2,33	1,17	1,02	0,1908
Punto N° 8	3,98	1,99	2,92	0,1407
Punto N° 9	1,78	0,89	3,28	0,0308
Punto N° 10	2,27	1,14	1,27	0,1326
Punto N° 11	2,10	1,05	3,05	0,0418
Punto N° 12	1,53	0,76	1,91	0,0240
Punto N° 13	1,63	0,82	2,41	0,0238
Punto N° 14	1,66	0,83	4,45	0,0144
Punto N° 15	2,01	1,01	0,89	0,0997
Punto N° 16	0,81	0,40	2,16	0,0216
Punto N° 17	2,20	1,10	1,52	0,1237
Punto N° 18	2,07	1,04	3,05	0,0397
Punto N° 19	1,99	0,99	2,41	0,0385
Punto N° 20	1,81	0,91	2,67	0,0287
Punto N° 21	2,05	1,03	2,16	0,0545
Punto N° 22	1,42	0,71	2,67	0,0165
Punto N° 23	1,62	0,81	2,79	0,0177
Punto N° 24	1,45	0,73	1,65	0,0239
Punto N° 25	1,85	0,93	1,02	0,0564
Punto N° 26	1,62	0,81	2,16	0,0259
Punto N° 27	1,96	0,98	1,40	0,0626
Punto N° 28	1,84	0,92	2,54	0,0409
Punto N° 29	2,06	1,03	0,89	0,1112
Punto N° 30	3,20	1,60	1,52	0,1955

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12 Resumen datos obtenidos

Muestra	Humedad óptima (%)	ρ máx. (gr/cm³)	Humedad In Situ (%)	ρ In Situ (gr/cm³)	Rangos de GC (%)	Nueva densidad (gr/cm³)	Nuevo contenido de humedad (%)	Esfuerzo (kgf/cm²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm²)
Punto N° 22	11	1,98	2,79	1,39	50	0,99	2,5	1,42	0,0165
Punto N° 24	13	1,83	4,58	1,4	50	0,92	2,7	1,45	0,0239
Punto N° 12	11	1,98	7,65	1,42	50	0,99	3	1,53	0,024
Punto N° 19	11	1,95	4,88	1,37	50	0,97	4	1,99	0,0385
Punto N° 21	10	1,96	3,3	1,37	50	0,98	5	2,05	0,0545
Punto N° 26	11	1,94	3,64	1,36	60	1,17	3	1,62	0,0259
Punto N° 9	14	1,91	5,9	1,4	60	1,14	3,5	1,78	0,0308
Punto N° 28	13	1,85	5,29	1,36	60	1,11	3,8	1,84	0,0409
Punto N° 25	12	1,98	3,57	1,41	60	1,19	4	1,85	0,0564
Punto N° 27	12	1,90	4,5	1,39	60	1,14	5	1,96	0,0626
Punto N° 23	9	2,03	5,1	1,54	70	1,42	3,5	1,62	0,0177
Punto N° 16	11	1,97	3,35	1,47	70	1,38	4	0,81	0,0216
Punto N° 13	13	1,91	4,08	1,45	70	1,34	4,5	1,63	0,0238
Punto N° 20	10	1,99	3,6	1,51	70	1,39	5	1,81	0,0287
Punto N° 3	12	1,69	8,94	1,4	70	1,18	6	1,85	0,0828
Punto N° 14	11	1,97	3,43	1,54	80	1,58	3	1,66	0,0144
Punto N° 2	16	1,79	4,22	1,41	80	1,43	3,5	1,71	0,0167
Punto N° 5	13	1,90	3,98	1,46	80	1,52	4	1,98	0,0528
Punto N° 15	11	1,89	5,71	1,47	80	1,51	6	2,01	0,0997

Muestra	Humedad óptima (%)	ρ máx. (gr/cm³)	Humedad In Situ (%)	ρ In Situ (gr/cm³)	Rangos de GC (%)	Nueva densidad (gr/cm³)	Nuevo contenido de humedad (%)	Esfuerzo (kgf/cm²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm²)
Punto N° 29	12	1,89	5,71	1,48	80	1,51	6,5	2,06	0,1112
Punto N° 1	13	1,90	7,87	1,50	90	1,71	4	1,66	0,0333
Punto N° 6	13	1,88	3,98	1,51	90	1,69	4,5	2,18	0,0737
Punto N° 17	11	1,98	5,68	1,59	90	1,78	5	2,20	0,1237
Punto N° 10	13	1,90	4,98	1,58	90	1,71	6	2,27	0,1326
Punto N° 8	12	1,96	3,97	1,56	90	1,76	6,8	3,98	0,1407
Punto N° 18	13	1,82	6,42	1,51	100	1,82	10	2,07	0,0397
Punto N° 11	12	1,90	7,37	1,58	100	1,90	11	2,10	0,0418
Punto N° 4	14	1,90	6,21	1,59	100	1,90	12	2,23	0,051
Punto N° 7	13	1,80	4,22	1,52	100	1,80	12,5	2,33	0,1908
Punto N° 30	13	1,80	4,22	1,56	100	1,80	13	3,20	0,1955

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se ilustran los datos y rangos que se usaron de grados de compactación de acuerdo a las especificaciones técnicas para la obtención de las nuevas densidades y contenidos de humedad que nos llevaron a obtener la compactación a diferentes grados para la realización del análisis de comportamiento y variación del módulo de elasticidad del material que compone la subrasante.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA

DEFORMACIÓN SEGÚN EL

GRADO DE COMPACTACIÓN

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN SEGÚN EL GRADO DE COMPACTACIÓN

Los resultados obtenidos del tramo cumplen con las especificaciones de granulometría que corresponden a arcillas de media a baja plasticidad, en la cual se quería realizar el estudio, el tramo de la subrasante se encuentra en la ciudad de Tarija – Cercado llamado Segunda Circunvalación.

La siguiente tabla muestra datos obtenidos del suelo en condiciones naturales, tales como la humedad, el índice de plasticidad, la densidad in situ y el tipo de suelo según su clasificación. Esto permite evidenciar que la humedad natural del suelo varía de 4% a 8% respectivamente, de acuerdo a los valores del IP se puede verificar que los suelos son arcillas de media a baja compresibilidad tendiendo un índice de plasticidad que varía de 7 a 15, mismas que forman parte del tramo en estudio.

Tabla 4.1 Estado natural del suelo

Estado natural del suelo					
Humedad Natural (%)	Índice de plasticidad	Tipo de suelo	Densidad In Situ (gr/cm ³)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Grado de Compactación (%)
8	7	A-4 (8)	1,5	1,9	79
6	10	A-4 (8)	1,59	1,9	84
4	9	A-4 (8)	1,46	1,9	77
4	8	A-4 (8)	1,51	1,88	80
4	8	A-4 (8)	1,56	1,96	80
6	10	A-4 (8)	1,4	1,91	73
8	8	A-4 (8)	1,42	1,98	72
5	9	A-4 (8)	1,45	1,91	76
4	8	A-4 (8)	1,54	1,97	78
4	9	A-4 (8)	1,47	1,97	75
6	9	A-4 (8)	1,59	1,98	80
5	8	A-4 (8)	1,37	1,95	70
4	8	A-4 (8)	1,51	1,99	76
4	8	A-4 (8)	1,37	1,96	70
3	9	A-4 (8)	1,39	1,98	70

Estado natural del suelo					
Humedad Natural (%)	Índice de plasticidad	Tipo de suelo	Densidad In Situ (gr/cm ³)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Grado de Compactación (%)
6	8	A-4 (8)	1,54	2,03	76
4	8	A-4 (8)	1,41	1,98	71
4	8	A-4 (8)	1,36	1,94	70
5	12	A-6 (9)	1,41	1,79	79
8	14	A-6 (10)	1,4	1,69	83
5	12	A-6 (8)	1,58	1,9	83
8	15	A-6 (7)	1,58	1,9	83
6	15	A-6 (10)	1,47	1,89	78
7	10	A-6 (8)	1,51	1,82	83
5	11	A-6 (8)	1,4	1,83	77
5	12	A-6 (9)	1,39	1,9	73
6	13	A-6 (10)	1,36	1,85	74
6	11	A-6 (8)	1,48	1,89	78
5	11	A-6 (8)	1,56	1,8	87
5	15	A-7-5 (11)	1,52	1,8	84

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.1 muestra el grado de compactación obtenido mediante el ensayo de densidad in situ, éstos varían entre 70% y 87% respectivamente a lo largo del tramo, según Rosetti y Begliardo (2005) indica que los valores del grado de compactación deben ser mayor al 70% en la subrasante para darle buenas condiciones a la misma, ya que al tratarse de una subrasante los grados de compactación exigidos para las mismas no son muy elevados como se especifica con la capa base o subbase, por lo tanto el tramo en estudio no necesita de un tratamiento adicional al momento de conformar un pavimento.

4.1. Análisis del módulo de elasticidad según el grado de compactación

Las probetas para el ensayo de compresión no confinada fueron elaboradas a diferentes porcentajes de humedad para obtener diferentes grados de compactación, los cuales se pudo variar de acuerdo a las especificaciones técnicas para subrasantes.

Grados de compactación utilizados en esta investigación son los siguientes:

50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%.

Para los cuales se elaboraron cinco probetas de cada grado de compactación de acuerdo con el cálculo de la muestra para esta investigación.

4.1.1. Resumen de los datos obtenidos del módulo de elasticidad con 50% de grado de compactación

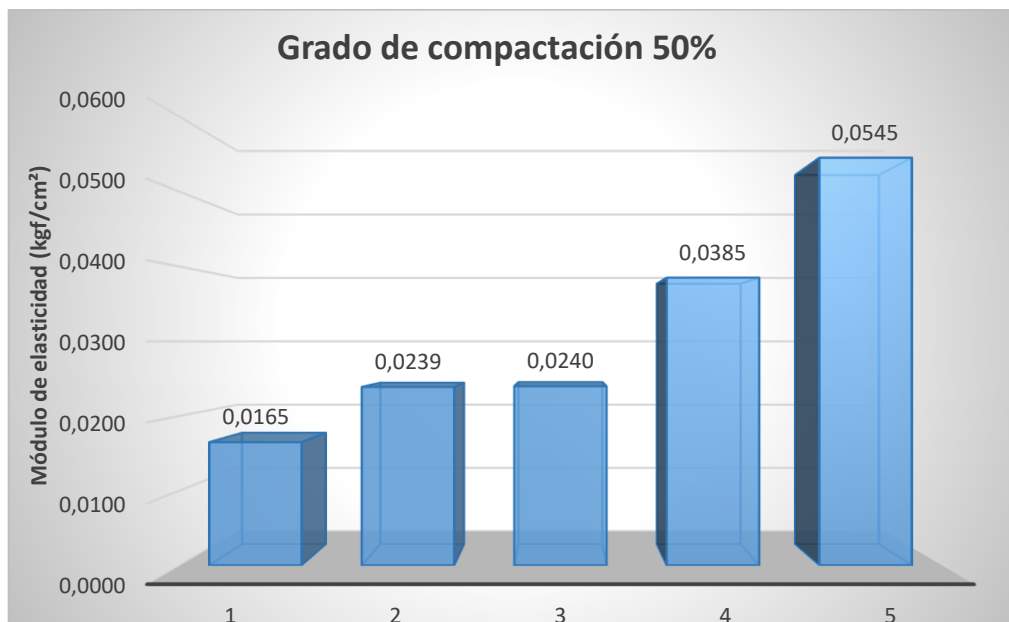
Los resultados que se muestra en la siguiente tabla corresponden para las probetas con un grado de compactación del 50%

Tabla 4.2 Valores de la carga última y módulo de elasticidad al 50%

GC (%)	Muestra	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm ²)
50%	Punto N° 22	1,42	0,0165
	Punto N° 24	1,45	0,0239
	Punto N° 12	1,53	0,0240
	Punto N° 19	1,99	0,0385
	Punto N° 21	2,05	0,0545
	promedio		0,0315
	máximo		0,0545
	mínimo		0,0165

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1 Variación del GC al 50%



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.1 podemos observar cómo van aumentando los valores del módulo de elasticidad a medida que aumenta el esfuerzo o la carga última, se entiende que los valores son bajos porque la compactación es baja en estos puntos.

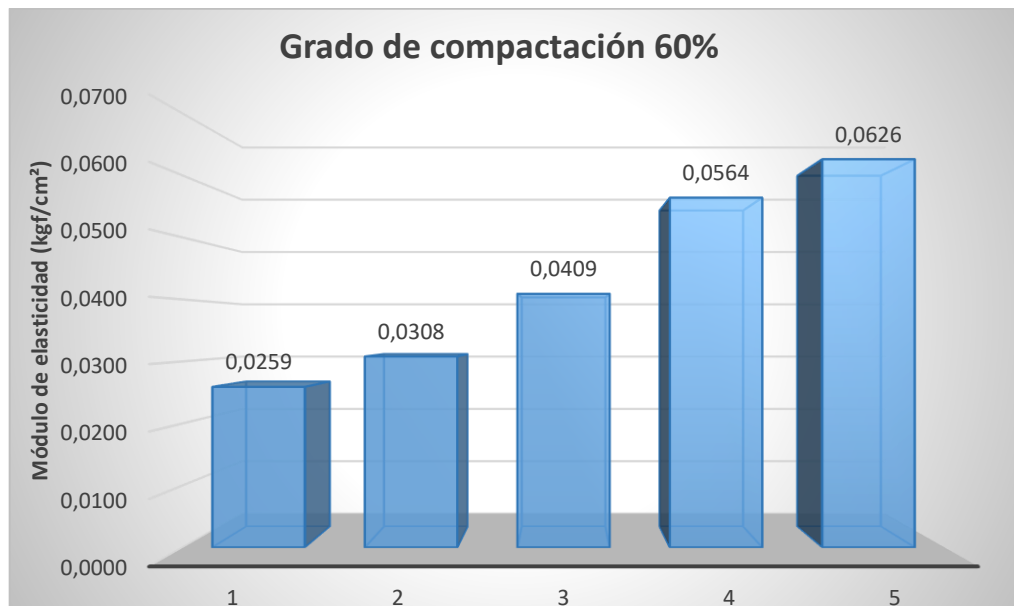
4.1.2. Resumen de los datos obtenidos del módulo de elasticidad con 60% de grado de compactación

Tabla 4.3 Valores de la carga última y módulo de elasticidad al 60%

GC (%)	Muestra	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm ²)
60%	Punto N° 26	1,62	0,0259
	Punto N° 9	1,78	0,0308
	Punto N° 28	1,84	0,0409
	Punto N° 25	1,85	0,0564
	Punto N° 27	1,96	0,0626
	promedio		0,0433
	máximo		0,0626
	mínimo		0,0259

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2 Variación del GC al 60%



Fuente: Elaboración propia

Con esta figura ya tenemos los valores del módulo de elasticidad a un 60% de grado de compactación por lo que podemos observar que aumentaron un poco los valores.

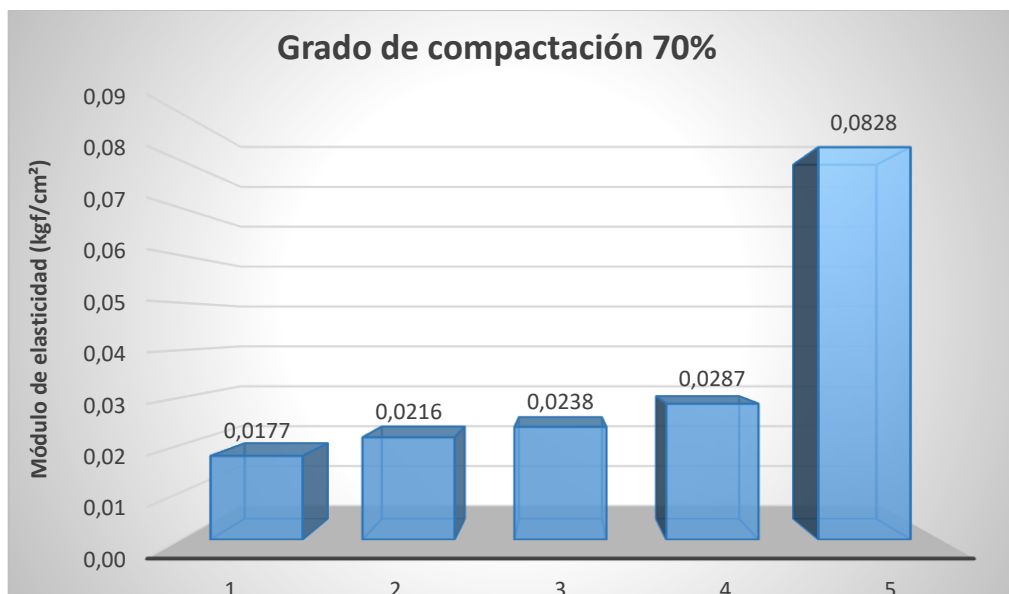
4.1.3. Resumen de los datos obtenidos del módulo de elasticidad con 70% de grado de compactación

Tabla 4.4 Valores de la carga última y módulo de elasticidad al 70%

GC (%)	Muestra	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm ²)
70%	Punto N° 23	1,62	0,0177
	Punto N° 16	0,81	0,0216
	Punto N° 13	1,63	0,0238
	Punto N° 20	1,81	0,0287
	Punto N° 3	1,85	0,0828
	promedio		0,0392
	máximo		0,0828
	mínimo		0,0216

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3 Variación del GC al 70%



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.3 podemos observar que los valores del módulo de elasticidad no varían mucho en cuanto a los puntos N°23, N°16, N°13, y N°20, sus valores se mantienen casi

similares, pero con una ascendencia, aunque mínima a comparación del punto número 3 el cual sí aumentó considerablemente a comparación de los demás.

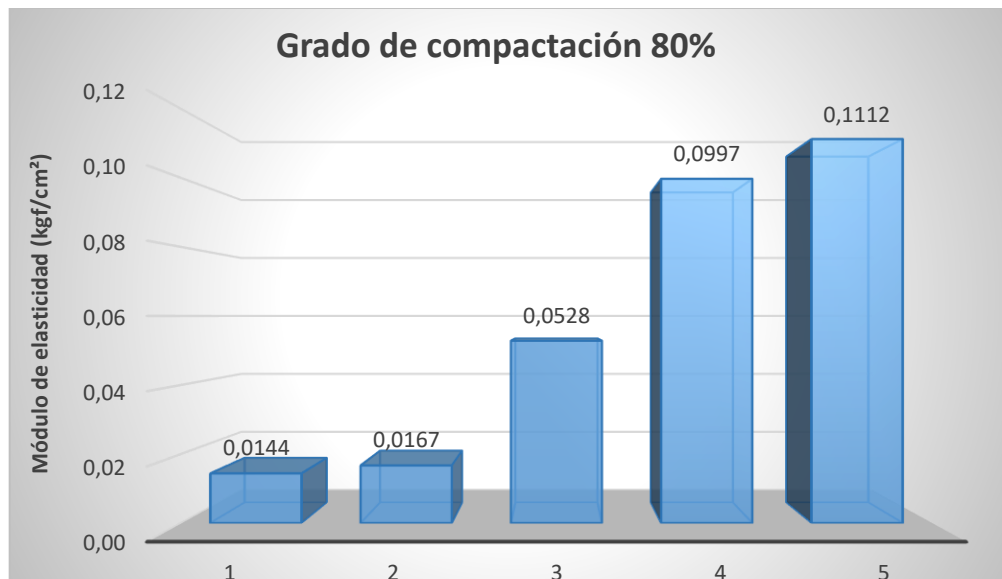
4.1.4. Resumen de los datos obtenidos del módulo de elasticidad con 80% de grado de compactación

Tabla 4.5 Valores de la carga última y módulo de elasticidad al 80%

GC (%)	Muestra	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm ²)
80%	Punto N° 14	1,66	0,0144
	Punto N° 2	1,71	0,0167
	Punto N° 5	1,98	0,0528
	Punto N° 15	2,01	0,0997
	Punto N° 29	2,06	0,1112
	promedio		0,0590
	máximo		0,1337
	mínimo		0,0114

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4 Variación del GC al 80%



Fuente: Elaboración propia

Esta figura nos muestra que los puntos N°14 y N°2 se mantienen casi constantes a diferencia de los siguientes 3 puntos que ascienden de una manera considerable llegando a un máximo de 11 Kpa.

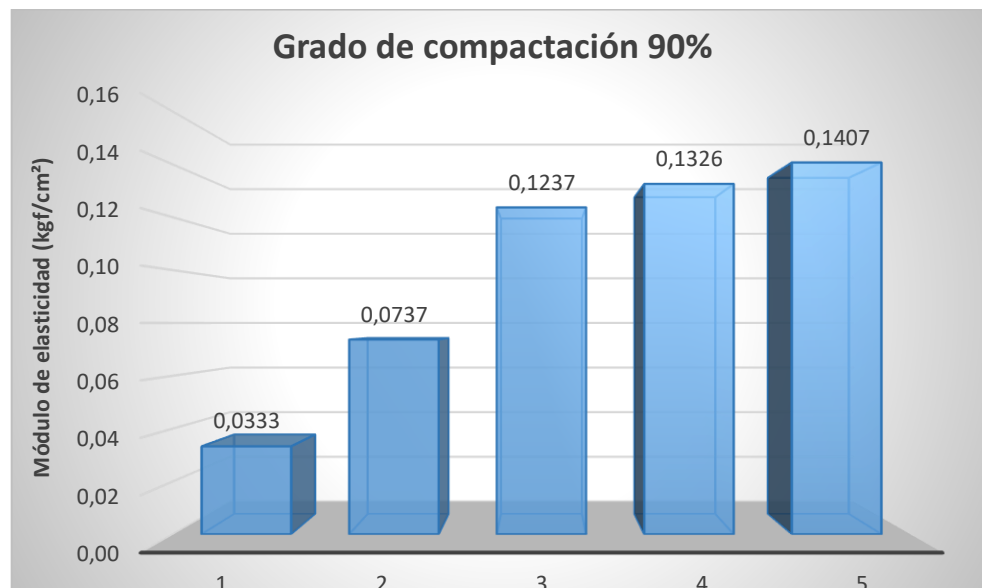
4.1.5. Resumen de los datos obtenidos del módulo de elasticidad con 90% de grado de compactación

Tabla 4.6 Valores de la carga última y módulo de elasticidad al 90%

GC (%)	Muestra	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm ²)
90%	Punto N° 1	1,66	0,0333
	Punto N° 6	2,18	0,0737
	Punto N° 17	2,20	0,1237
	Punto N° 10	2,27	0,1326
	Punto N° 8	3,98	0,1407
	promedio		0,1008
	máximo		0,1407
	mínimo		0,0333

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5 Variación del GC al 90%



Fuente: Elaboración propia

Con la figura 4.5 ya estamos en un 90% de compactación, estas muestras ya tienen el contenido de humedad más elevado por lo que podemos decir que los valores del módulo de elasticidad siguen aumentando, pero manteniendo la misma ascendencia de acuerdo a los datos anteriores.

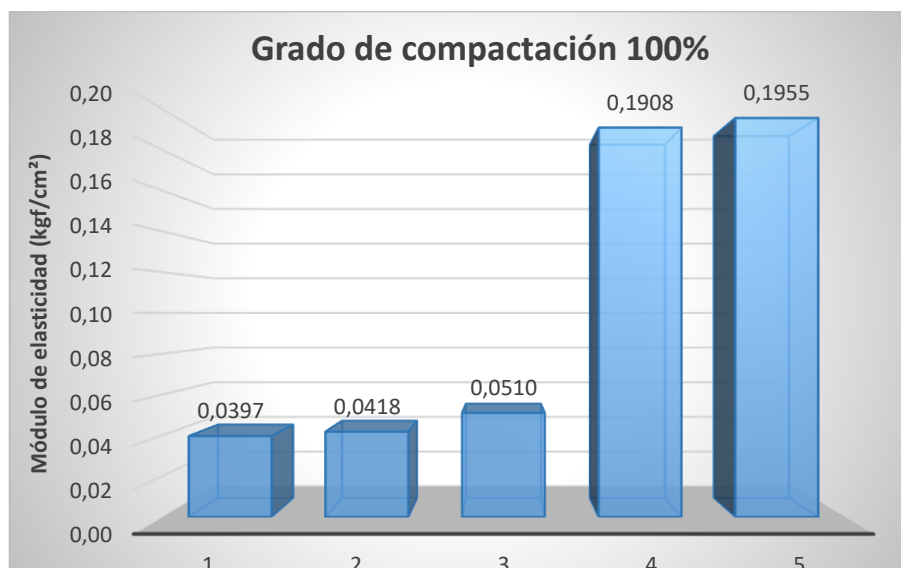
4.1.6. Resumen de los datos obtenidos del módulo de elasticidad con 100% de grado de compactación

Tabla 4.7 Valores de la carga última y módulo de elasticidad al 100%

GC (%)	Muestra	Esfuerzo (kgf/cm ²)	Módulo de elasticidad (kgf/cm ²)
100%	Punto N° 18	2,07	0,0397
	Punto N° 11	2,10	0,0418
	Punto N° 4	2,23	0,0510
	Punto N° 7	2,33	0,1908
	Punto N° 30	3,20	0,1955
	promedio		0,1017
	máximo		0,1955
	mínimo		0,0369

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6 Variación del GC al 100%



Fuente: Elaboración propia

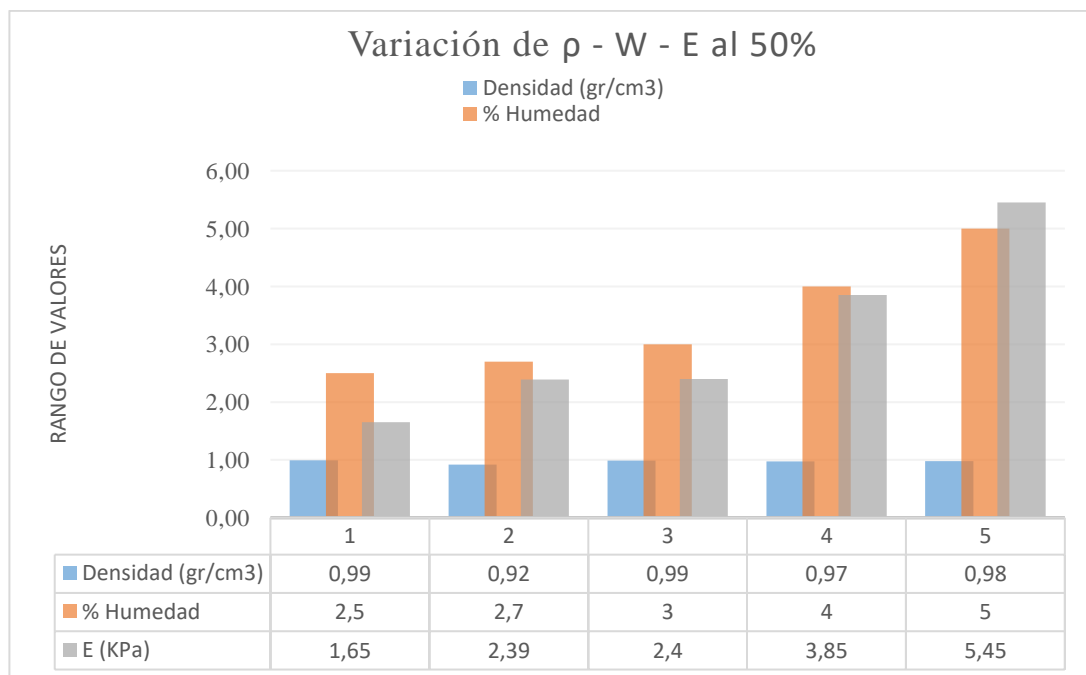
La figura 4.6 nos muestra la variación del módulo de elasticidad con una compactación del 100%, podemos decir que los valores del punto N°18, N°11, y N°4 no alcanzaron los valores de humedad requeridos para que la ascensión de los valores entre ellos sea considerable, en cambio los dos últimos puntos alcanzaron un módulo de elasticidad alto con 19,55 Kpa siendo el mayor.

4.2. Variación de densidad, humedad y módulo de elasticidad

Los valores obtenidos en el laboratorio de las variables mencionadas como la densidad, la humedad y el módulo de elasticidad tienen valores mínimos y máximos calculados como ya lo presentamos en el anterior punto, en este caso veremos cuál es el comportamiento de los mismos comparando las tres variables en conjunto, si bien no tienen las mismas unidades, de estas figuras podremos resaltar si la hipótesis planteada estaba en lo correcto o no, ya que si estamos manipulando el grado de compactación, este mismo depende directamente de la densidad y humedad, por lo que se ve necesario analizar el comportamiento de estos datos como tal.

4.2.1. Variación al 50% de grado de compactación

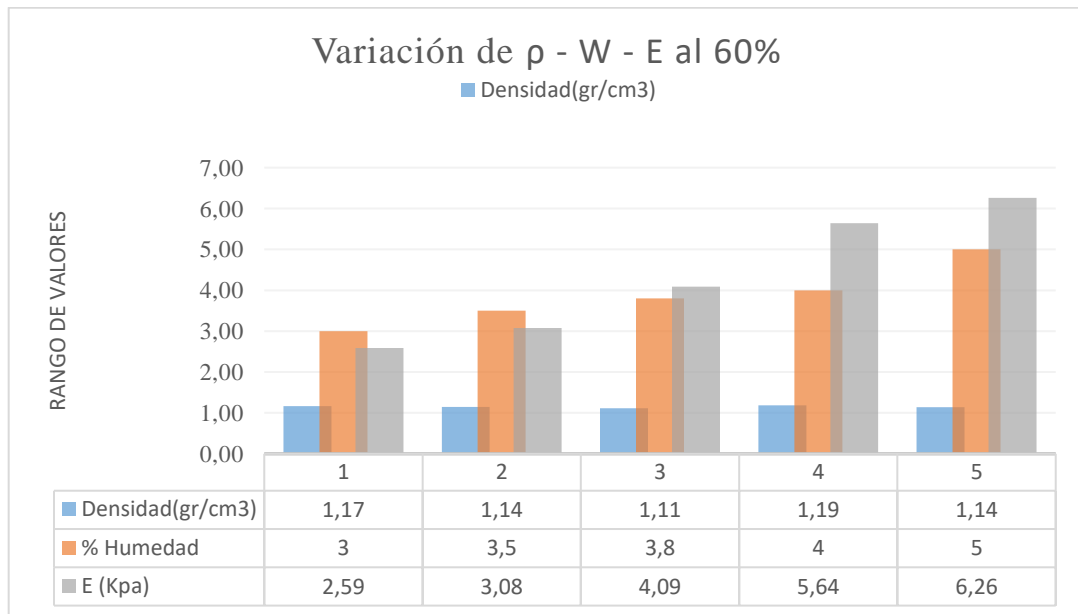
Figura 4.7 Datos de densidad, humedad y módulo al 50% GC



Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Variación al 60% de grado de compactación

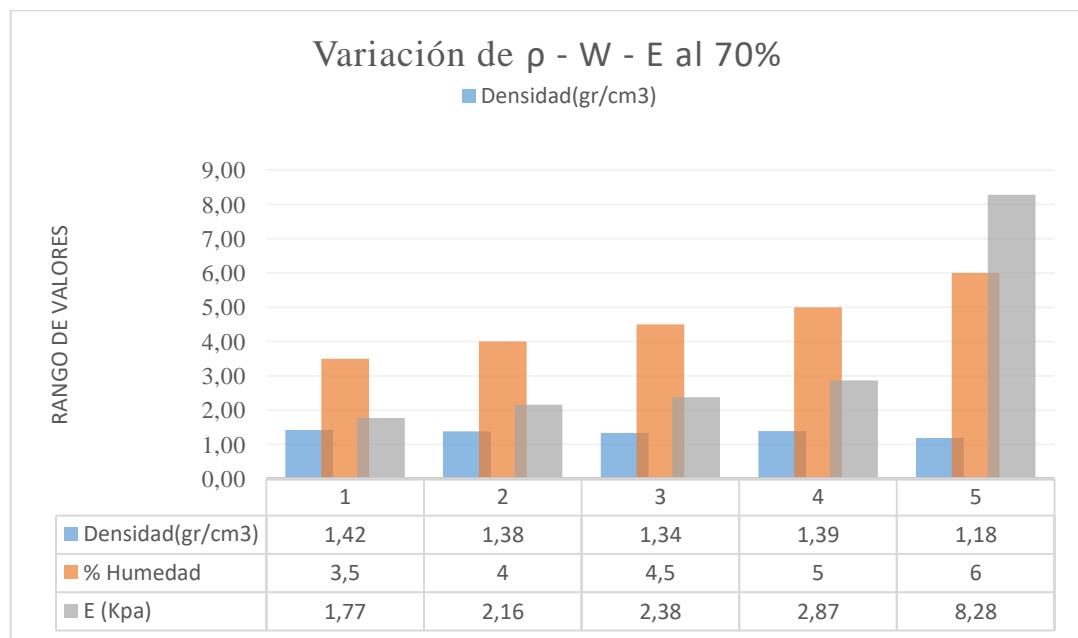
Figura 4.8 Datos de densidad, humedad y módulo al 60% GC



Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Variación al 70% de grado de compactación

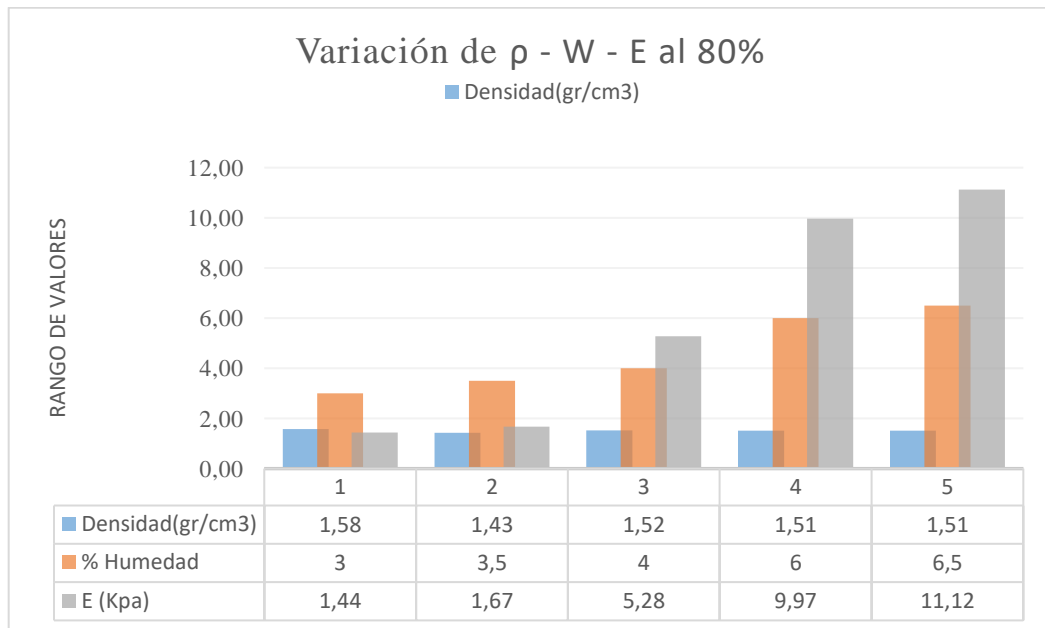
Figura 4.9 Datos de densidad, humedad y módulo al 70% GC



Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Variación al 80% de grado de compactación

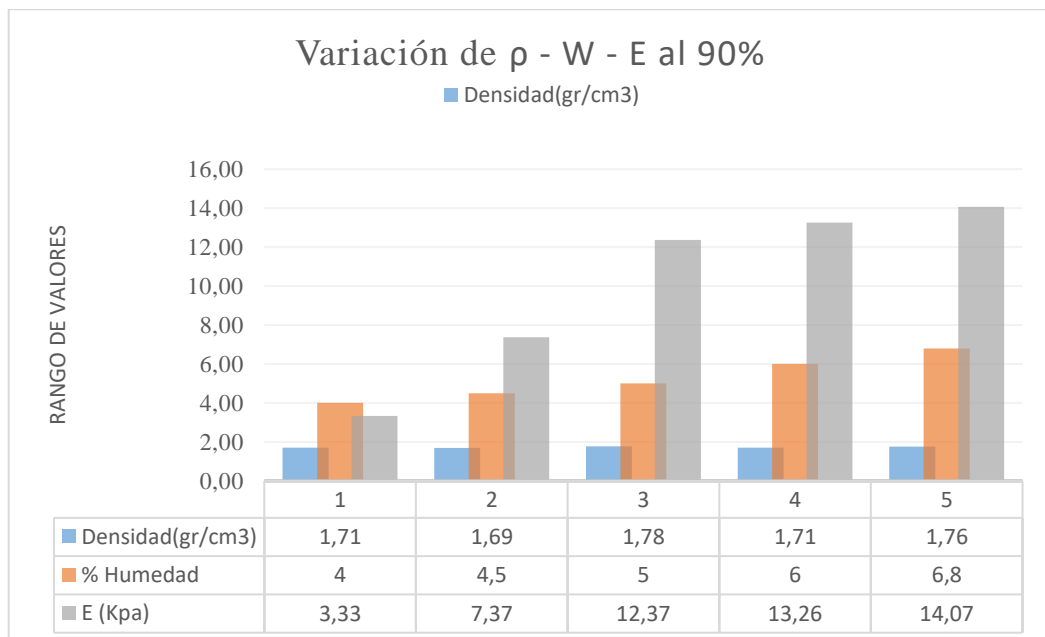
Figura 4.10 Datos de densidad, humedad y módulo al 80% GC



Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Variación al 90% de grado de compactación

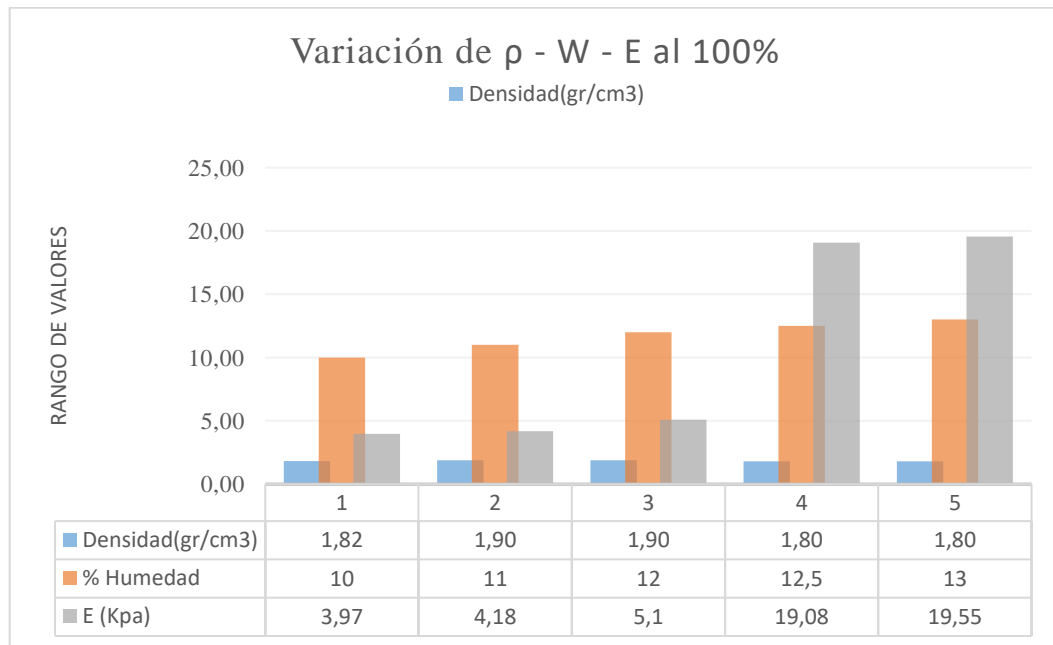
Figura 4.11 Datos de densidad, humedad y módulo al 90% GC



Fuente: Elaboración propia

4.2.6. Variación al 100% de grado de compactación

Figura 4.12 Datos de densidad, humedad y módulo al 100% GC



Fuente: Elaboración propia

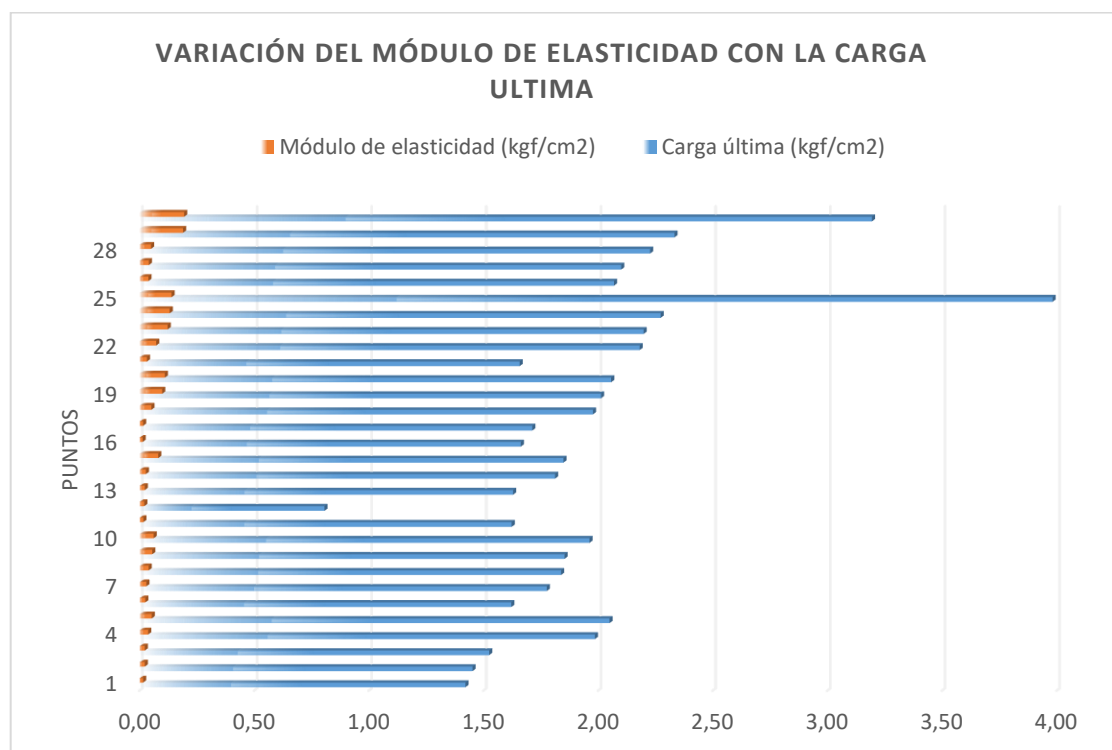
Como podemos observar los valores obtenidos como resultados del módulo de elasticidad varían de acuerdo al contenido de humedad y a la densidad a la cual se compactaron las muestras ensayadas, ya que estas tuvieron rangos diferentes sucesivamente, por lo que podemos observar en las figuras anteriores que a medida que sube la densidad o el contenido de humedad, también lo hace el valor del módulo de elasticidad.

4.3. Carga última y módulo de elasticidad

Para poder entender un poco más la variación de la deformación y la resistencia de cada probeta ensayada mostramos la siguiente figura, la cual nos muestra que los valores de carga última o los esfuerzos están variando junto con el módulo de elasticidad en conjunto en la mayoría de los casos, por lo que podemos decir que esta carga también puede tener relación con el módulo de elasticidad.

Los valores de carga última están entre $0,81 \text{ kg/cm}^2$ y $3,98 \text{ kg/cm}^2$ las cuales clasifican a nuestro material como una arcilla de media a firme según su consistencia.

Figura 4.13 Módulo de elasticidad y carga última



Fuente: Elaboración propia

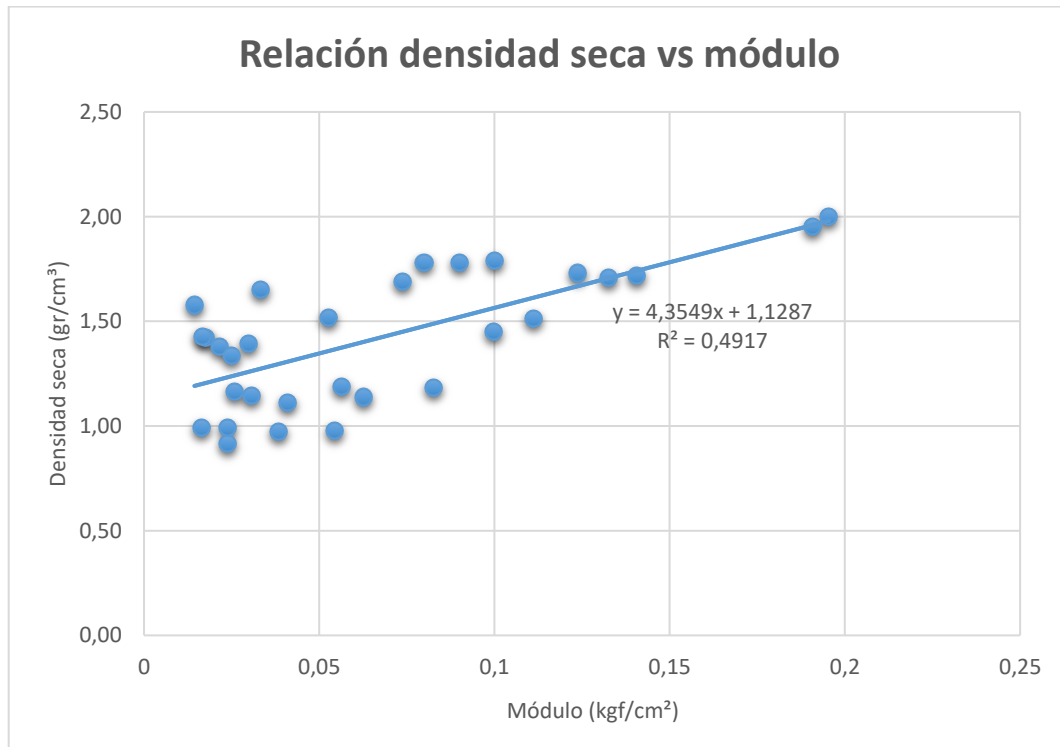
4.4. Densidad seca y módulo de elasticidad

Durante los ensayos en la toma de densidad in situ del tramo en estudio, estos obtuvieron un grado de compactación de un 70% hasta un 87%, nosotros en nuestro análisis tomamos en cuenta valores más bajos, es decir a partir del 50% ya que esta es una de las especificaciones técnicas como mínima para una subrasante, es decir a partir de este valor ya se la puede considerar apta.

En lo que respecta a los valores obtenidos durante los ensayos de la densidad seca y los módulos de elasticidad, podemos observar el valor de R^2 en este caso no es muy alto, ya que la dispersión de los datos es notoria.

El software de Microsoft Excel con la tabulación de los datos nos otorga una representación gráfica de la dispersión de los puntos mostrándose a continuación en la figura 4.14 donde el eje de ordenadas corresponde a las densidades tomadas por el ensayo de cono de arena, mientras que las abscisas es el módulo de elasticidad calculado a partir de la gráfica esfuerzo – deformación de cada punto.

Figura 4.14 Relación de densidad seca y módulo



Fuente: Elaboración propia

Podemos resaltar que la tendencia de los datos tanto de densidad como del módulo de elasticidad son ascendentes, aunque no con mucha diferencia entre cada punto, siendo esta la razón de la dispersión de los mismos al momento de graficarlos.

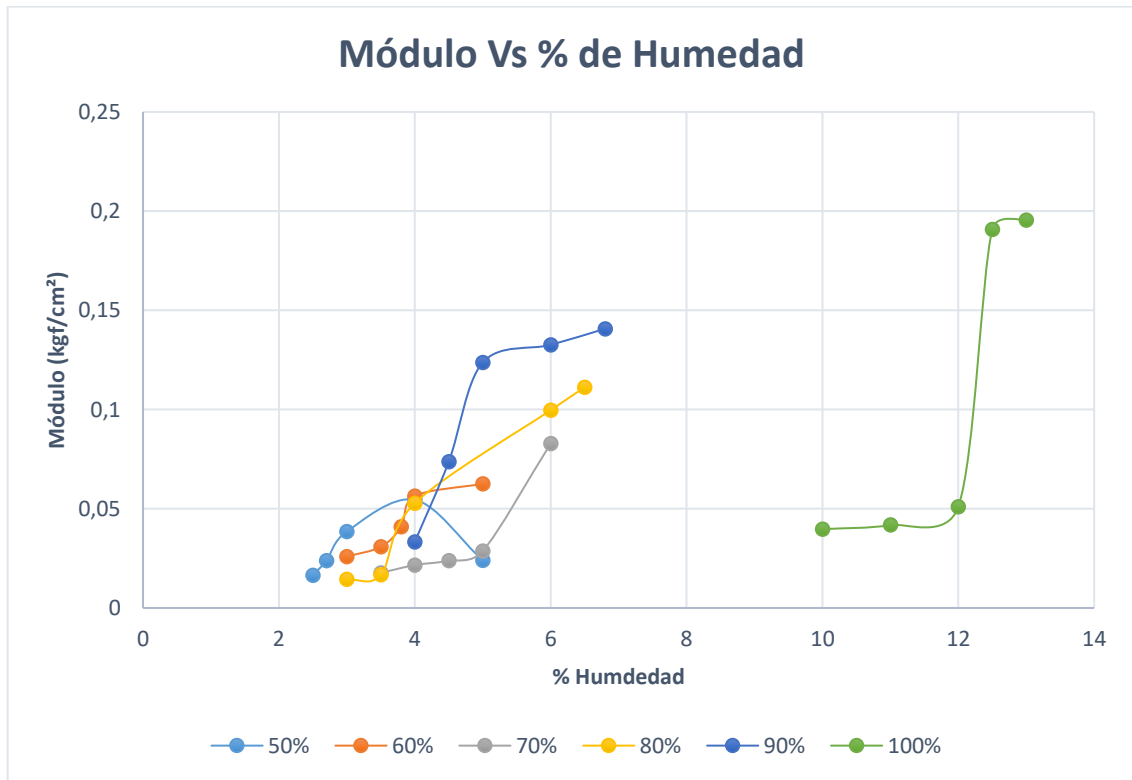
Luego de observar la linealidad o relación que guardan las dos variables mostradas, podemos mencionar que el módulo de elasticidad de 19,55 Kpa es el más alto al obtener una compactación del 100% en el punto número 30 con una densidad de 1,8 gr/cm³.

4.5. Módulo de elasticidad y el porcentaje de humedad

A continuación, mostramos como resultan las curvas de cada rango de compactación y así apreciar el comportamiento del módulo de elasticidad en cada caso.

Es necesario graficar estos datos ya que aquí podemos observar que a medida que el módulo de elasticidad aumenta, también aumenta el porcentaje de humedad, si bien no son las curvas perfectas, se puede apreciar la tendencia que tienen los datos, ya que cada curva está a un porcentaje de compactación mencionado.

Figura 4.15 Curvas de módulo vs % de humedad



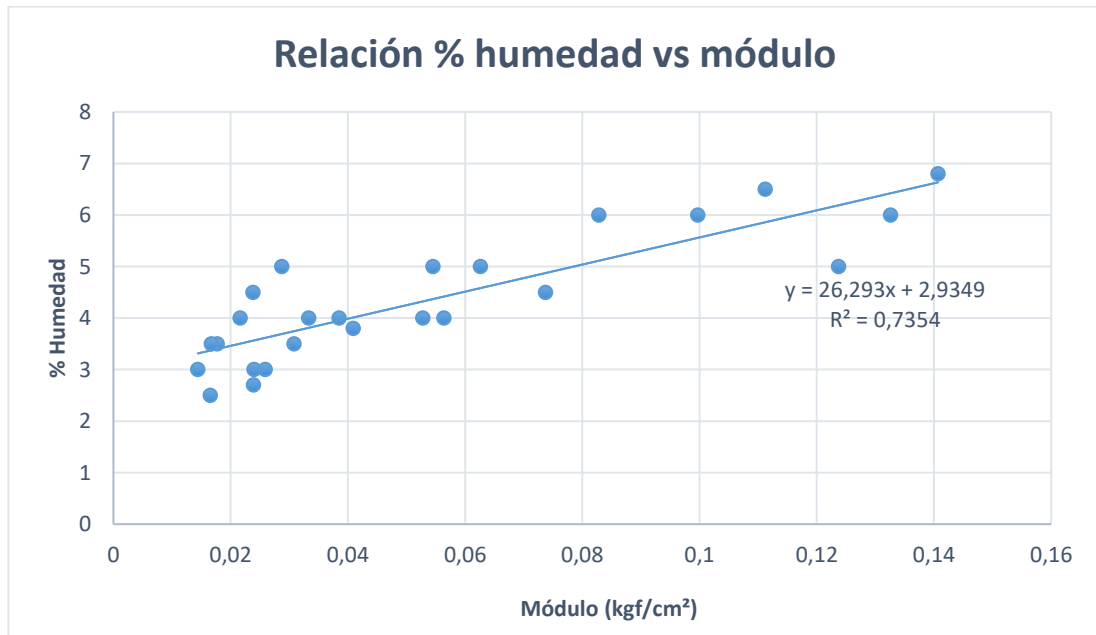
Fuente: Elaboración propia

También podemos resaltar que el contenido de humedad tiene valores menores de los rangos de compactación de 50% a 90% en cambio, la única curva con contenido de humedad óptima son las probetas que están compactadas al 100%.

4.5.1. Relación del módulo de elasticidad con el contenido de humedad

Estuvimos observando que en este caso los valores de humedad son los que fueron variando para alcanzar la densidad requerida para cierto grado de compactación, entonces haremos la relación de dicha humedad con el módulo de elasticidad ya que este dato es el que queremos ver cómo se comporta en relación a la misma.

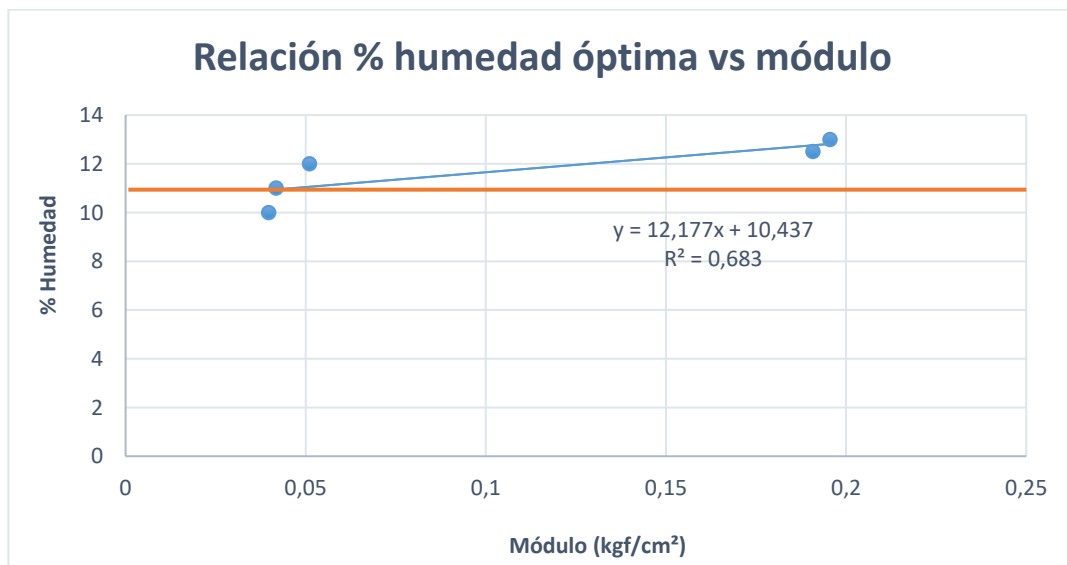
Figura 4.16 Relación % humedad vs módulo de elasticidad



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.16 se muestra la relación del porcentaje de humedad con los valores del módulo de elasticidad de los puntos que están en el rango de 50% a 90%, podemos observar que esta relación es muy buena ya que obtenemos un valor de R^2 de 0,73 de la regresión lineal.

Figura 4.17 Relación % humedad óptima vs módulo

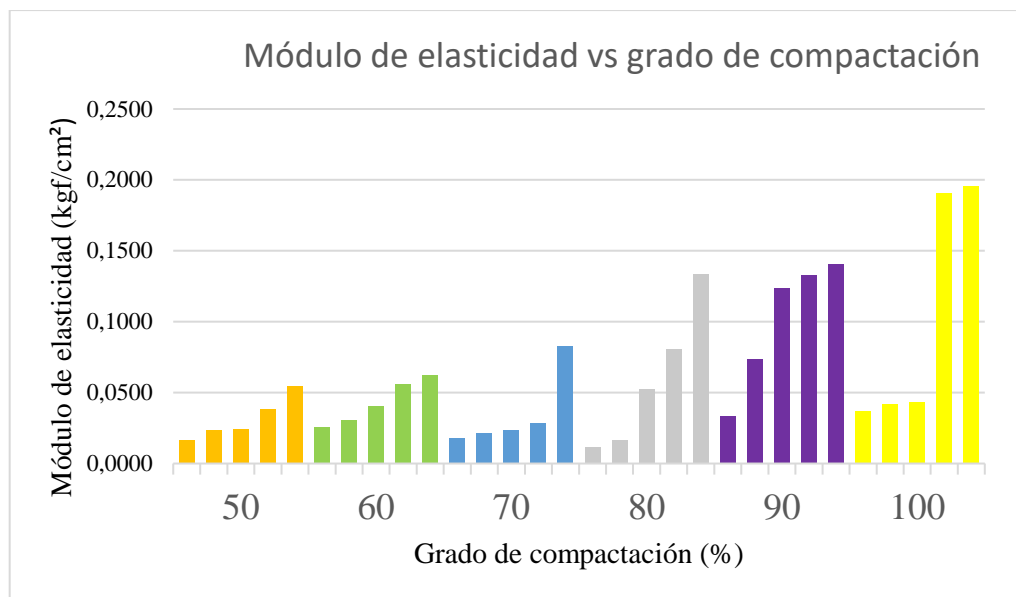


Fuente: Elaboración propia

Graficamos la figura 4.17 porque son los valores obtenidos de humedad óptima ya que necesitábamos las probetas compactadas al 100%, entonces estos valores obtuvieron una relación buena también entre ellos ya que se obtuvo un valor de R^2 de 0,68, en este caso se puede denotar que los valores del módulo de elasticidad es el que más variación obtuvo según el rango que se obtuvo de los mismos.

4.6. Análisis de resultados

Figura 4.18 Módulo de elasticidad vs grado de compactación



Fuente: Elaboración propia

Los valores mostrados se deben a la influencia del grado de compactación en el módulo de elasticidad, ya que este varía de acuerdo al porcentaje que se presente en la sub rasante, tenemos los resultados de cinco probetas para cada caso, en el cual se observan que a medida que aumenta el grado de compactación también aumenta el módulo de elasticidad.

Teniendo como valor máximo de módulo de elasticidad de 19,55 Kpa el cual se da en el rango de 100% de grado de compactación.

Observando los puntos de estudio se pudo obtener el valor promedio, valor máximo y valor mínimo según el rango de grado de compactación como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.8 Valores máximos y mínimos de módulo de elasticidad

Módulo de elasticidad (kg/cm²)						
GC	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Promedio	0,0315	0,0433	0,0552	0,0590	0,1008	0,1017
valor máximo	0,0545	0,0626	0,0828	0,1337	0,1407	0,1955
valor mínimo	0,0165	0,0259	0,0216	0,0114	0,0333	0,0369

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.8 se observa que el módulo de elasticidad varió de 1,65 Kpa a 19,55 Kpa donde los valores más altos se dan con un grado de compactación del 100% por lo tanto podemos decir que a mayor grado de compactación mayor será el módulo de elasticidad.

4.6.1. Relación del grado de compactación y el módulo de elasticidad

En la siguiente tabla se muestra el promedio obtenido del módulo de elasticidad para cada rango del grado de compactación analizado, los cuales nos darán una idea de la tendencia de los valores.

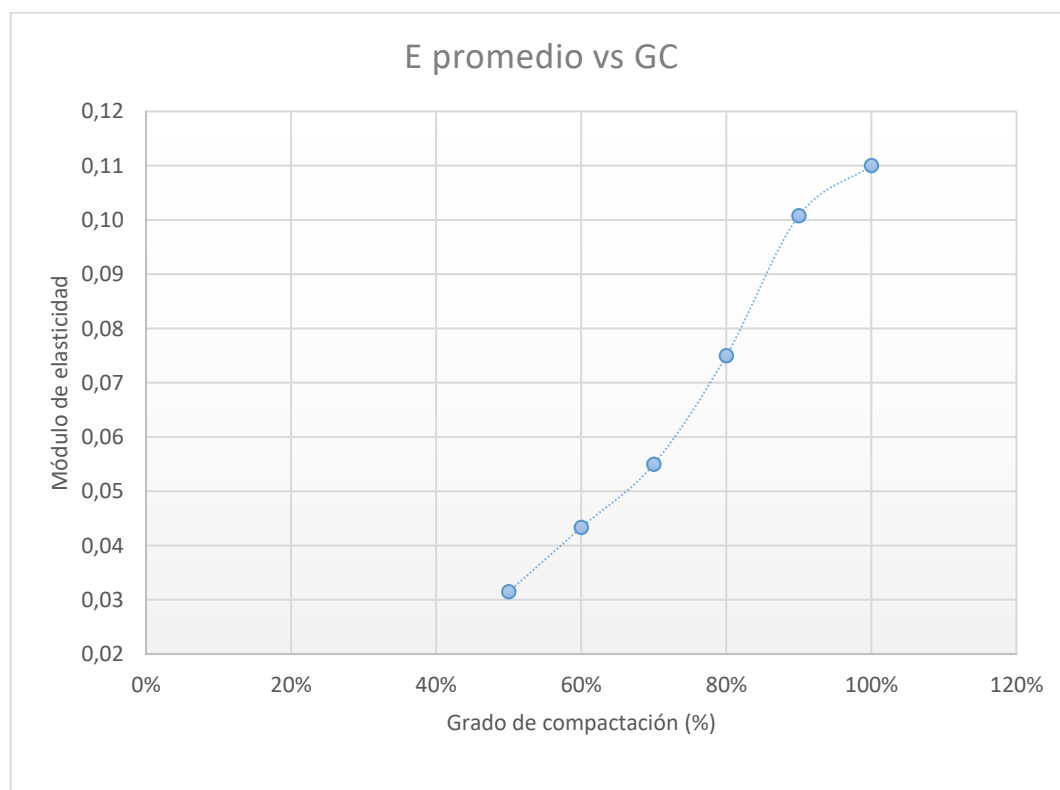
También debemos recordar que la dispersión de los datos entre los rangos de cada grado de compactación es considerable en el 90% y 100% lo cual hizo que el valor máximo obtenido baje considerablemente en esta tabla a 10,17 Kpa, pero se quiere resaltar la tendencia que tienen los mismos ya que debemos ver el comportamiento del módulo de elasticidad en cada caso.

Tabla 4.9 Valores promedios de E

GC (%)	E(promedio) (kgf/cm²)	E(promedio) (Kpa)
50%	0,0315	3,15
60%	0,0433	4,33
70%	0,0552	5,52
80%	0,0590	5,90
90%	0,1008	10,08
100%	0,1017	10,17

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.19 Módulo de elasticidad promedio vs GC



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica podemos observar la tendencia que tienen los datos analizados en los 6 rangos de grados de compactación tomados el valor mínimo según las especificaciones técnicas para subrasantes, entonces podemos mencionar que el módulo va aumentar de acuerdo a la compactación que tenga el suelo. Del tramo en estudio podemos decir que la subrasante sí cumple con las especificaciones técnicas ya que los valores de grados de compactación obtenidos de la misma fueron desde un 65% para arriba.

4.7. Relación de variables

La relación entre variables se mide mediante el coeficiente de correlación, el cual actúa como indicativo si existe relación entre las variables.

En la siguiente tabla nos muestra una comparación de modelos matemáticos para poder relacionar el grado de compactación con el módulo de elasticidad

Tabla 4.10 Modelos matemáticos relacionados

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado de X	0,9379	87,96%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9358	87,57%
Cuadrado Doble	0,9309	86,67%
Log-Y Cuadrado-X	0,9282	86,15%
Raíz Cuadrada de Y	0,9183	84,32%
Log probit	0,9179	84,25%
Logístico	0,9168	84,06%
Exponencial	0,9162	83,94%
Lineal	0,9153	83,77%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9065	82,18%
Raíz Cuadrada Doble	0,9057	82,03%
Raíz Cuadrada de X	0,9001	81,02%
Cuadrado de Y	0,9	81,01%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,8949	80,08%
Multiplicativa	0,8946	80,02%
Inversa de Y	-0,8945	80,02%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,8911	79,41%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8908	79,36%
Inversa-Y Log-X	-0,8855	78,41%
Logaritmo de X	0,8826	77,90%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,8807	77,57%
Doble Inverso	0,8684	75,41%
Curva S	-0,8645	74,74%
Cuadrado-Y Log-X	0,8592	73,81%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,855	73,10%
Inversa de X	-0,8417	70,85%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,8106	65,70%

Fuente: Software Statgraphics

Siendo el mejor modelo que se ajusta a estas variables un modelo “Cuadrado de X” con un coeficiente de correlación de 0,9358 y R^2 igual a 87,96%, indicando una relación “Fuerte” entre las variables (según la tabla 4.11).

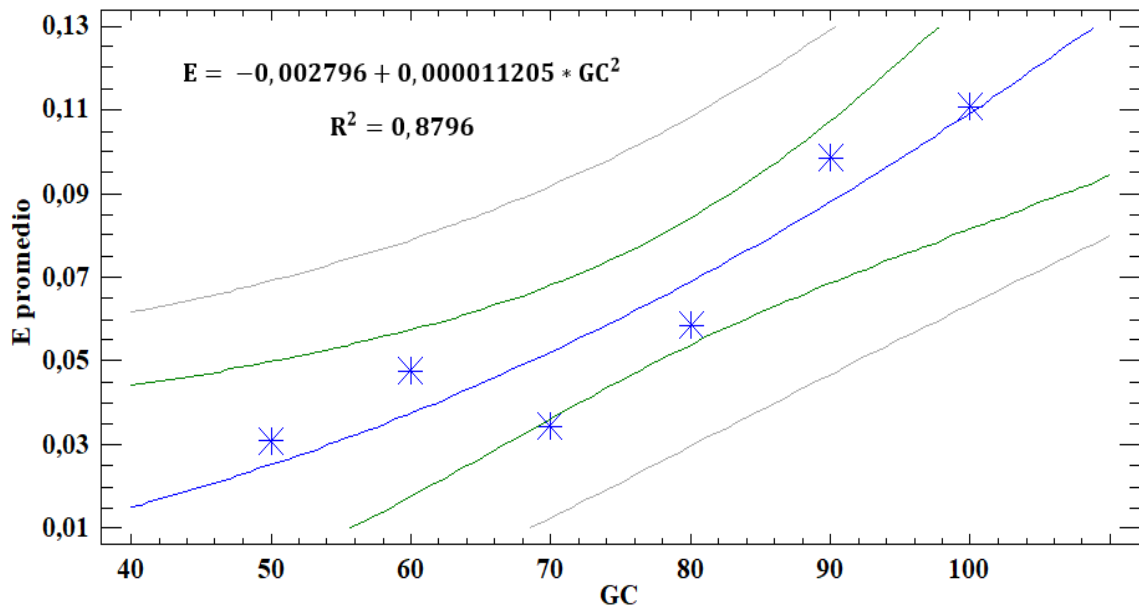
Tabla 4.11 Relación de variables según el coeficiente de correlación

+0,96	1	Perfecta
+0,85	0,95	Fuerte
+0,7	0,84	Significativa
+0,5	0,69	Moderada
+0,2	0,49	Débil
+0,1	0,19	Muy débil
0	0	Nula
-0,1	-0,19	Muy débil
-0,2	-0,49	Débil
-0,5	-0,69	Moderada
-0,7	-0,84	Significativa
-0,85	-0,95	Fuerte
-0,96	-1	Perfecta

Fuente: Prof. Pedro Beltrán

En la figura 4.20 nos muestra el mejor modelo de ajuste “Cuadrado de X” para describir la relación entre el grado de compactación y el módulo de elasticidad.

Figura 4.20 Modelo ajustado del módulo y el GC



Fuente: Software Statgraphics

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En relación a este tema se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se cumplieron con los objetivos planteados en la investigación al ver que a medida que aumenta el grado de compactación en el suelo clasificado como arcillas de media a baja compresibilidad (A-4; A-6; A-7), el módulo de elasticidad llega a aumentar su valor.
- Los valores de densidad in situ obtenidos mediante el ensayo del cono de arena varían de 1,36 gr/cm³ a 1,56 gr/cm³, valores que nos permitió saber el grado de compactación al cual se encuentra la subrasante en su estado natural.
- Se establecieron las curvas con tendencias que permiten visualizar y entender que las cinco muestras para cada rango de grado de compactación pueden variar de acuerdo a su densidad compactada, la cual se obtuvo sin alterar el valor de la densidad máxima obtenido para cada muestra ya que es uno en específico para cada tipo de suelo o muestra.
- También se hizo el análisis de la variación del módulo de elasticidad de acuerdo al contenido de humedad de cada muestra el cual tiene un comportamiento similar al de la densidad o al grado de compactación, ya que, al aumentar el contenido de humedad, aumenta la densidad y aumenta el módulo de elasticidad.
- Se obtuvo la relación existente entre el módulo de elasticidad y la densidad seca de la muestra a la cual estaba compactada, arrojando un dato de $R^2= 0,49$ lo cual nos indica una relación media entre las variables relacionadas.
- Los valores del módulo de elasticidad obtenido para cada una de las curvas varían de 1,65 Kpa como valor mínimo a 19,55 Kpa como valor máximo, los cuales califican al suelo de esta subrasante como A-4; A-6; A-7, mediante los cuales se especifica que trabajamos con arcillas de media a baja compresibilidad de acuerdo a su índice de plasticidad.
- La tendencia de la curva de módulo de elasticidad y el grado de compactación es ascendente, ésta se obtuvo de los valores promedios del módulo y el grado de

compactación porque para cada grado de compactación se realizaron los ensayos a cinco probetas de cada rango.

- Según el análisis de la relación de variables de esta investigación se pudo observar que hay una fuerte relación entre ella de acuerdo al modelo matemático que más se ajusta siendo el cuadrado de X con un 87,96%.

5.2. Recomendaciones

- Tener cuidado en los ensayos de laboratorio para no cometer errores de apreciación, los cuales nos podrían hacer variar los resultados obtenidos y seguir los pasos que están especificados en el manual de laboratorio.
- Se sugiere prestar especial atención en la preparación de las muestras a estudiar, ya que estas son elaboradas en el laboratorio para simular lo que se tiene o se debería tener en campo.
- Durante la realización del ensayo de compresión no confinada se debe tener en cuenta la precisión al lecturar los datos del dial de carga y deformación, ya que actúan al mismo tiempo y sus valores llegan a ser muy sensibles, por lo que una mala lectura significa que los datos van a variar mucho.
- Consideraciones al momento de realizar el ensayo in situ, ya que éste se usó para ver con cuánto de grado de compactación se encuentra la subrasante en ese tramo.