

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

I. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES.

Prácticamente todas las estructuras de la ingeniería civil deben cimentarse sobre la superficie del suelo o dentro de él. Estas estructuras transmiten las cargas al terreno por medio de cimentaciones adecuadas. Dependiendo de las características del suelo es que se opta por cimentaciones superficiales. En la solución de un sistema de cimentaciones, el principal problema a enfrentar es evitar que se produzcan asentamientos de gran magnitud que puedan dañar la estructura de manera que dificulte o afecte sus funciones.

Puesto que el límite líquido está relacionado con la cantidad de agua atraída por las partículas de arcilla, y ésta a su vez, con la cantidad de espacios intersticiales de una masa de suelo saturado, que tienen que ver con su capacidad para comprimirse, es posible encontrar alguna correlación entre el límite líquido y el índice de compresibilidad del suelo. Algunos autores han presentado varias ecuaciones para determinar el índice de compresión basándose en dichas correlaciones (Skempton, 1944; Terzaghi y Peck, 1967; Lambe y Whitman 1969; Mayne 1980). Otros autores han obtenido ecuaciones empíricas que proporcionan un valor aproximado del índice de compresibilidad en términos del contenido de agua o la relación de vacíos, y constantes derivadas de datos experimentales.

La capacidad de deformación de un suelo está en función de las propiedades esfuerzo-deformación-tiempo, estas propiedades se estudian por medio de la prueba de consolidación. Terzaghi fue uno de los primeros en estudiar el fenómeno de consolidación en suelos finos saturados y desarrolló la teoría conocida como teoría de la consolidación unidimensional que es en la actualidad una de las más aplicadas para resolver el problema de compresibilidad en suelos finos saturados. Este ensayo proporciona información sobre la compresibilidad y deformación del suelo, y permite determinar la magnitud y el tiempo en que se presentarán asentamientos en el suelo, esto en condiciones unidimensionales.

La presente investigación pretende establecer correlaciones entre el índice de compresión y las características plásticas de las arcillas, para lo cual se realizarán ensayos de consolidación con carga incremental y las determinaciones del límite líquido y límite plástico de las muestras extraídas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.2.1 Situación Problemática.

Fundamentalmente la contracción de las arcillas se debe al fenómeno cíclico asociado a los cambios climáticos o estacionales los cuales inducen movimientos y sus consecuentes daños a las estructuras, esta alta capacidad de contraerse y expandirse se presenta en las arcillas que tiene alto contenido de mineral montmorillonita.

En la ciudad de Tarija predomina la existencia de suelos arcillosos en diferentes zonas principalmente en lugares destinados al crecimiento poblacional, como por lo que este material nos ocasiona problemas de colapso en este tipo de suelos debido a las diferentes cargas proporcionadas por las estructuras las que este suelo debe resistir.

El fenómeno que produce un cambio de volúmenes es debido a que los granos de arcilla sufren un reacomodo radical de las partículas y por consecuencia una pérdida de volúmenes, esto muchas veces es causado por un incremento en la carga, otra causa que se presenta es la succión capilar, la cual mantiene juntos los granos de arcilla.

En muchos de los estudios que han presentado correlaciones entre el índice de compresión y las características plásticas de los suelos, pero al abordar su comportamiento en la ciudad de Tarija las correlaciones existentes no describen su comportamiento.

1.2.2 Problema.

¿Se podrá disminuir el tiempo en determinación del índice de compresión de los suelos arcillosos en función de la obtención de la correlación del índice de compresión y las características plásticas de los suelos?

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo general.

- Determinar una correlación para obtener el índice de compresión en función a la plasticidad de los suelos mediante ensayos de consolidación y límites de ATTERBERG, de tal manera que sirva de base para definir de una forma más rápida dicho índice de compresión y la posterior aplicación, en la construcción de edificaciones.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar las arcillas estudiadas, mediante ensayos de granulometría, peso específico y límites de atterberg, para su posterior correlación con el índice de compresión.
- Realizar pruebas de consolidación unidireccional de las arcillas inalteradas y remoldeado para la determinación del índice de compresión.
- A partir de los resultados obtenidos de plasticidad e índice de compresión y establecer una manera rápida para obtener con precisión el índice de compresión en base a la plasticidad para el uso en el diseño y construcción de obras civiles.
- A partir de los resultados obtenidos de las correlaciones, determinar el índice de compresión de las arcillas y compararlas con las ecuaciones de distintos autores.

1.4 HIPÓTESIS.

A partir de los resultados obtenidos mediante las características plásticas de las arcillas, podemos estimar valores del índice de compresión de manera rápida y óptima, en base a una correlación entre estos ensayos, lo cual servirá como antecedente para el diseño de construcción de obras civiles y así predecir la magnitud de los asentamientos que desarrollan las estructuras cimentadas en suelos arcillosos.

1.5 VARIABLES.

- **independiente:**

Límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad.

- **dependiente:**

Estudio de la consolidación para la determinación del índice de compresión.

1.6 DISEÑO METODOLÓGICO.

Unidades de estudio y diseño muestral

Unidades de estudio

En la presente investigación se obtendrá mediante la consolidación de los suelos, el índice de compresión de la arcilla y la correlación con los límites de atterberg.

Población

Los suelos arcillosos, se extraerán el material que tenga las características específicas que requiere la investigación a realizarse.

Muestra

Serán suelos de tipo fino, se definieran 30 tipos de suelo fino que serán extraídos de distintos puntos de la ciudad de Tarija, en los cuales exista mayor cantidad de suelos arcillosos.

Muestreo

Se procederá a la identificación de una zona que tenga la presencia de suelo arcilloso y posteriormente a la extracción de la muestra.

1.7 ALCANCE.

Las muestras de suelos tomadas de la ciudad de Tarija serán suelos plásticos, en lo que concierne a la clasificación del suelo serán los establecidos por la AASHTO.

La investigación se basará en ensayos de laboratorio, tanto de la caracterización de las arcillas como el ensayo de consolidación de muestras inalteradas y remoldeadas pertenecientes a suelos finos.

Para el ensayo de caracterización de suelos arcillosos se realizarán 30 pruebas para los suelos extraídos de distintos barrios en crecimiento de la ciudad de Tarija, los cuales tendrán las mismas características para el ensayo de consolidación.

Con los resultados obtenidos de la caracterización de las arcillas y el ensayo de consolidación se determinará una correlación entre la variable independiente y dependiente en función al mejor ajuste entre ellas.

En este trabajo se presentan los resultados de la caracterización de las arcillas en estudio y las gráficas de consolidación y de compresibilidad obtenida, y así como las gráficas de las diferentes correlaciones obtenidas en la investigación.

CAPÍTULO II

**GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS Y LA
CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS**

CAPÍTULO II

GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS Y LA CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS

2.1 Generalidades de las arcillas.

2.1.1 Introducción.

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste de un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 0.002 mm, y que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 0,002mm).
- Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 0,002mm.
- Para un ceramista una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica. Desde el punto de vista económico las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones.

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 0,002 mm. Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños,

incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan los 0,002 mm.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

2.1.2 Propiedades físico-químicas.

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 0,002 mm).
- Su morfología laminar (filosilicatos).
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

2.1.2.1 Superficie específica.

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que ésta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

2.1.2.2 Capacidad de intercambio catiónico.

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.

2.1.2.3 Capacidad de absorción.

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminares (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

2.1.2.4 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

2.1.2.5 Plasticidad.

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, et al., 1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

2.1.2.6 Tixotropía.

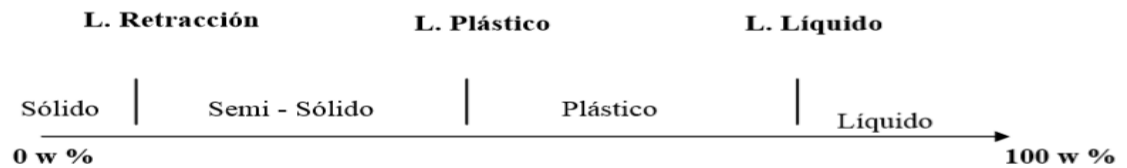
La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

2.2 Límites de atterberg.

2.2.1 Generalidades.

Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan. Así, un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso (ver Fig.1.10). La arcilla, por ejemplo, si está seca se encuentra muy suelta o en terrones, añadiendo agua adquiere una consistencia similar a una pasta, y añadiendo más agua adquiere una consistencia fluida.

Figura 1.1) Límites de Atterberg.



Fuente: Manual de ensayos de suelos.

El contenido de agua con que se produce el cambio entre estados varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad). Se trata de la propiedad que presentan los suelos hasta cierto límite.

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por el científico sueco Albert Atterberg en el año 1911. Los límites de Atterberg son propiedades, valores de humedad de los suelos que se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

2.2.2 Utilización práctica de los límites de atterberg.

En la actualidad, los límites de Atterberg son las determinaciones que con más asiduidad se practican en los laboratorios de Mecánica del Suelo. Su utilidad deriva de que, gracias a la experiencia acumulada en miles de determinaciones, es suficiente conocer sus valores para poderse dar una idea bastante clara del tipo de suelo y sus

propiedades. Como, por otra parte, se trata de determinaciones sencillas y rápidas, permiten una pronta identificación de los suelos y la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos más complicados.

Los límites de Atterberg pertenecen, junto al análisis granulométrico, al tipo de ensayos de identificación. Pero, si el análisis granulométrico nos permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, los límites de Atterberg nos indican su calidad, completando así el conocimiento del suelo. Frecuentemente se utilizan los límites directamente en las especificaciones para controlar los suelos a utilizar en terraplenes.

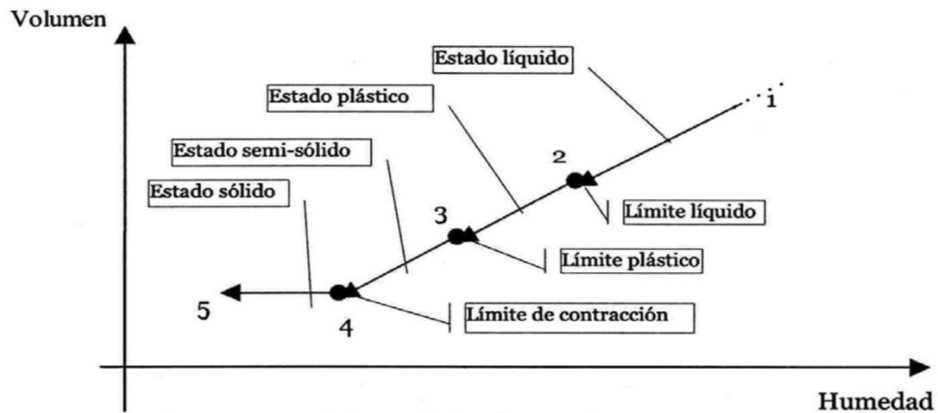
Debe tenerse en cuenta, no obstante, que todos los límites e índices, a excepción del límite de retracción, se determinan en suelos que han sido amasados para formar una mezcla uniforme suelo-agua. Este proceso de amasado conduce al ablandamiento de la masa como consecuencia de la destrucción del ordenamiento de las moléculas bipolares de agua, a la reorientación de las láminas de arcilla y a la ruptura de la estructura que el suelo adquiere durante su formación por sedimentación o consolidación. Al cesar el proceso de amasado, las láminas de arcilla vuelven a orientarse y las moléculas de agua adquieren ligazón, pero la estructura del suelo no vuelve a ser la misma. Por tanto, habrá que señalar que los límites no dan indicación alguna sobre la estructura del suelo o de los enlaces residuales entre partículas que pudieran haberse desarrollado en el terreno natural.

2.2.3 Plasticidad y límites de consistencia.

Albert Atterberg definió como plasticidad la capacidad que tenía un suelo de ser deformado sin agrietarse, ni producir rebote elástico. A su vez observó que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, que los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos duros con el secado, y que las arenas son desmenuzables en condiciones sueltas y secas. También observó que existían arcillas altamente plásticas y otras de baja plasticidad.

Los límites establecidos por Atterberg para diferenciar los distintos estados de consistencia se deben obtener a partir de la fracción que pasa por el tamiz N° 40, descartando la porción retenida.

Figura 1.2). Trayectoria humedad-volumen de un suelo amasado.



Fuente: Manual de ensayos de suelos.

La frontera entre el estado sólido y semisólido se llama límite de contracción o de retracción y se define como la humedad presente al haber añadido agua suficiente para llenar todos los huecos de una pastilla de suelo seca. Se trata de la humedad máxima de un suelo para la cual una pérdida de humedad no causa disminución de volumen de suelo. La frontera entre los estados semisólido y plástico se llama límite plástico, y se obtiene midiendo el contenido de humedad del suelo cuando comienzan a agrietarse pequeños cilindros de suelo de 3 mm de diámetro. A la frontera entre el límite plástico y líquido se le llama límite líquido y se determina midiendo la humedad que contiene el suelo cuando con 25 golpes se cierra una ranura de 13 mm de longitud mediante un aparato normalizado.

Atterberg encontró que la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, denominado índice de plasticidad (IP), representaba una medida satisfactoria del grado de plasticidad de un suelo. Luego sugirió que estos dos límites sirvieran de base en la clasificación de los suelos plásticos. Acorde al valor del índice de plasticidad, distinguió los siguientes materiales.

- Suelos desmenuzables ($IP < 1$)
- Suelos débilmente plásticos ($1 < IP < 7$)
- Suelos medianamente plásticos ($7 < IP < 15$)

- Suelos altamente plásticos (IP>15)

Todos los límites se expresan en porcentaje de agua contenida sobre suelo seco.

2.2.4 Límite líquido.

El Límite Líquido (LL) es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado líquido. En este estado la mezcla se comporta como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso. Por debajo de este contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado plástico. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LL produce un cambio en el volumen del suelo.

2.2.5 Límite plástico.

El Límite Plástico LP es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico. En este estado la mezcla se deforma a cualquier forma bajo ligera presión. Por debajo de este contenido de humedad la mezcla está en un estado semi - sólido. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LP produce un cambio en el volumen del suelo.

2.2.6 Índice de plasticidad.

Atterberg definió el índice de plasticidad para describir el rango de contenido de humedad natural sobre el cual el suelo era plástico. El índice de plasticidad IP, es por tanto numéricamente igual a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

2.3 Contenido de humedad.

El contenido de agua de un suelo o contenido de humedad es la relación entre el agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida, y se expresa en forma de porcentaje.

Este puede variar entre 0 e ∞ dependiendo de las condiciones de humedad del sitio donde se localice el suelo. (Juárez, Rico, 2004 p.54) La cantidad de agua se obtiene mediante la diferencia de peso entre el suelo en estado natural y el suelo secado en horno. La relación que expresa la humedad de un suelo es la siguiente.

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Dónde: W_w = Peso del agua

W_s = Peso del suelos seco

2.4 Método de secado de horno.

Este es el método más preciso para obtener el grado de humedad en porcentaje, y consiste en introducir en el horno eléctrico una muestra representativa del suelo en un recipiente de aluminio previamente pesado, al igual que el conjunto (recipiente + suelo). El tiempo de exposición en el horno es de 16 horas, luego del cual se retira el conjunto y se pesa nuevamente para realizar los cálculos.

2.5 Análisis granulométrico.

Su finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Así es posible también su clasificación mediante sistemas como AASHTO o USCS. El ensayo es importante, ya que gran parte de los criterios de aceptación de suelos para ser utilizados en bases o sub-bases de carreteras, presas de tierra o diques, drenajes, etc., depende de este análisis.

Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente.

2.6 Clasificación de suelos.

Los suelos se suelen clasificar según su tamaño para los efectos de la ingeniería de suelos, para esto, existen varias normas. La dada en Norteamérica por la AASHTO (American Association of State Highway Officials) clasifica los suelos en dos grandes grupos según que pase menos del 35% por el tamiz #200 ASTM (200 mallas por pulgada lineal, 0.074 mm de longitud) o que pase más del 35% por el citado tamiz. En la primera clasificación entran los materiales granulares y en la segunda los limos y arcillas. A su vez estos dos grandes grupos se dividen en otros, según el tanto por ciento que pasa por otros tamices.

No obstante, para los trabajos de campo los suelos se clasifican en cinco grupos que son los que frecuentemente se emplean para describir el material, éstos son rocas, gravas, arenas, limos y arcillas.

2.7 Sistema unificado de clasificación de los suelos (S.U.C.S.).

Este sistema fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en 1942 para aeropuertos.

Los suelos de partículas gruesas y los suelos de partículas finas se distinguen mediante el cernido del material por el tamiz #200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en esa malla y los finos a los que la pasan, y así un suelo se considera grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz #200 y fino si más del 50% son menores que dicho tamiz.

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y de un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos (grava, arena limo arcilla suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos representan subdivisiones en dichos grupos.

2.8 Sistema de clasificación de la AASHTO.

El sistema de clasificación de la AASHTO utiliza un índice de grupo para comparar diferentes suelos en un mismo grupo. El índice de grupo se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$IG = 0.2 * a * 0.005 ac + 0.01 bd$$

Donde:

a = porcentaje de material más fino que el tamiz #200, mayor que el 35% pero menor que el 75%, expresado como un número entero positivo ($1 < a < 40$).

b = porcentaje que pasa el tamiz #200, mayor que el 15% pero menor que el 55%, expresado como un número entero positivo ($1 < b < 40$).

c = porción de límite líquido mayor que 40, pero menor que 60, expresado como un número positivo entero ($1 < c < 20$).

d = porción del índice de plasticidad mayor que 10, pero menor a 30, expresado como un número positivo entero ($1 < d < 20$).

El índice encontrado de esa forma se redondea al entero siguiente y se reemplaza entre paréntesis después del número de clasificación correspondiente.

2.9 Introducción de la consolidación.

El estudio de la consolidación de los suelos en Ingeniería Civil es un problema natural de los suelos finos, como arcillas y limos. Para toda edificación que se localice en suelos de este tipo se requiere del estudio de las propiedades geotécnicas de los suelos y así poder estimar los asentamientos totales y diferenciales que presentará la estructura.

Para evaluar la deformación y la resistencia de dichos suelos se debe investigar sus propiedades físicas y mecánicas, pues son las que rigen su comportamiento y con ello hacer predicciones de los asentamientos que se producirán en los estratos del suelo cuando estos son sometidos a incrementos de esfuerzos por la aplicación de una carga.

El fenómeno de consolidación ha sido estudiado por diferentes investigadores en el área de la ingeniería, uno de los primeros en hacerlo fue Karl Terzaghi, enfocado en suelos finos saturados desarrolló la teoría de consolidación unidimensional, actualmente la más aplicada para cálculo de asentamientos. El objetivo principal de las pruebas de consolidación es obtener la información sobre la compresibilidad de los suelos, determinar con ellos los parámetros que expresen la deformabilidad, sus coeficientes de consolidación y de cambio volumétrico.

Para aquéllos que trabajan en el desarrollo de pruebas de consolidación ha sido necesaria la modificación del equipo utilizado por Terzaghi para las pruebas de consolidación, los equipos han sido mejorados con procesos de instrumentación, en algunos casos mediciones automáticas, automatización y semiautomatización de los mismos. Actualmente se cuenta con múltiples equipos utilizados para este fin. Dependiendo a la necesidad de los resultados que se requieren es el equipo a utilizar.

2.10 Compresibilidad.

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está compuesta por partículas minerales, las cuales forman el esqueleto del suelo. Esta estructura forma oquedades que son ocupadas por las fases líquida y gaseosa.

La compresión de los suelos se da principalmente como una función de la reducción de su volumen de oquedades, debido a un incremento del esfuerzo efectivo en la estructura del suelo, que generalmente se da por una sobrecarga.

Todos los suelos experimentan deformación a consecuencia de un cambio en las condiciones de esfuerzo. Si las oquedades del suelo están en su totalidad llenas de agua, es decir, si se trata de un suelo saturado, la compresión del suelo se dará como resultado del escape del agua contenida en las oquedades. La compresión gradual de un suelo bajo tales condiciones, cuando actúan sobre él fuerzas gravitatorias tales como las producidas por la misma deposición de los estratos o las estructuras levantadas sobre el suelo, se llama consolidación.

Por lo tanto, la compresibilidad del suelo se debe a la facilidad con la que los granos cambian de posición debido al tipo y rigidez de la estructura del suelo; entendiéndose que la estructura del suelo se define, no sólo como el arreglo geométrico de sus componentes, sino como el enlace entre las partículas.

2.11 Consolidación.

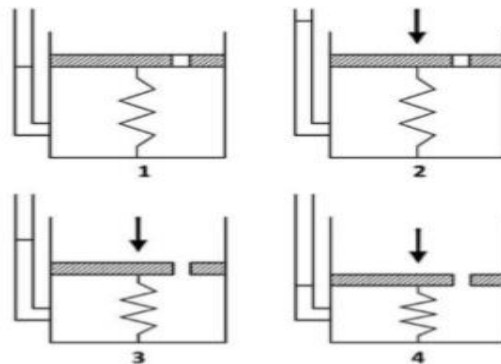
El fenómeno de consolidación en los suelos ha sido ampliamente estudiado, se ha establecido que bajo la acción de una carga, la mayor parte de los materiales sufren una deformación cuya magnitud depende de la dimensión de la carga aplicada, de las propiedades del material y del tiempo.

El ingeniero Terzaghi estableció en 1925 la ecuación diferencial de consolidación, publicada en su *Erdbaumechanik*, análoga a la empleada en la teoría de la transmisión de calor, siendo el primero en hacerlo. Sin embargo, se tiene antecedentes de que el problema de consolidación ya había sido planteado anteriormente, el mismo Terzaghi mencionaba en su trabajo *Theorie der Setzungen Von Tonschichte*, que en 1856 Tynall había planteado el proceso de consolidación en sus *Fragments of Science*. Dimitri cita

en 1947 varios casos en donde ya se vislumbraban los problemas relacionados al proceso de consolidación, entre ellos menciona que en 1898 Sooy Smith describe no sólo la expulsión de agua de la arcilla en el proceso de consolidación, que causó los asentamientos en algunas zonas de la ciudad de Chicago, sino también el proceso denominado actualmente como consolidación secundaria. Para 1920 Allen Hazen trata el tema de consolidación en su trabajo sobre presas en la American Society of Civil Engineers.

El proceso de disminución de volumen en un tiempo, producido por la acción de una carga, se origina cuando el agua existente en los poros absorbe parte de la carga a la que es sometida el estrato de suelo, pero con el transcurso del tiempo será expulsada y el suelo irá absorbiendo esa carga paulatinamente, teniendo así que el cambio de volumen en la masa de suelo es igual al volumen de agua drenada.

Figura 1.3 Modelo mecánico de Terzaghi.



Fuente: Juárez, 1976, modificado.

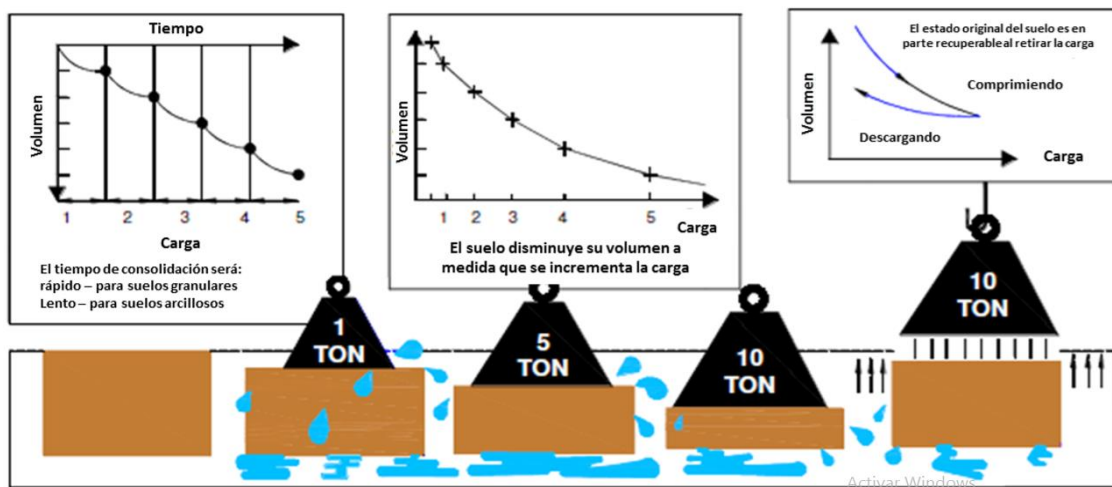
Para explicar lo anterior Terzaghi utilizó un modelo mecánico (fig. 1.3) en el cual considera un cilindro provisto de un pistón perforado apoyado sobre resortes elásticos, el cilindro está completamente lleno de un fluido que se supone incompresible. Si se aplica sobre el pistón una carga, éste tenderá a descender, al permitir que el fluido salga por el orificio, los resortes se contraen hasta que el émbolo se detiene, con esto se observa que al momento de aplicar la carga, ésta es soportada por el fluido y luego existe una transferencia gradual de carga del fluido al resorte. En este modelo puede

suponerse que los resortes y el fluido corresponden a las partículas de arcilla y al agua de los vacíos, respectivamente.

La reducción de volumen que se presenta en los suelos se debe a un cambio en los vacíos de la estructura que provoca un desplazamiento relativo entre granos del suelo, los cuales son forzados a ocupar posiciones estables, haciendo al material más compacto. Así la deformabilidad del suelo se debe a la facilidad con la que los granos cambian de posición, también por el tipo de rigidez de la estructura del suelo.

En suelos granulares, la reducción del volumen de vacíos se produce casi instantáneamente cuando se aplica la carga. En cambio, en suelos arcillosos toma mayor tiempo, dependiendo de factores como el grado de saturación, el coeficiente de permeabilidad, la longitud de la trayectoria que tenga que recorrer el fluido expulsado, las condiciones de drenaje y la magnitud de la sobrecarga (fig. 1.4).

Figura 1.4 Esquema de consolidación en campo.



Fuente: Head, 1986.

El desarrollo de la teoría de consolidación unidimensional de Terzaghi se basó en las siguientes hipótesis (Terzaghi, 1923):

- La muestra de suelo está saturada, es homogénea e isótropa.
- Los estratos de suelo en el campo se encuentran confinados lateralmente.

- El agua y los granos que forman el suelo son incompresibles.
- El peso del suelo no se toma en cuenta.
- La comprensión del suelo y la trayectoria del drenaje del agua son unidimensionales.
- El incremento de carga se aplica instantáneamente.
- La presión aplicada es uniforme en un plano horizontal. Al inicio el exceso de presión hidrostática es uniforme en todo el suelo.
- El agua que se expulsa es exclusivamente agua gravitacional (agua libre) que sale de los poros de la estructura del suelo, y por lo tanto la Ley de Darcy es válida.
- El cambio de oquedad tiende a un valor límite.
- Existe una relación lineal entre la presión aplicada y el cambio en la relación de vacíos, la cual también se aproxima a un valor finito.
- Los coeficientes de permeabilidad y compresibilidad del suelo permanecen constantes para un incremento de presión determinado.

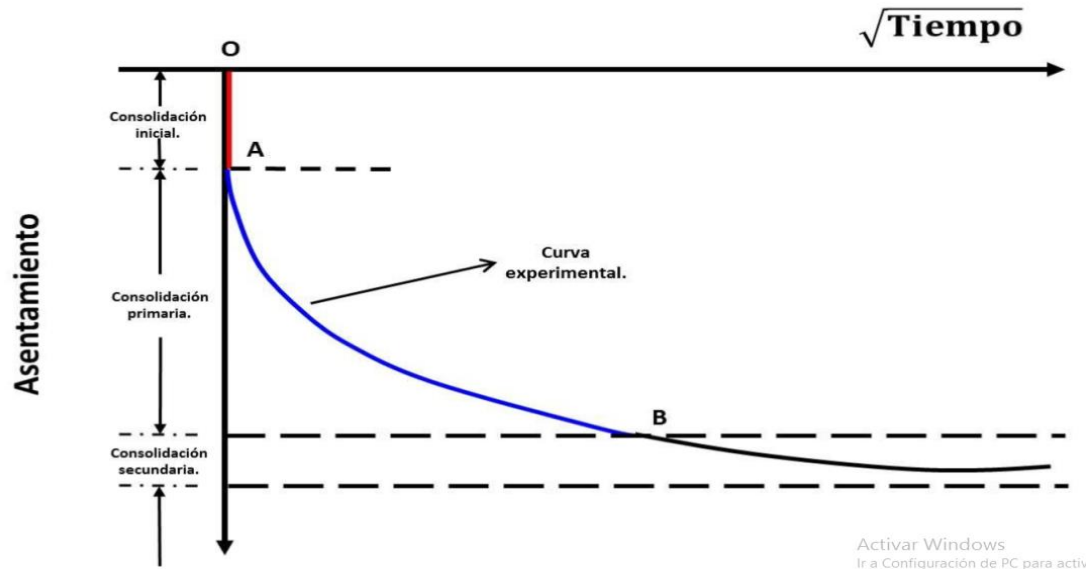
Debido a las diferencias de los resultados obtenidos con la teoría de Terzaghi y las reales obtenidas en el laboratorio, surgieron nuevas investigaciones que desarrollaron modelos en los que se considera la influencia del tiempo en el proceso de consolidación, y toman en cuenta variables como la relación de vacíos, el esfuerzo efectivo y la variación de estos últimos parámetros en el tiempo. En 1940, Taylor y Merchant desarrollaron uno de estos modelos, pero en 1942 Taylor lo mejoró y definió el proceso de consolidación como una única relación entre el esfuerzo efectivo vertical, la relación de vacíos y la razón de cambio de vacíos con el tiempo [Leroueil, 1985 (Citado por Hidalgo, 2007)].

2.12 Parámetros de compresibilidad.

La consolidación es el proceso de compresión de un suelo en función del tiempo y en el caso de suelos arcillosos da como resultado la transformación progresiva de un sedimento en estado suave o blando a un estrato de arcilla dura y finalmente a una roca sedimentaria.

Todos los suelos experimentan deformación a consecuencia de un cambio en las condiciones de esfuerzo. Si las oquedades del suelo están en su totalidad llenas de agua, es decir, si se trata de un suelo saturado, la compresión del suelo se dará como resultado del escape del agua contenido en las oquedades.

Figura 1.5 Curva de consolidación.



Fuente: Barnes 2000.

Las características más importantes de compresibilidad de un suelo son el índice de compresibilidad y el coeficiente de consolidación. Estos parámetros se suelen determinar a partir de pruebas en laboratorio, para tal efecto Terzaghi creó un dispositivo llamado edómetro.

En este equipo se prueba una probeta de suelo a través de la aplicación de diversos incrementos, registrando en cada uno de ellos la evolución de las deformaciones con el tiempo. Para cada incremento de esfuerzo se obtiene una gráfica con la evolución de la deformación con respecto del tiempo. Estas gráficas se conocen como curvas de consolidación (fig. 1.5), y son básicas para determinar los parámetros de compresibilidad del suelo.

Las curvas obtenidas de un ensaye de consolidación se presentan como la evolución del asentamiento contra el tiempo y de la relación de vacíos e contra la presión en escala logarítmica, o la deformación contra la presión en escala logarítmica. Algunas veces se utiliza un gráfico de e contra p , en lugar de los gráficos semilogarítmicos. Dichas gráficas muestran las siguientes tres etapas:

- Etapa I: Compresión inicial, causada principalmente por la precarga.
- Etapa II: Consolidación primaria, durante la cual el exceso de presión de poro es gradualmente transferido al esqueleto sólido por la expulsión del agua de los poros.
- Etapa III: Consolidación secundaria, ocurre después de la disipación total del exceso de presión de poro. Es cuando alguna deformación del espécimen tiene lugar debido al reajuste plástico de la estructura del suelo.

Cada incremento de esfuerzos produce una deformación vertical en la muestra de suelo, representando una reducción en el volumen de vacíos del material, después de haber aplicado una serie escalonada de esfuerzos se obtiene, finalmente, la curva de compresibilidad (fig.1.6).

Cuando la presión total aplicada sobre la muestra es mayor que la presión efectiva máxima a la que ha sido sometida en el pasado, el cambio en la relación de vacíos es mucho mayor y la relación $e - \log(\sigma')$ es prácticamente lineal, con una pendiente más inclinada. En la curva de compresibilidad podemos observar dos tramos con diferente comportamiento, los cuales están definidos con base en la historia de esfuerzos que tiene la muestra de suelo, el comportamiento de estos tramos en la curva se describen a continuación:

- Preconsolidación: el tramo AB en la figura 1.4 define esta etapa. A través de la curva se establece el esfuerzo de preconsolidación (esfuerzo máximo que ha soportado el suelo en estudio, en toda su historia geológica.), que representa la transición entre la consolidación estructurada (recompresión) y desestructurada del suelo. Con el esfuerzo de preconsolidación, se puede definir la relación de preconsolidación (OCR) para un suelo con:

$$OCR = \frac{\sigma'_{pc}}{\sigma'_v}$$

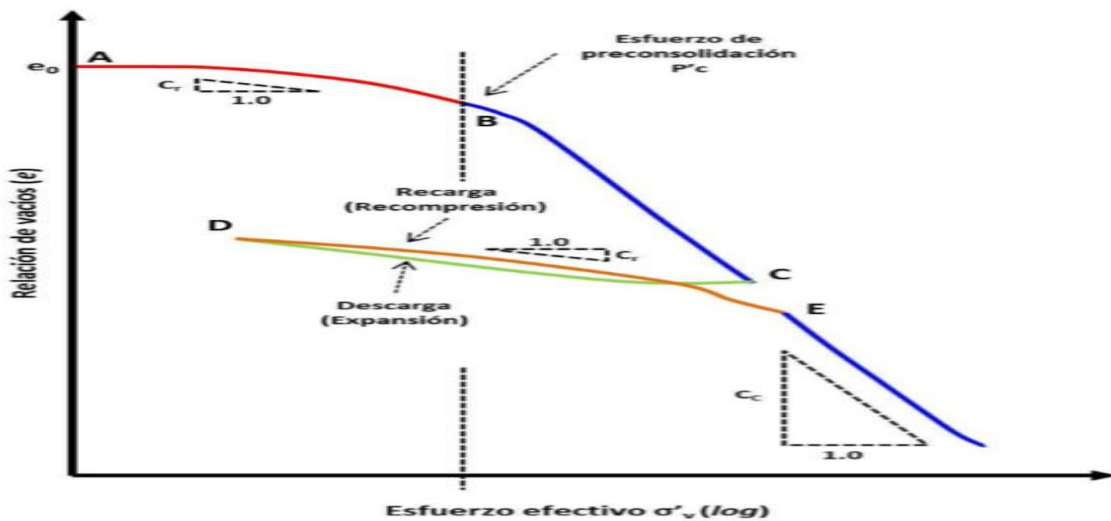
Donde:

σ'_{pc} = Presión de preconsolidación de un espécimen.

σ'_v = Presión vertical efectiva presente.

- Normalmente consolidado: es la presión de sobrecarga efectiva presente en el suelo; es decir, teóricamente el suelo nunca ha sufrido esfuerzos efectivos superiores a los que tiene en el momento de estudio. El tramo BC en la figura 1.4 define esta etapa, una línea recta con una pendiente abrupta denominada índice de compresión (CC).

Figura 1.6). Curva de compresibilidad: Relación de vacíos vs logaritmo del esfuerzo efectivo



Fuente: al-Khafaje, 1992.

Las gráficas de consolidación y compresibilidad cumplen un papel muy importante, ya que a partir de ellas se determinan diversos parámetros, los cuales permiten predecir la velocidad y la magnitud de los asentamientos que desarrollan las estructuras cimentadas en suelos cohesivos. A continuación se presenta la definición y ecuaciones utilizadas para obtener dichos parámetros.

- Coeficiente de compresibilidad (a_v). Expresa la variación de la relación de vacíos con el esfuerzo aplicado.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v}$$

- Coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v). Se define como el cambio de volumen por unidad de incremento de esfuerzo efectivo. Las unidades de m_v son inversas a la presión [cm²/kg] y el cambio de volumen puede expresarse en términos del cambio de relación de vacíos o del espesor de volumen.

$$m_v = \frac{1}{1 + e_0} \left(\frac{e_0 - e_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0} \right)$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0}$$

- Coeficiente de consolidación (c_v). Indica la rapidez con la que se disipa la presión de poro una vez aplicado el incremento de carga (Flores, 2009). El coeficiente de consolidación generalmente disminuye conforme el límite líquido aumenta. Además depende de la permeabilidad k y de la compresibilidad volumétrica del suelo.

Para un incremento de carga dado sobre un espécimen, existen dos métodos gráficos comúnmente usados para determinar c_v a partir de pruebas de consolidación unidimensional de laboratorio. Uno de ellos es el método del tiempo en escala logarítmica propuesto por Casagrande y Fadum en 1940, y el otro es el método de la raíz cuadrada del tiempo sugerido por Taylor en 1942. Para el cálculo del coeficiente de consolidación en cada incremento de carga, se utiliza la siguiente expresión:

$$C_v = \frac{T \cdot H^2}{t}$$

Donde:

C_v = Coeficiente de consolidación.

T = Es el factor tiempo cuyo valor para el 50% de la consolidación primaria es de 0.197 y para el 90 % es de 0.848.

H = Longitud del máximo camino de drenaje (espesor del estrato) durante un incremento de esfuerzo. Si la muestra es doblemente drenada, el valor de H será la mitad del espesor del estrato.

t = Tiempo para el correspondiente factor de tiempo, obtenido de la curva de consolidación.

- Índice de compresión (CC). Expresa la variación lineal del índice de vacíos con respecto al logaritmo de los esfuerzos aplicados, para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_{0+1}}{\sigma_0}\right)} = \frac{-(e_2 - e_1)}{\log(\sigma'_2) - \log(\sigma'_1)} = \frac{e_1 - e_2}{\log\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)}$$

Donde:

e_1 = Relación de vacíos para un estado determinado.

σ_1 = Esfuerzo inicial antes de aplicar el incremento.

Debido al tiempo que lleva realizar una prueba de consolidación, se han establecido relaciones empíricas para realizar un cálculo aproximado de la consolidación primaria en campo, tema que se describirá más adelante.

- Índice de compresión secundaria (C_α). Después de la disipación total del exceso de presión de poro, se observa asentamiento debido al ajuste plástico de la estructura del suelo. A este tipo de compresión se le conoce como consolidación secundaria (véase figura 1.5). El índice de compresión secundaria se define como:

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log \left(\frac{t_2}{t_1} \right)}$$

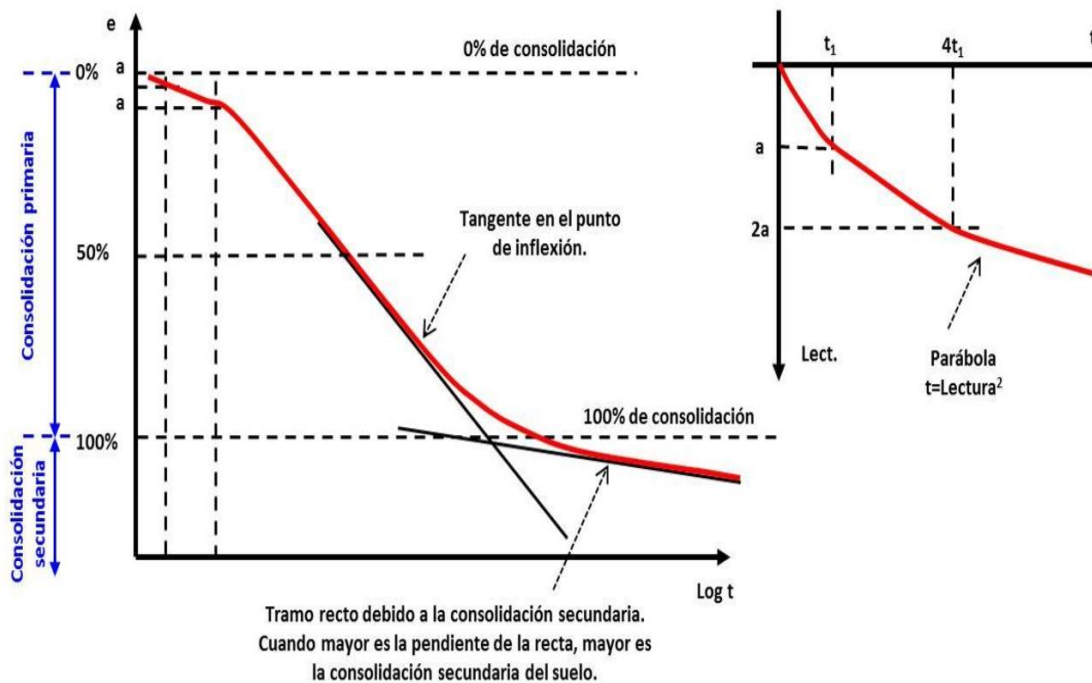
Donde:

C_{α} = Índice de compresión

Δe = Cambio en la relación de vacíos.

t_1, t_2 = Tiempo 1 y 2 definidos.

Figura 1.7 Determinación del tipo de consolidación y el coeficiente de consolidación secundaria



Fuente: Leoni, 2008.

- Índice de expansión (C_s). El índice de expansión se define a través de la rama de descarga, es apreciablemente menor en magnitud que el índice de compresión, y generalmente se determina por pruebas de laboratorio. En la mayoría de los casos:

$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ a } \frac{1}{10} C_c$$

El valor del índice de expansión es de $\frac{1}{5}$ a $\frac{1}{10}$ del índice de compresión. La determinación del índice de expansión es importante en la estimación del asentamiento por consolidación de arcillas sobre consolidadas.

- Coeficiente de permeabilidad (k). La permeabilidad en los suelos cohesivos se calcula a partir de los resultados del ensayo de consolidación con la ecuación 1.9. Debe tomarse en cuenta que el valor de m_v es variable, según el nivel de esfuerzos que se imponga al suelo, y por lo tanto varía el coeficiente de conductividad hidráulica o permeabilidad.

$$k = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w$$

2.13 Equipo para pruebas de consolidación unidimensional.

El interés por el estudio de la consolidación en suelos ha permitido la creación de diferentes instrumentos donde se realizan pruebas de consolidación en suelos cohesivos. De acuerdo con Skempton (1960) citado en Rowe 1966, la primera celda de consolidación fue usada en 1910, en la cual se ensayaban muestras de 2'' de espesor y 14'' de diámetro, colocadas en un contenedor metálico con una base perforada, aplicándoles cargas a través de un pistón.

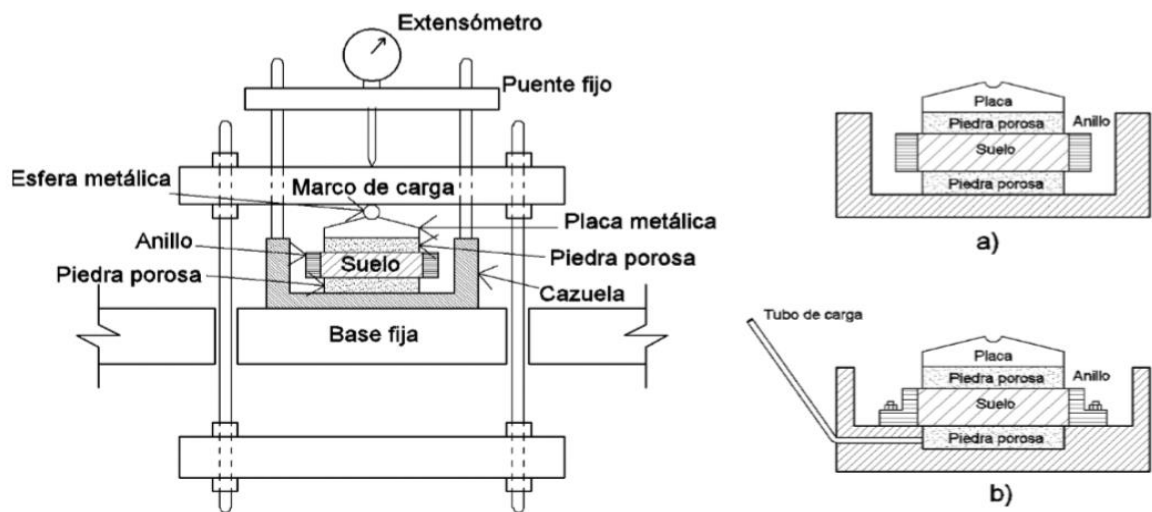
Posteriormente, en 1919 Terzaghi diseñó una celda de drenaje, que tenía como primer propósito estudiar el endurecimiento que sufrían algunas arcillas muy compactas cuando estaban expuestas a la intemperie. A este equipo se le llamó edómetro, ahora mayormente denominado consolidómetro (Figura 1.8).

El ensayo de consolidación convencional, basado en la teoría de consolidación propuesta por Terzaghi es uno de los ensayos de laboratorio más utilizado, ha sido llevado a la práctica cerca de 60 años. Una prueba de consolidación consiste en aplicar unos escalones de carga sucesivamente crecientes hasta llegar a un máximo, a partir

del cual se descarga nuevamente escalonadamente, para cada incremento de carga se obtiene la curva de consolidación con las cuales se obtiene la curva deformación – tiempo, a partir de la cual se pueden obtener los parámetros del modelo teórico de consolidación unidimensional.

Las pruebas de consolidación realizadas en este equipo consisten en comprimir verticalmente una muestra cilíndrica de suelo, con un programa de cargas definido previo a la prueba. Los ejemplares son generalmente de $3 \frac{1}{4}$ ” de diámetro y $\frac{3}{4}$ ” de espesor. La muestra de suelo es confinada en un anillo de metal rígido entre dos piedras porosas ubicadas en la parte superior e inferior de la muestra. Con este arreglo se impide la deformación lateral y se permiten únicamente deformaciones verticales (unidimensional). De esta forma, se tiene que la deformación impuesta por el edómetro es un caso especial de compresión combinada con distorsión cortante, donde la deformación lateral es impedida. La carga a la que se somete la muestra es aplicada uniformemente en toda el área de la muestra y transmitida a través de un brazo de palanca, y la compresión es medida por un indicador micrométrico. La muestra de suelo se mantiene bajo el agua durante la prueba que tiene una duración entre dos y tres semanas, 24 horas por cada incremento.

Figura 1. 8). Consolidómetro de Terzaghi usando anillo flotante, b) Arreglo de un montaje con anillo flotante, arreglo de un montaje con anillo fijo.



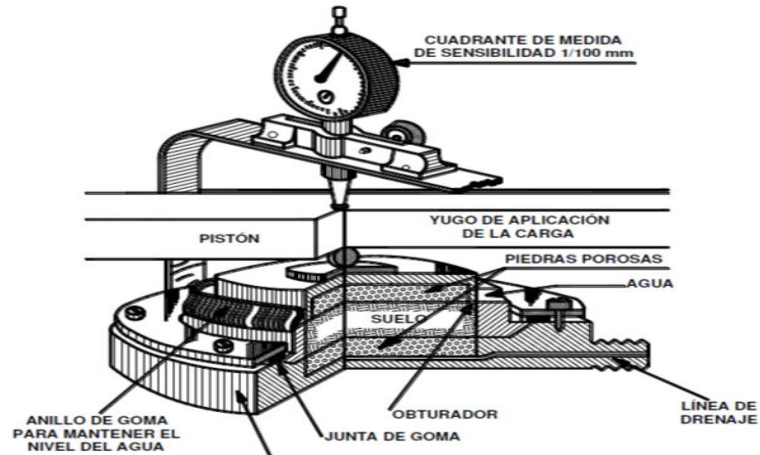
Fuente: Juárez, 1976.

En la figura se observa que el equipo puede constituirse por un anillo metálico flotante, mayormente usado porque puede desplazarse durante el proceso de consolidación, o fijo usado para la realización de pruebas de permeabilidad ejecutadas simultáneamente con la de consolidación.

El edómetro con anillo flotante debe tener una base rígida metálica, independiente del cuerpo del edómetro, siendo conveniente que el recipiente que contiene la muestra sea un cilindro de lucita para poder observar los movimientos del anillo y de las piedras porosas durante la prueba. Por otro lado, el consolidómetro de anillo fijo debe tener una base rígida diseñada para recibir la piedra porosa interior, y fijar el anillo de consolidación. Para sumergir la probeta se usa un recipiente independiente del banco de consolidación. Este consolidómetro debe incluir un piezómetro calibrado y las condiciones necesarias para poder realizar pruebas de permeabilidad.

La fricción que se desarrolla entre el anillo y el espécimen es menor en un consolidómetro de anillo flotante, haciéndolo más recomendable que uno de anillo fijo. El consolidómetro de anillo fijo tiene la ventaja de permitir la realización de pruebas de permeabilidad, aunque en la práctica resulte difícil combinar una prueba de consolidación con una de permeabilidad sin que presenten interferencias entre ambas. El diseño del consolidómetro tuvo como finalidad demostrar el principio de esfuerzos efectivos. El establecimiento de este dispositivo permitió medir directamente la permeabilidad y asentamiento del espécimen, confirmando de esta manera las hipótesis básicas de la teoría de consolidación.

Figura 1. 9). Edómetro de Casagrande



Fuente: Jiménez, 1951.

Casagrande elaboró un estudio de arcillas marinas, con el cual impulsó la evolución del edómetro, ya que sus investigaciones necesitaban el uso de muestras inalteradas. Los cambios radicaron en contener el espécimen en un anillo para separarlo y muestrearlo, previniendo con ello la pérdida de agua. Aunado a estos cambios, durante este periodo destacó el anillo flotante.

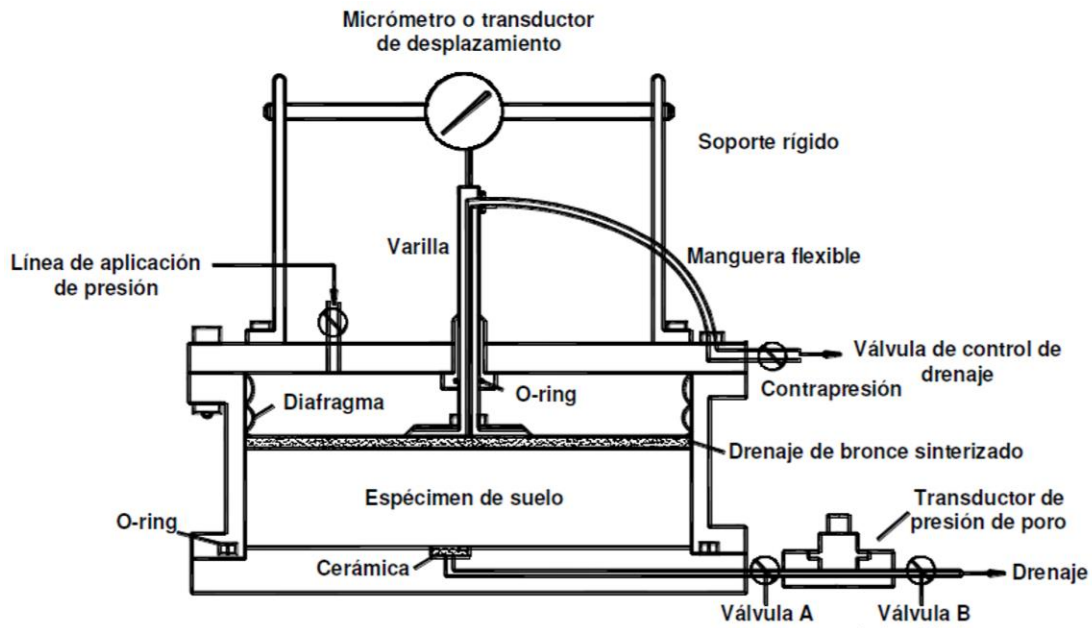
Con el tiempo se tuvieron importantes avances en el campo de la medición, uno de ellos fue el registro de la primera medición de presión de poro que se debió a Taylor (1942), el uso un sistema de balanceo conectado a la base de la muestra, Posteriormente Aldrich (1951) repite este sistema insertando una aguja a la mitad del plano de la muestra. También destacan las descripciones de Whitman, Richarson y Healy (1961) sobre las ventajas del transductor eléctrico, mismo que fue utilizado en la primera celda Rowe (fig. 1.10).

En 1964 Lowe, Zaccheo y Feldman complementan el edómetro de Casagrande con una cámara de presión con el objetivo de poder aplicar contrapresión a las muestras de suelo.

Debido a que el edómetro de Casagrande presentaba diversas desventajas durante la realización de las pruebas, ya que no se contaba con un control suficiente sobre el

drenaje y la medida de la presión de poro inicial, además de los errores que podían surgir al aplicar los esfuerzos mecánicamente debido a la fricción y las vibraciones, El profesor P.W. Rowe en la universidad de Manchester desarrolló un nuevo equipo el cual es denominado Celda Rowe.

Figura 1. 10). Forma básica de la celda Rowe.

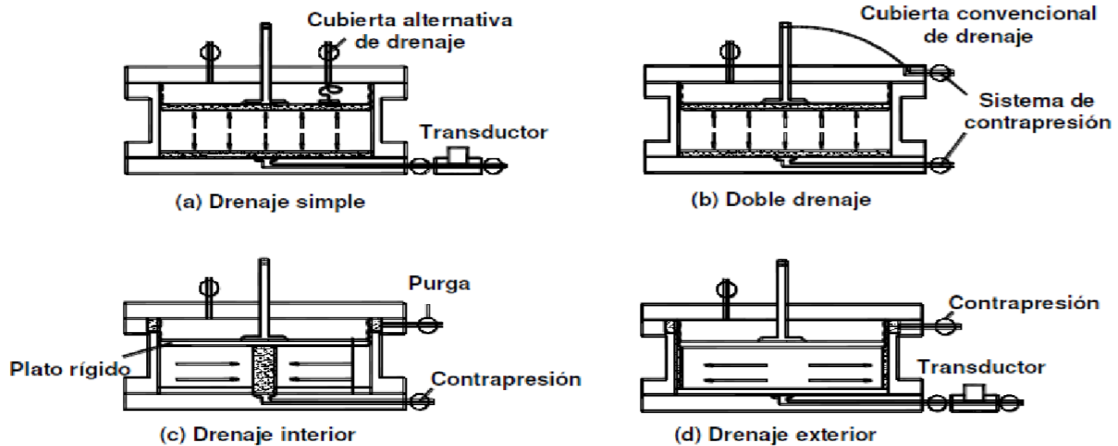


Fuente: Rowe, 1966.

Las pruebas realizadas en este nuevo equipo consistían en aplicar a la muestra una carga uniforme para medir la presión de poro actuante a través de un diafragma de hule, ubicado en la tapadera, con un espesor de 0.07". El asentamiento vertical era medido en el centro de la muestra con un eje de latón de $\frac{3}{8}$ " diámetro, adjunto a un micrómetro. El eje se encontraba sellado en el centro de la celda con el diafragma a través de un gato y dos arandelas, con la finalidad de eliminar cualquier error en las mediciones debido a la compresión del diafragma bajo presión. La presión de poro era medida a través del flujo en cerámicas cementadas localizadas en la base de la celda, cada una conectada a un bloque de latón con una cubierta eléctrica, montados en un transductor de presión. Tanto la medición de la presión de poro como el drenaje se desarrollaban de acuerdo a la naturaleza de la prueba.

Los factores más importantes en el desarrollo de los diferentes ensayos en la celda Rowe son: el control completo del drenaje, la presión de poro inicial y la presión que podía ser alcanzada posteriormente (fig. 1.11).

Figura 1.11). Drenaje y medición de presión de poro, de acuerdo con los cuatro tipos de pruebas que pueden desarrollarse



Fuente: Rowe, 1966.

A lo largo de los años, se han mejorado diversos detalles de los dispositivos utilizados para ensayos de consolidación, las aportaciones que se hacen a estos han sido con el objetivo de mejorar su desempeño haciendo que las pruebas reproduzcan lo mejor posible lo que realmente sucede en campo, así como también la adaptación de dispositivos eléctricos que permitan la realización de pruebas de consolidación más sencillas y con mediciones más exactas.

2.14 Estadística.

2.14.1 Correlación.

Una correlación existe entre dos variables cuando una de ellas está relacionada con la otra de alguna manera.

En esta sección se explica el coeficiente de correlación lineal r que es una medida numérica de la fuerza de la relación entre dos variables que representan datos cuantitativos. Utilizando datos muestrales apareados (que en ocasiones se llaman datos

bivariados), calculamos el valor de r (generalmente con la ayuda de recursos tecnológicos) y luego utilizamos este valor para concluir que existe (o no) una relación entre las dos variables.

2.14.2 Coeficiente de correlación lineal.

El coeficiente de correlación lineal r mide la fuerza de la relación lineal entre los valores cuantitativos apareados X y Y en una *muestra*. También se conoce como **coeficiente de correlación producto momento de Pearson**, en honor de Karl Pearson (1857-1936), quien lo desarrolló originalmente. Su valor se calcula con la siguiente fórmula:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} * \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}}$$

n = representa el número de pares de datos presentes.

\sum = denota la suma de los elementos indicados.

$\sum x$ = denota la suma de todos los valores de x .

$\sum x^2$ = indica que cada valor de x debe elevarse al cuadrado y después deben sumarse esos cuadrados.

$(\sum x)^2$ = indica que los valores de x deben sumarse y el total elevarse al cuadrado. Es sumamente importante evitar confundirse entre $\sum x^2$ y $(\sum x)^2$.

$\sum xy$ = indica que cada valor de x debe multiplicarse primero por su valor y correspondiente. Después de obtener todos estos productos, se calcula su suma.

r = representa el coeficiente de correlación lineal de una *muestra*.

ρ = la letra griega rho se usa para representar el coeficiente de correlación lineal de una población.

El valor de r^2 (coeficiente de determinación muestral) es la proporción de la variación de y que está explicada por la relación lineal entre X y Y .

2.14.3 Conceptos básicos de las medias de tendencia central.

2.14.3.1 Media.

La media (aritmética), por lo general, es la medida numérica más importante que se utiliza para describir datos; comúnmente se le conoce como *promedio*. Es la medida de tendencia central que se calcula al sumar los valores y dividir el total entre el número de valores.

$$\mathbf{MEDIA} = \frac{\sum \mathbf{x}}{\mathbf{n}}$$

$\sum \mathbf{x}$ = suma de todos los valores de la muestra.

\mathbf{n} = número de valores muestrales.

2.14.3.2 Mediana.

La mediana de un conjunto de datos es la medida de tendencia central que implica el valor intermedio, cuando los valores de los datos originales se presentan en orden de magnitud creciente (o decreciente).

Una desventaja de la media es su sensibilidad a cada valor, de tal forma que una puntuación excepcional puede afectarla de manera drástica. La mediana resuelve, en gran medida, esa desventaja. La mediana es un “valor intermedio”, ya que la mitad de los valores de los datos están por debajo de la mediana y la otra mitad por arriba de ella.

Para calcular la mediana, primero se ordenan los valores (se acomodan en orden) y luego se sigue uno de los siguientes dos procedimientos:

- Si el número de valores es impar, la mediana es el número que se localiza exactamente a la mitad de la lista.
- Si el número de valores es par, la mediana se obtiene calculando la media de los dos números que están a la mitad.

2.14.3.3 Moda.

La moda de un conjunto de datos es el valor que se presenta con mayor frecuencia.

- Cuando dos valores se presentan con la misma frecuencia y ésta es la más alta, ambos valores son modas, por lo que el conjunto de datos es bimodal.
- Cuando más de dos valores se presentan con la misma frecuencia y ésta es la más alta, todos los valores son modas, por lo que el conjunto de datos es multimodal.
- Cuando ningún valor se repite, se dice que no hay moda.

2.14.3.4 Sesgo.

Una distribución de datos está sesgada si no es simétrica y se extiende más hacia un lado que hacia el otro. (Una distribución de datos es simétrica si la mitad izquierda de su histograma es aproximadamente una imagen en espejo de su mitad derecha). Una comparación de la media, la mediana y la moda pueden revelar información acerca de las características de sesgo.

2.15 Validación del índice de compresión.

Terzaghi, y Peck (1967) propusieron expresiones empíricas para el índice de compresión. Para arcillas inalteradas:

$$C_c = 0,009(LL - 10)$$

Para arcillas remodeladas:

$$C_c = 0,007(LL - 10)$$

Nagaraj y Murty (1985) expresaron el índice de compresión como:

$$C_c = 0,2343\left(\frac{LL(\%)}{100}\right)G_s$$

Herrero (1983) Todas las arcillas

$$C_c = \frac{(LL-13)}{109}$$

Azzouz et.al. (1976) Todas las arcillas con limite menor de 100%

$$C_c = 0,006(LL - 9)$$

Existen múltiples parámetros índice del suelo para la predicción del índice de compresibilidad, como el limite líquido y el limite plástico, que es una propiedad del material que depende a su vez del tipo de suelo, del contenido natural de agua, el tamaño de sus partículas y las características de superficie de dichas partículas;

existentes otros parámetros más relacionados a la compresibilidad, tales como la relación de vacíos, que se ligan a la presión de consolidación existente, así como con el peso específico relativo de los suelos. Esto es especialmente cierto cuando se trata con suelos orgánicos en los cuales la curva $e-\log.p$ es lineal.

3.15 Elaboración de planillas.

A continuación se incluye las planillas Excel usadas para tomar datos y calcular los resultados de los resultados de los ensayos de laboratorio.

Una forma de usarlas es imprimirlas y llenarlas a mano, efectuando los cálculos mediante la calculadora.

Otra forma es definir en las celdas adecuadas, las formulas descritas en las planillas, con lo cual estas presentaran una verdadera utilidad.

Planillas Excel de:

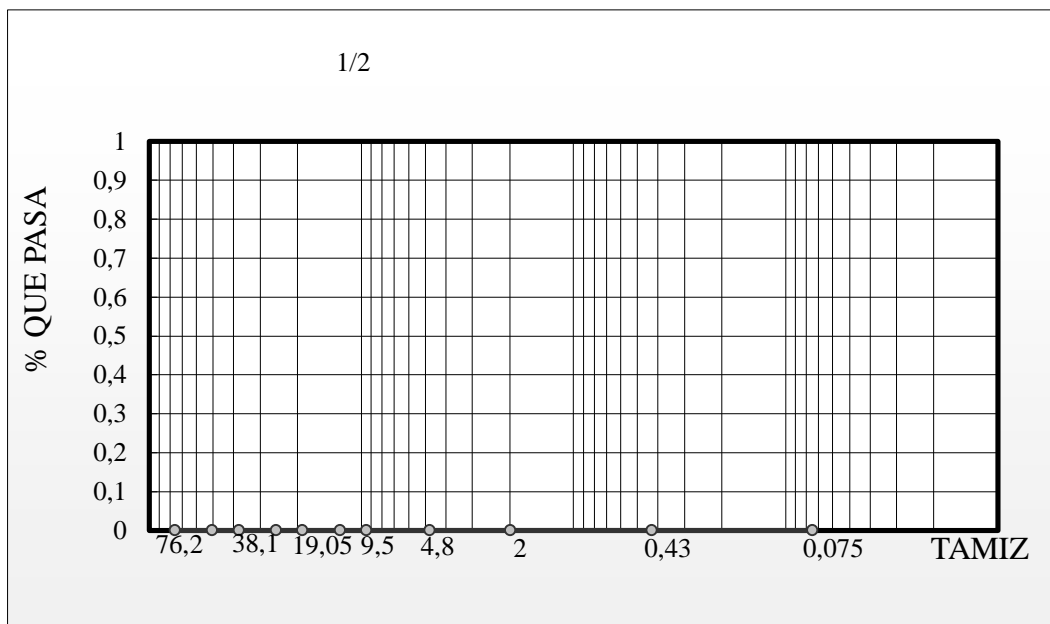
Contenido de humedad

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula			
Peso de suelo seco + Cápsula			
Peso de cápsula			
Peso de suelo seco			
Peso del agua			
Contenido de humedad			
PROMEDIO			

$$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Granulometría

Peso Total (gr.)					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
N°4	4,80				
N°10	2,00				
N°40	0,43				
N°200	0,075				
Base					



Peso específico

Numero de ensayo	1	2	3
Temperatura ensayada °C			
Peso del suelo seco W_s			
Peso del frasco + agua W_{fw}			
Peso del frasco + agua + suelo W_{fws}			
Peso específico			
Factor de corrección $K = 0,99791$			
Peso específico corregido			
promedio peso específico corregido		(g/cm ³)	

Limite líquido

Capsula N°	1	2	3	4	5
N° de golpes					
Suelo Húmedo + Cápsula					
Suelo Seco + Cápsula					
Peso del agua					
Peso de la Cápsula					
Peso Suelo seco					
Porcentaje de Humedad					

Limite plástico

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula			
Peso de suelo seco + Cápsula			
Peso de cápsula			
Peso de suelo seco			
Peso del agua			
Contenido de humedad			

LP	=	
----	---	--

Consolidación

<u>Datos</u>		
Yw(Peso Esp, del Agua)=		g/cm ³
Altura de la probeta =		cm
Diámetro de la probeta =		cm
Área de la probeta=		cm ²
Peso =		Kg
Presión =		Kg/cm ²
Presión =		KN/m ²

Sensibilidad del extensómetro =		mm
---------------------------------	--	----

CURVA DE COMPRESION	
Datos:	M. inalterada
Peso seco de la probeta $W_s =$ (gr)	
Área de la probeta $A =$ (cm ²)	
Densidad de los sólidos del suelo $G_s =$	
Peso específico del agua $\gamma_w =$ (gr/cm ³)	

TIEMPO [min]	DEF.V X0,002mm	ALTURA DE PROBETA (cm)
0,001		
0,10		
0,25		
0,50		
1,00		
2,00		
4,00		
8,00		
15,00		
30,00		
60,00		
	Hf (cm)=	

Presión (KN/m ²)	Final (mm)	(H)	$H_s = W_s / (A * G_s * \gamma_w)$	$H_v =$ (mm)	H-Hs	$e = H_v / H_s$

$\sigma^c =$	
--------------	--

Calculo de Cc	
H1 =	
H2 =	
σ^1	
σ^2	
Cc=	

$$Cc = \frac{H2 - H1}{\log\left(\frac{\sigma^2}{\sigma^1}\right)}$$

CAPÍTULO III
DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Recopilación de información.

3.1.1 Introducción

No hay una metodología única de la toma de muestras, debido a la adversidad de ambientes naturales y los objetivos del análisis. Sin embargo según algunas normas básicas para obtener muestras representativas, que se describen a continuación.

Paso 1: Diferenciar las áreas de muestreo

Se deberá realizar un relevamiento del terreno de manera de dividir el lote en áreas uniformes en lo que hace a la topografía. Tanto las diferencias naturales como ser relieve, la erosión, el color, la vegetación y las diferencias de manejo como ser tipo de labranza, fertilizaciones, rotaciones, tipos de cultivo; deben ser tenidas en cuenta.

Precauciones:

Si existen MANCHONES o PROBLEMAS LOCALIZADOS, considerar cada uno individualmente. Si estas superficies son tan pequeñas que no pueden ser tratadas por separado en el Manejo del Suelo, deben ser omitidas en el muestreo.

Paso 2: Materiales a utilizar

Se pueden utilizar:

- Palas
- Barrenos (o caladores), éstos resultan más prácticos ya que sacan muestras más uniformes, son rápidos y causan menos daño a la superficie del terreno. La única desventaja es que no son muy útiles en suelos muy secos, compactos o con mucho material rocoso.
- Bolsa de plástico resistente, balde o contenedor impermeable donde ir colocando las distintas submuestras que se van recolectando.

Figura 1.12 materiales utilizados para la extracción de las muestras.



Fuente: Elaboración propia

Precauciones: Rotular o identificar perfectamente las muestras (sobre todo si se toman muestras a distintas profundidades) No utilizar bolsas o contenedores que hayan contenido fertilizante en algún momento.

Paso 3: Profundidad – Condiciones de humedad

Nunca muestrear luego de una lluvia o riego abundante. Esperar siempre entre 2 y 3 días. Cuando el suelo se encuentra cercano a la Capacidad de Campo es cuando la extracción de la muestra se facilita. O sea que el suelo debe estar húmedo, pero no saturado ni barroso. En cuanto a la profundidad habría que considerar lo siguiente:

TERRENO – USO DE LOTES PROFUNDIDAD OBJETIVOS DEL ENSAYO	
Contenido de humedad	1-2 m
Límites	1-2 m
granulometría	1-2 m
Peso específico	1-2 m
consolidación	1-2 m

Paso 4: Procedimiento

Luego de que se establecieron las áreas homogéneas como se explicó en el paso 1, se procede a obtener una muestra de cada una de ellas. Ésta muestra (conjunto) estará compuesta por varias submuestras (muestras parciales). Cuanto mayor es la cantidad de submuestras que se tomen, más representativa será para el fin del estudio.

1.- determinación del número de muestras

Para el fin del proyecto se tomarán 30 muestras de los diferentes barrios de Tarija provincia Cercado, con el fin de encontrar la mayor cantidad de suelos arcillosos. La cantidad de la muestra será de 3 kg por cada punto para los diferentes ensayos que se practicarán en cada muestra para poder clasificarlos según sus características.

Extracción de muestras:

- Primero se determinará si el suelo es plástico
- En cada punto limpiar la cobertura vegetal.
- Con una pala, un pico y un barreno efectuar cortes de 1 a 2 m de profundidad

Paso 5: Embalaje – Identificación – Conservación – Envío de la muestra

Envasar las muestras en bolsas de plástico grueso o en bolsas de papel especiales para suelos (impermeables por dentro).

Consignar todos los datos relevados a la muestra

- Establecimiento
- Número de lote
- Barrio al que representa
- Profundidad a la cual fue tomada
- Observaciones y demás datos relevantes.

Muchas veces es conveniente utilizar doble bolsa plástica para evitar posibles roturas durante el manipuleo de la muestra.

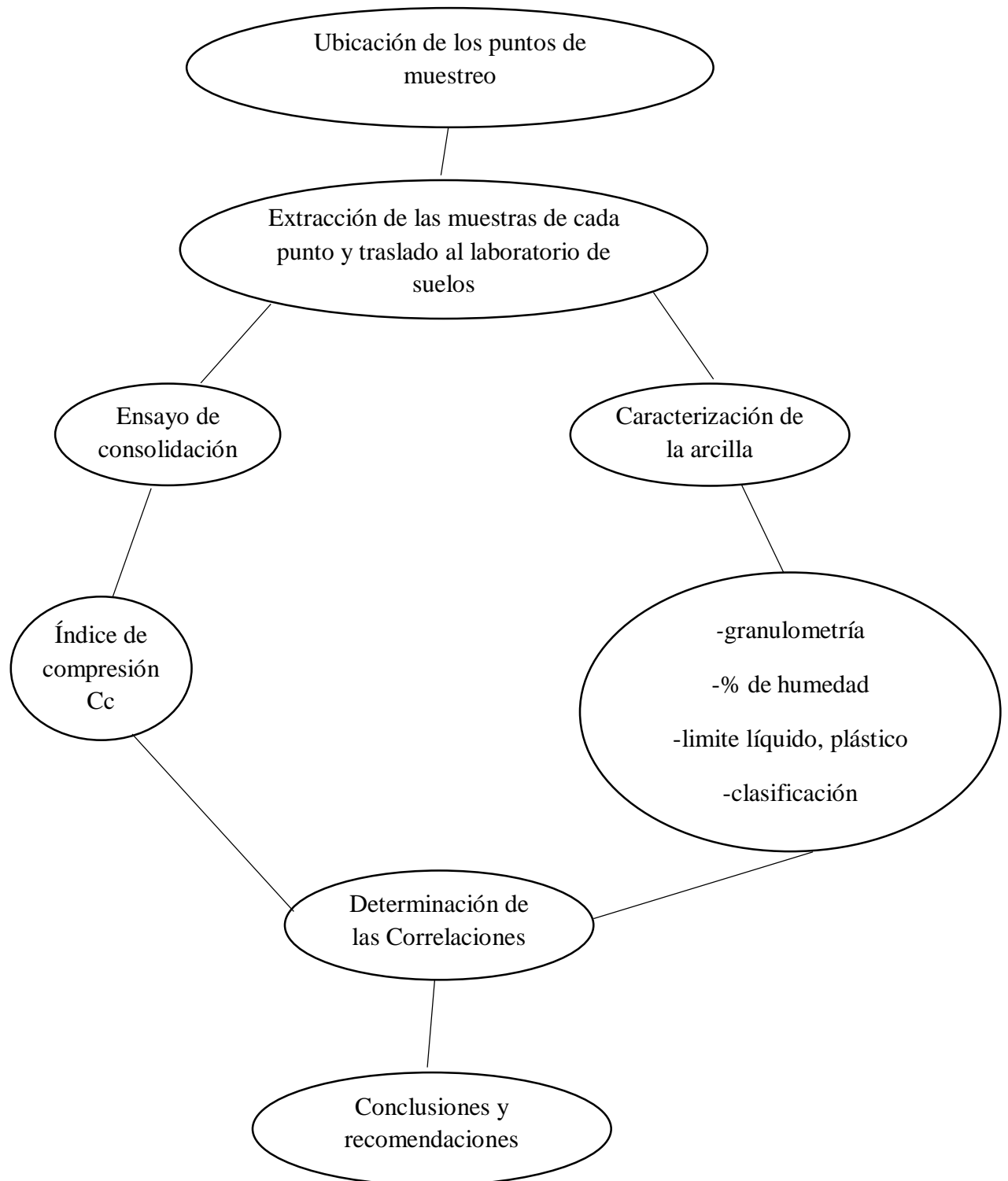
Conservar la muestra en lugar fresco y enviar lo antes posible al laboratorio. Cuanto menos tiempo transcurra, más fidedignos serán los resultados.

Si llega a haber demoras, no mantener las muestras muy húmedas. Secarlas sobre una lona o plástico formando una capa no mayor a 2 o 3 cm de altura, teniendo la precaución de deshacer los terrones.

Precauciones y normas generales a tener en cuenta:

- No muestrear inmediatamente después de una lluvia (la humedad ideal del suelo debe ser de 25 % aproximadamente) o si el perfil del suelo está saturado, conviene siempre esperar 2 ó 3 días a que drene bien.
- Al extraer de las profundidades de más abajo (5-20 cm / 20-40 cm / 40-60 cm), convendrá quitar o separar la tierra que haya caído de más arriba para no contaminar las submuestras.
- Tener especial cuidado de no mezclar las muestras de diferentes profundidades.

3.1.2 Plan estratégico de trabajo.



3.2 Determinación de las zonas de muestreo.

La determinación de zona de muestreo estará sujeta a 30 diferentes barrios en crecimiento de la ciudad de Tarija - Bolivia

Zona 1

1. Barrio Tabladita II
2. Barrio Tabladita I
3. Barrio Alto Senac
4. Barrio Catedral
5. Barrio Luis de Fuentes
6. Barrio San Antonio
7. Barrio German Busch

Imagen 1. Zona 1

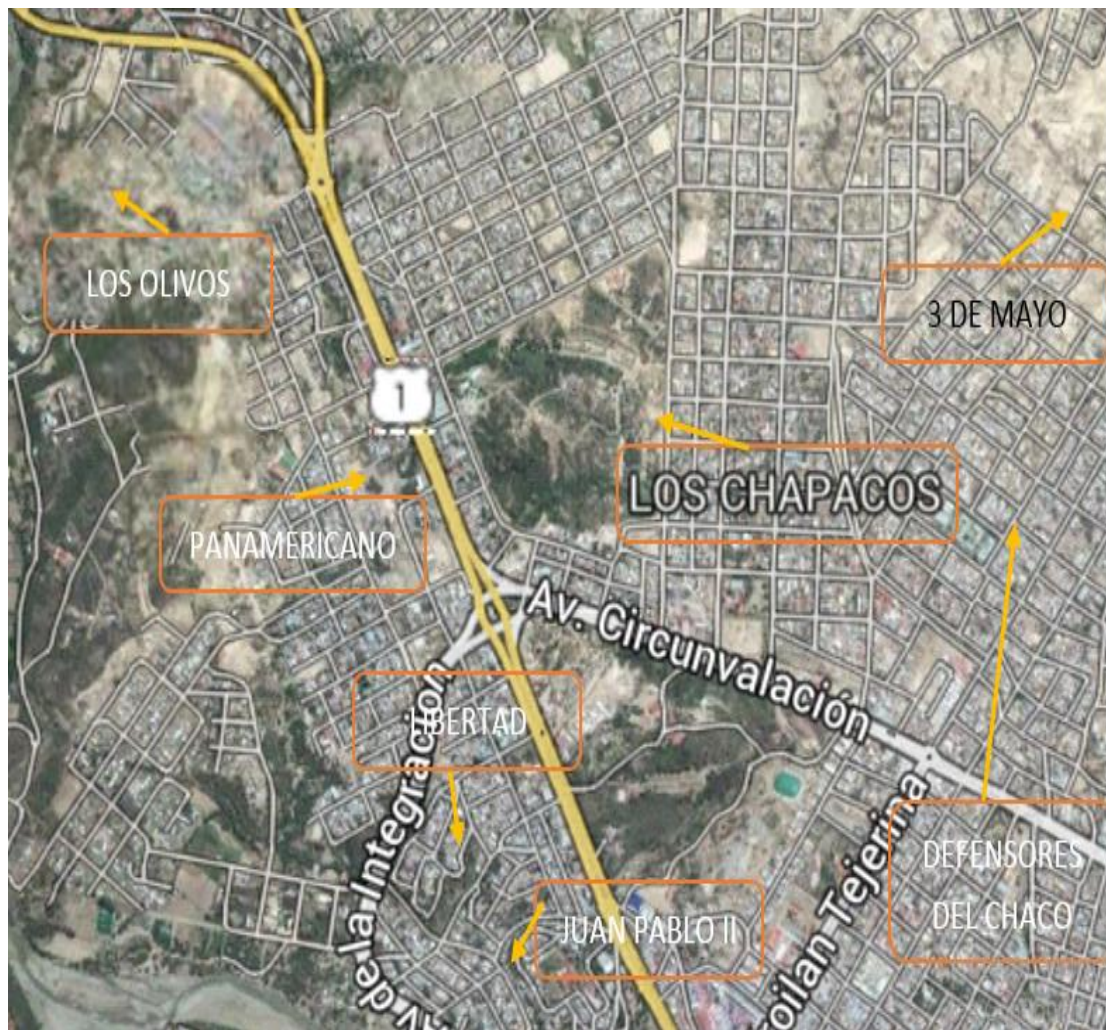


Fuente: google Earth.

Zona 2

1. Barrio los Chapacos
2. Barrio Panamericano
3. Barrio 3 de Mayo
4. Barrio los Olivos
5. Barrio Defensores del Chaco
6. Barrio Juan Pablo II
7. Barrio Libertad

Imagen 2. Zona 2



Fuente: google Earth.

Zona 3

1. Barrio San Pedro
2. Barrio San Jorge II
3. Barrio San Gerónimo
4. Barrio Morros Blancos
5. Barrio Simón Bolívar
6. Barrio San Luis
7. Barrio San Jorge I
8. Barrio Bartolomé Attar
9. Barrio Fabril

Imagen 3. Zona 3



Fuente: google Earth.

Imagen 4. Zona 3



Fuente: google Earth.

Zona 4

1. Barrio Lourdes
2. Barrio Andaluz
3. Barrio 2 de mayo
4. Barrio Constructor
5. Barrio Pedro Antonio Flores
6. Barrio San Bernardo
7. Barrio la Florida

Imagen 5. Zona 4



Fuente: google Earth.

3.3. Propiedades del suelo en estudio.

Las áreas de estudio se localizan dentro de la provincia cercado, el sondeo en estudio se efectuó en barrios en crecimiento de la ciudad de Tarija, donde están constituidas generalmente por arcillas.

Los barrios en crecimiento de la ciudad de Tarija fueron divididas en cuatro zonas, en los cuales se encontró bancos de suelos arcillosos con consistencias plásticas, los cuales fueron llevados al laboratorio para su posterior caracterización.

Entre las propiedades obtenidas de los suelos finos encontrados en el sondeo, se observan las siguientes variaciones: el contenido de agua in-situ varía de 6,182 a 17,767 % con un promedio de 11,541 para el límite líquido se encontró una variación de 24,143 a 42,838 con un promedio general de 33,277, para el límite plástico se encontró una variación de 18,172 a 32,387 con un promedio de 24,480.

3.4 Pruebas de consolidación.

A las muestras de suelo obtenidas del sondeo de la ciudad de Tarija se la realiza un total de 30 pruebas de consolidación unidimensional, también se realizó variaciones en los tiempos de aplicación de los incrementos de carga y en la magnitud de los incrementos, correspondiente al programa de pruebas de laboratorio.

Tabla 1). Resultados de las pruebas de laboratorio realizadas

N°	barrios de la ciudad de Tarija	LL	LP	IP	Cc	%W
1	BARRIO TABLADITA II	38,377	20,587	17,789	0,139	8,520
2	BARRIO TABLADITA I	39,485	18,172	21,313	0,139	17,767
3	BARRIO ALTO SENAC	29,991	21,611	8,380	0,128	6,182
4	BARRIO CATEDRAL	31,030	21,256	9,774	0,133	10,453
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	41,184	23,808	17,376	0,142	10,878
6	BARRIO SAN ANTONIO	31,680	25,646	6,034	0,129	12,451
7	BARRIO GERMAN BUSCH	42,259	30,775	11,484	0,145	9,418
8	BARRIO LOS CHAPACOS	31,011	22,391	8,620	0,130	15,134
9	BARRIO PANAMERICANO	34,345	26,108	8,238	0,135	6,819
10	BARRIO 3 DE MAYO	32,213	23,956	8,257	0,132	8,519
11	BARRIO LOS OLIVOS	24,143	19,149	4,994	0,123	17,328
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	25,492	21,399	4,093	0,126	12,589
13	BARRIO JUAN PABLO II	24,529	21,049	3,481	0,124	9,560
14	BARRIO LIBERTAD	28,065	21,324	6,741	0,126	16,036
15	BARRIO SAN PEDRO	29,347	22,274	7,073	0,132	11,489
16	BARRIO SAN JORGE II	30,820	25,309	5,512	0,135	13,578
17	BARRIO SAN GERONIMO	29,937	23,277	6,660	0,134	9,583
18	BARRIO MORROS BLANCOS	32,109	26,046	6,063	0,134	12,609
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	34,720	27,729	6,991	0,129	11,307
20	BARRIO SAN LUIS	36,024	29,038	6,987	0,132	15,278
21	BARRIO SAN JORGE I	30,450	23,045	7,404	0,132	8,520
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	31,317	23,761	7,555	0,131	13,690
23	BARRIO FABRIL	33,548	25,441	8,107	0,134	11,484
24	BARRIO LOURDES	34,205	25,669	8,537	0,138	12,569
25	BARRIO ANDALUZ	32,267	23,888	8,379	0,138	11,360
26	BARRIO 2 DE MAYO	35,515	26,868	8,647	0,131	12,512
27	BARRIO CONSTRUCTOR	35,223	25,761	9,463	0,135	10,535
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	35,881	26,491	9,390	0,141	11,688
29	BARRIO SAN BERNARDO	40,295	30,194	10,102	0,145	8,654
30	BARRIO LA FLORIDA	42,838	32,387	10,451	0,141	9,731

Adicionalmente, con material producto del mismo sondeo, se realizaron otros ensayos, tales como: peso específico, granulometría, hidrómetro, límites de plasticidad y

contenido de agua natural, con el fin de tener las propiedades índice necesarias para las correlaciones planteadas en los alcances.

3.5 Curva de compresibilidad.

El proceso de consolidación se traduce en una disminución de volumen a medida que se aplica una carga. Como como ya se ha expuesto esta reducción de volumen es debido a la expulsión de agua que se encuentra en los poros del suelo y, por lo tanto, en la reducción de alturas lo que implica el asentamiento del estrato. La prueba de consolidación brinda la información suficiente para obtener la curva de compresibilidad de un suelo, con la cual se puede obtener parámetros que permitan el análisis y el cálculo de los asentamientos que puede sufrir dicho suelo.

La compresibilidad del material depende en gran medida de la historia de esfuerzos a la cual ha estado sujeto en el pasado; así mismo, su comportamiento dependerá en un futuro, de las condiciones de carga a las cuales va a ser sometido. De ahí que se pueda decir que las propiedades de compresibilidad de un suelo están en función de su historia de esfuerzos.

En anexo1 -curva de compresibilidad y cálculo de parámetro se presentan las curvas de compresibilidad obtenidas, en ellas se observan la relación de vacíos acumulada de las muestras ensayadas y su esfuerzo de preconsolidación.

3.7 Índice de compresión.

Las curvas de compresibilidad obtenidas de los ensayos permiten realizar el cálculo del índice de compresión, cuyo valor debe ser evaluado correctamente para que la determinación de los posibles asentamientos del suelo en estudio sean confiables.

Como se ha mencionado anteriormente, el índice de compresión es la pendiente de la curva de compresibilidad en el tramo virgen. Las pendientes obtenidas en las curvas, aumentan cuando el tiempo o la magnitud de los incrementos de carga también lo hacen. Es decir, a mayor tiempo de aplicación de incrementos, se obtendrá una mayor compresibilidad. Por lo anterior, es importante considerar la velocidad de aplicación de las cargas, para evaluar correctamente el C_c .

En la siguiente tabla se encuentran los valores obtenidos para el índice de compresión de los 30 ensayos realizados, los cuales está en un rango de 0,123 a 0,145, lo cual muestra que las arcillas de la ciudad de Tarija son medianamente compresible.

Tabla 2). Índice de compresión de los suelos en estudio

N°	e1	e2	σ^1 (KN/m2)	σ^2 (KN/m2)	Cc	σ^c (KN/m2)
1	0,424542467	0,382649652	25,50151	51,00303	0,139165	10,4
2	0,634859409	0,592924823	22,22222	44,44444	0,139304	7,2
3	0,505995217	0,467562369	25,50151	51,00303	0,127671	10,1
4	0,480979885	0,440942233	22,22222	44,44444	0,133002	10,2
5	0,555945217	0,513154119	22,22222	44,44444	0,142149	10,5
6	0,412690836	0,373772899	25,50151	51,00303	0,129283	10,6
7	0,586708057	0,542969422	25,50151	51,00303	0,145297	10,4
8	0,566855217	0,527731297	22,22222	44,44444	0,129967	7,9
9	0,534795753	0,494279339	25,50151	51,00303	0,134593	10,1
10	0,508299999	0,468618071	25,26112	50,52225	0,131821	10,6
11	0,600941906	0,56395095	22,22222	44,44444	0,122881	9,9
12	0,660519426	0,622532574	22,22222	44,44444	0,12619	10,2
13	0,765695367	0,728267226	25,26112	50,52225	0,124334	8
14	0,738216787	0,700294634	22,22222	44,44444	0,125975	10,5
15	0,747107167	0,707404364	25,26112	50,52225	0,13189	10,1
16	0,6412865	0,600660597	22,22222	44,44444	0,134956	9
17	1,54857828	1,508115004	25,26112	50,52225	0,134416	7,2
18	0,663265284	0,623036039	22,22222	44,44444	0,133639	10,2
19	0,758344544	0,719661331	25,26112	50,52225	0,128503	10,2
20	0,71179513	0,672075464	22,22222	44,44444	0,131946	10,1
21	0,484643831	0,444761856	25,50151	51,00303	0,132485	10,6
22	0,634859409	0,595451003	22,22222	44,44444	0,130912	8
23	0,574452416	0,534244819	25,50151	51,00303	0,133567	10,5
24	0,565181116	0,523675874	22,22222	44,44444	0,137877	10,1
25	0,566990369	0,525578718	25,50151	51,00303	0,137567	9,8
26	0,480979885	0,44140138	22,22222	44,44444	0,131477	10,2
27	0,515092747	0,474537076	25,50151	51,00303	0,134723	10,2
28	0,570156814	0,527731297	22,22222	44,44444	0,140935	9,4
29	0,528545504	0,484968845	25,50151	51,00303	0,144759	10,3
30	0,566855217	0,5244297	22,22222	44,44444	0,140935	7,8

CAPÍTULO IV

CORRELACIONES PARA OBTENER EL C_c . EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS PLASTICAS DE LOS SUELOS.

CAPÍTULO IV

CORRELACIONES PARA OBTENER EL C_c . EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS PLÁSTICAS DE LOS SUELOS.

A lo largo de los años ha existido un gran esfuerzo para realizar investigaciones que permitan establecer correlaciones entre el índice de compresión y las propiedades índices de suelos, con la finalidad de simplificar los procedimientos de identificación del esfuerzo de compresión.

En este capítulo se presentan las correlaciones que permiten obtener valores aproximados del índice de compresión a partir del límite líquido, el índice de plasticidad, límite plástico, determinadas a partir de un proceso estadístico, basado en análisis de regresión lineal. Asimismo, se hace un análisis de resultados obtenidos al aplicar las distintas correlaciones empíricas obtenidas en este trabajo comparados con los valores que se obtienen en laboratorio.

4.1 Información disponible.

Para obtener las correlaciones del índice de compresión de las arcillas de la ciudad de Tarija, se recopilaron un total de 30 pruebas de compresión de diferentes sitios de la zona de estudio, con sus respectivos valores de plasticidad.

Para el presente trabajo se escogieron las siguientes propiedades:

1. **Límite líquido:** por ser una propiedad que depende del tipo de suelo, el tamaño y superficie de sus partículas, lo cual involucra las propiedades de la fase sólida del suelo que determina la capacidad de retención de agua intersticial en su estructura.
2. **Índice de plasticidad:** indica la magnitud del intervalo de agua en el cual el suelo posee consistencia plástica. La plasticidad de un suelo, depende del contenido de partículas finas de forma laminar; ya que éstas ejercen una influencia importante en la compresión del suelo, mientras que el pequeño tamaño propio de esas partículas, hace que la permeabilidad sea muy baja.

3. **Límite plástico:** Es la humedad a partir de la cual el suelo deja de tener un comportamiento frágil para pasar a tenerlo plástico.

Tabla 3) base de datos para el establecimiento de las correlaciones de la ciudad de Tarija.

Nº	barrios de la ciudad de Tarija	LL	LP	IP	Cc
1	BARRIO TABLADITA II	38,377	20,587	17,789	0,139
2	BARRIO TABLADITA I	39,485	18,172	21,313	0,139
3	BARRIO ALTO SENAC	29,991	21,611	8,380	0,128
4	BARRIO CATEDRAL	31,030	21,256	9,774	0,133
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	41,184	23,808	17,376	0,142
6	BARRIO SAN ANTONIO	31,680	25,646	6,034	0,129
7	BARRIO GERMAN BUSCH	42,259	30,775	11,484	0,145
8	BARRIO LOS CHAPACOS	31,011	22,391	8,620	0,130
9	BARRIO PANAMERICANO	34,345	26,108	8,238	0,135
10	BARRIO 3 DE MAYO	32,213	23,956	8,257	0,132
11	BARRIO LOS OLIVOS	24,143	19,149	4,994	0,123
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	25,492	21,399	4,093	0,126
13	BARRIO JUAN PABLO II	24,529	21,049	3,481	0,124
14	BARRIO LIBERTAD	28,065	21,324	6,741	0,126
15	BARRIO SAN PEDRO	29,347	22,274	7,073	0,132
16	BARRIO SAN JORGE II	30,820	25,309	5,512	0,135
17	BARRIO SAN GERONIMO	29,937	23,277	6,660	0,134
18	BARRIO MORROS BLANCOS	32,109	26,046	6,063	0,134
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	34,720	27,729	6,991	0,129
20	BARRIO SAN LUIS	36,024	29,038	6,987	0,132
21	BARRIO SAN JORGE I	30,450	23,045	7,404	0,132
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	31,317	23,761	7,555	0,131
23	BARRIO FABRIL	33,548	25,441	8,107	0,134
24	BARRIO LOURDES	34,205	25,669	8,537	0,138
25	BARRIO ANDALUZ	32,267	23,888	8,379	0,138
26	BARRIO 2 DE MAYO	35,515	26,868	8,647	0,131
27	BARRIO CONSTRUCTOR	35,223	25,761	9,463	0,135
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	35,881	26,491	9,390	0,141
29	BARRIO SAN BERNARDO	40,295	30,194	10,102	0,145
30	BARRIO LA FLORIDA	42,838	32,387	10,451	0,141

4.2 Selección del mejor modelo de ajuste.

4.2.1 Determinación de la ecuación de correlación entre el índice de compresibilidad y el límite líquido.

N°	barrios de la ciudad de Tarija	LL	Cc
1	BARRIO TABLADITA II	38,377	0,139
2	BARRIO TABLADITA I	39,485	0,139
3	BARRIO ALTO SENAC	29,991	0,128
4	BARRIO CATEDRAL	31,030	0,133
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	41,184	0,142
6	BARRIO SAN ANTONIO	31,680	0,129
7	BARRIO GERMAN BUSCH	42,259	0,145
8	BARRIO LOS CHAPACOS	31,011	0,130
9	BARRIO PANAMERICANO	34,345	0,135
10	BARRIO 3 DE MAYO	32,213	0,132
11	BARRIO LOS OLIVOS	24,143	0,123
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	25,492	0,126
13	BARRIO JUAN PABLO II	24,529	0,124
14	BARRIO LIBERTAD	28,065	0,126
15	BARRIO SAN PEDRO	29,347	0,132
16	BARRIO SAN JORGE II	30,820	0,135
17	BARRIO SAN GERONIMO	29,937	0,134
18	BARRIO MORROS BLANCOS	32,109	0,134
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	34,720	0,129
20	BARRIO SAN LUIS	36,024	0,132
21	BARRIO SAN JORGE I	30,450	0,132
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	31,317	0,131
23	BARRIO FABRIL	33,548	0,134
24	BARRIO LOURDES	34,205	0,138
25	BARRIO ANDALUZ	32,267	0,138
26	BARRIO 2 DE MAYO	35,515	0,131
27	BARRIO CONSTRUCTOR	35,223	0,135
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	35,881	0,141
29	BARRIO SAN BERNARDO	40,295	0,145
30	BARRIO LA FLORIDA	42,838	0,141

Correlación entre el índice de compresibilidad y el límite líquido.

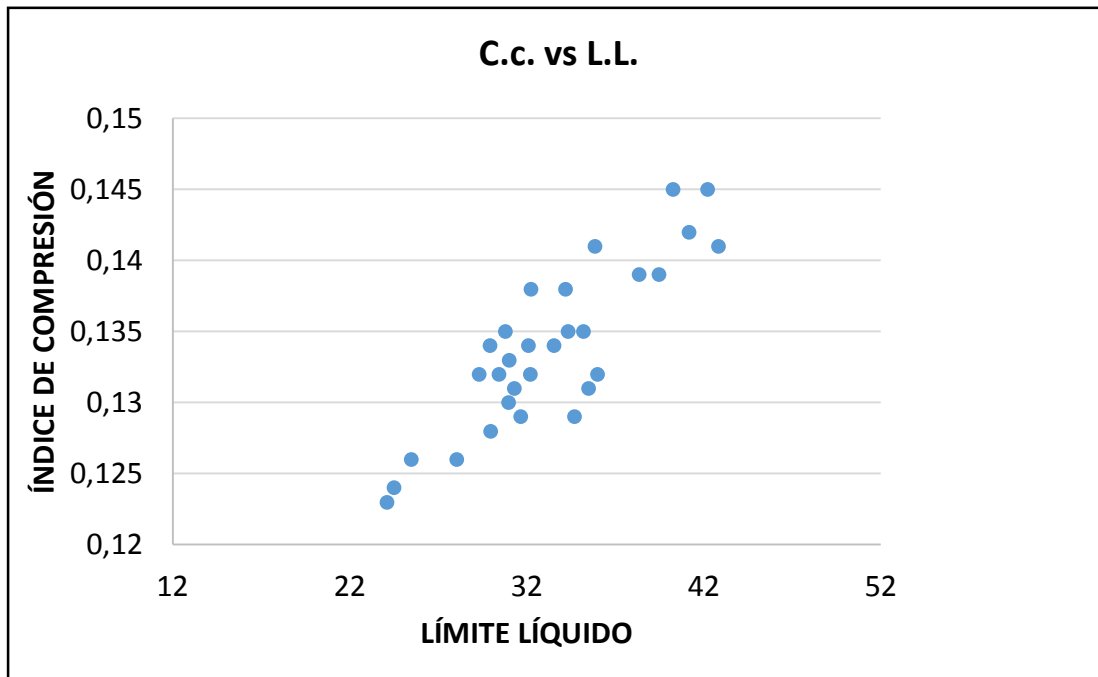


Figura 1.13). Correlación entre el índice de compresibilidad y el límite líquido.

Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se tiene los siguientes resultados

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Log-X	-0,8708	75,84%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,8702	75,72%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,8697	75,64%
Multiplicativa	0,8693	75,57%
Raíz Cuadrada Doble	0,8693	75,56%
Raíz Cuadrada de X	0,8687	75,47%
Raíz Cuadrada de Y	0,8684	75,42%
Log probit	0,8684	75,42%
Logístico	0,8684	75,41%
Lineal	0,8684	75,41%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8684	75,41%
Exponencial	0,8684	75,41%
Cuadrado de Y	0,8680	75,34%

Inversa de Y	-0,8679	75,32%
Logaritmo de X	0,8674	75,23%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,8673	75,23%
Doble Inverso	0,8669	75,14%
Cuadrado-Y Log-X	0,8650	74,82%
Cuadrado Doble	0,8645	74,74%
Curva S	-0,8633	74,52%
Cuadrado de X	0,8631	74,50%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,8622	74,35%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,8613	74,19%
Log-Y Cuadrado-X	0,8612	74,17%
Inversa de X	-0,8593	73,84%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,8589	73,77%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,8549	73,09%

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos de datos. De los modelos ajustados, el modelo Inversa-Y Log-X es el que arroja el valor más alto de R2 con 75,84%. Éste es el modelo actualmente seleccionado.

- Variable dependiente: Índice de compresión C.c.
- Variable independiente: Límite líquido L.L.

Inversa-Y Log-X
$$Y = \frac{1}{a + b \cdot \ln(X)}$$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	14,1148	0,707417	19,9527	0,0000
Pendiente	-1,89612	0,202272	-9,3741	0,0000

Coefficiente de Correlación = -0,870837

R-cuadrada = 75,8358 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 74,9728 porciento

Error estándar del est. = 0,161702

Error absoluto medio = 0,123161

Estadístico Durbin-Watson = 1,79122 (P=0,2440)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0972825

La ecuación al modelo ajustado es:

$$C. c. = \frac{1}{(14,1148 - 1,89612 * \ln(L. L.))}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre C.c. y L.L. con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 75,8358% de la variabilidad en C.c. El coeficiente de correlación es igual a -0,870837, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,161702. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Pronósticos del menú de texto.

El error absoluto medio (MAE) de 0,123161 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

4.2.2 Determinación de la ecuación de correlación entre el índice de compresibilidad y el límite plástico.

N°	barrios de la ciudad de Tarija	LP	Cc
1	BARRIO TABLADITA II	20,587	0,139
2	BARRIO TABLADITA I	18,172	0,139
3	BARRIO ALTO SENAC	21,611	0,128
4	BARRIO CATEDRAL	21,256	0,133
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	23,808	0,142
6	BARRIO SAN ANTONIO	25,646	0,129
7	BARRIO GERMAN BUSCH	30,775	0,145
8	BARRIO LOS CHAPACOS	22,391	0,130
9	BARRIO PANAMERICANO	26,108	0,135
10	BARRIO 3 DE MAYO	23,956	0,132
11	BARRIO LOS OLIVOS	19,149	0,123
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	21,399	0,126
13	BARRIO JUAN PABLO II	21,049	0,124
14	BARRIO LIBERTAD	21,324	0,126
15	BARRIO SAN PEDRO	22,274	0,132
16	BARRIO SAN JORGE II	25,309	0,135
17	BARRIO SAN GERONIMO	23,277	0,134
18	BARRIO MORROS BLANCOS	26,046	0,134
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	27,729	0,129
20	BARRIO SAN LUIS	29,038	0,132
21	BARRIO SAN JORGE I	23,045	0,132
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	23,761	0,131
23	BARRIO FABRIL	25,441	0,134
24	BARRIO LOURDES	25,669	0,138
25	BARRIO ANDALUZ	23,888	0,138
26	BARRIO 2 DE MAYO	26,868	0,131
27	BARRIO CONSTRUCTOR	25,761	0,135
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	26,491	0,141
29	BARRIO SAN BERNARDO	30,194	0,145
30	BARRIO LA FLORIDA	32,387	0,141

Correlación entre el índice de compresibilidad y el límite plástico.

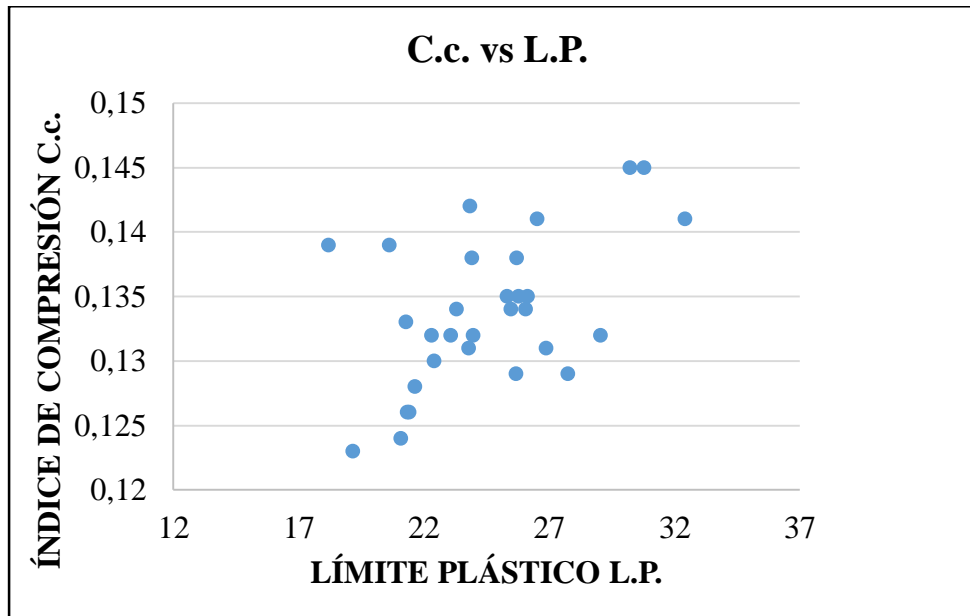


Figura 1.14). Correlación entre el índice de compresibilidad y el límite plástico.

Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se tiene los siguientes resultados

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado Doble	0,5319	28,29%
Cuadrado de X	0,5303	28,12%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,5295	28,03%
Log-Y Cuadrado-X	0,5286	27,94%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,5268	27,75%
Cuadrado de Y	0,5175	26,79%
Lineal	0,5170	26,73%
Raíz Cuadrada de Y	0,5168	26,70%
Log probit	0,5167	26,70%
Logístico	0,5166	26,69%
Exponencial	0,5165	26,67%
Inversa de Y	-0,5159	26,61%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,5086	25,86%
Raíz Cuadrada Doble	0,5086	25,86%

Raíz Cuadrada de X	0,5085	25,86%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,5085	25,86%
Inversa-Y Log-X	-0,5000	25,00%
Multiplicativa	0,4994	24,94%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,4991	24,91%
Logaritmo de X	0,4988	24,88%
Cuadrado-Y Log-X	0,4982	24,82%
Doble Inverso	0,4792	22,96%
Curva S	-0,4775	22,80%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,4767	22,72%
Inversa de X	-0,4758	22,64%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,4741	22,48%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos de datos. De los modelos ajustados, el Cuadrado Doble es el que arroja el valor más alto de R2 con 28,29%.

Éste es el modelo actualmente seleccionado.

- Variable dependiente: Índice de compresión C.c.
- Variable independiente: Límite Plástico L.P.

Cuadrado Doble
$$Y = (a + b * X^2)^{\frac{1}{2}}$$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	0,0149793	0,000919687	16,2873	0,0000
Pendiente	0,00000482722	0,00000145224	3,32398	0,0025

Coeficiente de Correlación = 0,53193

R-cuadrada = 28,295 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 25,7341 por ciento

Error estándar del est. = 0,001341

Error absoluto medio = 0,00103034

Estadístico Durbin-Watson = 1,45324 (P=0,0470)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,22078

La ecuación al modelo ajustado es:

$$Y = (0,0149793 + 0,00000482722 * L.P.^2)^{\frac{1}{2}}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre C.c. y L.P. con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 28,295% de la variabilidad en C.c. El coeficiente de correlación es igual a 0,53193, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,001341. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Pronósticos del menú de texto.

El error absoluto medio (MAE) de 0,00103034 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%. Grafique los residuos versus el número de fila para ver si hay algún patrón que pueda detectarse.

4.2.3 Determinación de la ecuación de correlación entre el índice de compresibilidad y el índice de plasticidad.

Nº	barrios de la ciudad de Tarija	IP	Cc
1	BARRIO TABLADITA II	17,789	0,139
2	BARRIO TABLADITA I	21,313	0,139
3	BARRIO ALTO SENAC	8,380	0,128
4	BARRIO CATEDRAL	9,774	0,133
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	17,376	0,142
6	BARRIO SAN ANTONIO	6,034	0,129
7	BARRIO GERMAN BUSCH	11,484	0,145
8	BARRIO LOS CHAPACOS	8,620	0,130
9	BARRIO PANAMERICANO	8,238	0,135
10	BARRIO 3 DE MAYO	8,257	0,132
11	BARRIO LOS OLIVOS	4,994	0,123
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	4,093	0,126
13	BARRIO JUAN PABLO II	3,481	0,124
14	BARRIO LIBERTAD	6,741	0,126
15	BARRIO SAN PEDRO	7,073	0,132
16	BARRIO SAN JORGE II	5,512	0,135
17	BARRIO SAN GERONIMO	6,660	0,134
18	BARRIO MORROS BLANCOS	6,063	0,134
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	6,991	0,129
20	BARRIO SAN LUIS	6,987	0,132
21	BARRIO SAN JORGE I	7,404	0,132
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	7,555	0,131
23	BARRIO FABRIL	8,107	0,134
24	BARRIO LOURDES	8,537	0,138
25	BARRIO ANDALUZ	8,379	0,138
26	BARRIO 2 DE MAYO	8,647	0,131
27	BARRIO CONSTRUCTOR	9,463	0,135
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	9,390	0,141
29	BARRIO SAN BERNARDO	10,102	0,145
30	BARRIO LA FLORIDA	10,451	0,141

Correlación entre el índice de compresibilidad y el índice de plasticidad.

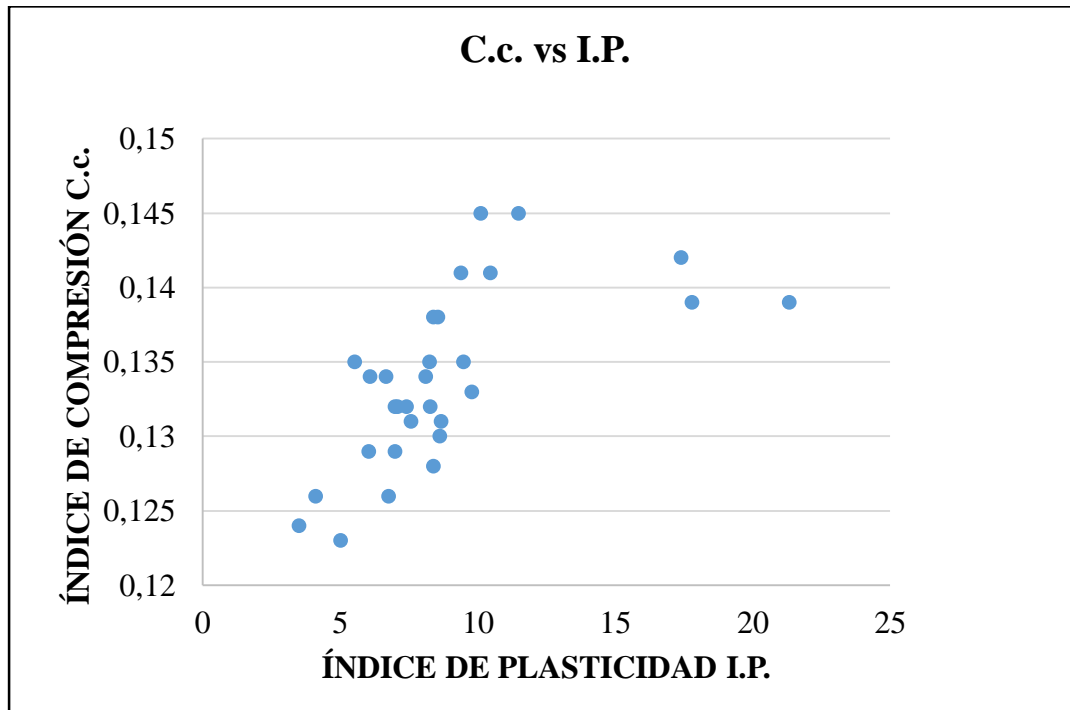


Figura 1.15). correlación entre el índice de compresibilidad y el índice de plasticidad.

Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se tiene los siguientes resultados

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Doble Inverso	0,7393	54,65%
Curva S	-0,7336	53,82%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,7306	53,38%
Inversa de X	-0,7275	52,93%
Multiplicativa	0,7274	52,91%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,7260	52,71%
Logaritmo de X	0,7245	52,49%
Cuadrado-Y Log-X	0,7211	52,00%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,7210	51,99%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,6929	48,01%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,6919	47,88%
Raíz Cuadrada Doble	0,6912	47,78%

Raíz Cuadrada de X	0,6904	47,67%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,6884	47,39%
Exponencial	0,6420	41,22%
Logístico	0,6419	41,21%
Inversa de Y	-0,6419	41,20%
Log probit	0,6419	41,20%
Raíz Cuadrada de Y	0,6418	41,20%
Lineal	0,6415	41,16%
Cuadrado de Y	0,6406	41,03%
Cuadrado Doble	0,5335	28,47%
Cuadrado de X	0,5334	28,46%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,5332	28,43%
Log-Y Cuadrado-X	0,5328	28,39%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,5317	28,27%
Inversa-Y Log-X	<sin ajuste>	

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos de datos. De los modelos ajustados, el Doble Inverso es el que arroja el valor más alto de R2 con 54,65%. Éste es el modelo actualmente seleccionado.

- Variable dependiente: Índice de compresión C.c.
- Variable independiente: Índice de Plasticidad I.P.

Recíproco Doble

$$Y = \frac{1}{(A + \frac{b}{X})}$$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	6,86476	0,114851	59,7709	0,0000
Pendiente	4,74556	0,816909	5,80917	0,0000

Coefficiente de Correlación = 0,739278

R-cuadrada = 54,6532 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 53,0337 por ciento

Error estándar del est. = 0,221514

Error absoluto medio = 0,178732

Estadístico Durbin-Watson = 1,74549 (P=0,2024)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,10713

La ecuación al modelo ajustado es:

$$Y = \frac{1}{(6,86476 + \frac{4,74556}{I.P.})}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre C.c. y I.P. con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 54,6532% de la variabilidad en C.c. El coeficiente de correlación es igual a 0,739278, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,221514. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Pronósticos del menú de texto.

El error absoluto medio (MAE) de 0,178732 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

4.3 Análisis de los resultados obtenidos.

Realizando el análisis de los resultados obtenidos llegamos a los siguientes resultados

Correlación C.c. vs. L.L.
$$C. c. = \frac{1}{(14,1148 - 1,89612 * \ln(L.L.))}$$

Tabla 4). Resultados de las correlaciones con el límite líquido.

Nº	barrios de la ciudad de Tarija	LL	C.c.
1	BARRIO TABLADITA II	38,377	0,1389
2	BARRIO TABLADITA I	39,485	0,1400
3	BARRIO ALTO SENAC	29,991	0,1304
4	BARRIO CATEDRAL	31,030	0,1315
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	41,184	0,1415
6	BARRIO SAN ANTONIO	31,680	0,1322
7	BARRIO GERMAN BUSCH	42,259	0,1425
8	BARRIO LOS CHAPACOS	31,011	0,1315
9	BARRIO PANAMERICANO	34,345	0,1350
10	BARRIO 3 DE MAYO	32,213	0,1328
11	BARRIO LOS OLIVOS	24,143	0,1238
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	25,492	0,1254
13	BARRIO JUAN PABLO II	24,529	0,1243
14	BARRIO LIBERTAD	28,065	0,1283
15	BARRIO SAN PEDRO	29,347	0,1297
16	BARRIO SAN JORGE II	30,820	0,1313
17	BARRIO SAN GERONIMO	29,937	0,1304
18	BARRIO MORROS BLANCOS	32,109	0,1327
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	34,720	0,1353
20	BARRIO SAN LUIS	36,024	0,1366
21	BARRIO SAN JORGE I	30,450	0,1309
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	31,317	0,1318
23	BARRIO FABRIL	33,548	0,1342
24	BARRIO LOURDES	34,205	0,1348
25	BARRIO ANDALUZ	32,267	0,1328
26	BARRIO 2 DE MAYO	35,515	0,1361
27	BARRIO CONSTRUCTOR	35,223	0,1358
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	35,881	0,1365
29	BARRIO SAN BERNARDO	40,295	0,1407
30	BARRIO LA FLORIDA	42,838	0,1430

Correlación C.c. vs. L.P.

$$Y = (0,0149793 + 0,00000482722 * L.P.^2)^{\frac{1}{2}}$$

Tabla 5) Resultados de las correlaciones con el límite plástico.

Nº	barrios de la ciudad de Tarija	LP	Cc
1	BARRIO TABLADITA II	20,587	0,1305
2	BARRIO TABLADITA I	18,172	0,1287
3	BARRIO ALTO SENAC	21,611	0,1313
4	BARRIO CATEDRAL	21,256	0,1310
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	23,808	0,1331
6	BARRIO SAN ANTONIO	25,646	0,1347
7	BARRIO GERMAN BUSCH	30,775	0,1398
8	BARRIO LOS CHAPACOS	22,391	0,1319
9	BARRIO PANAMERICANO	26,108	0,1352
10	BARRIO 3 DE MAYO	23,956	0,1332
11	BARRIO LOS OLIVOS	19,149	0,1294
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	21,399	0,1311
13	BARRIO JUAN PABLO II	21,049	0,1308
14	BARRIO LIBERTAD	21,324	0,1311
15	BARRIO SAN PEDRO	22,274	0,1318
16	BARRIO SAN JORGE II	25,309	0,1344
17	BARRIO SAN GERONIMO	23,277	0,1326
18	BARRIO MORROS BLANCOS	26,046	0,1351
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	27,729	0,1367
20	BARRIO SAN LUIS	29,038	0,1380
21	BARRIO SAN JORGE I	23,045	0,1325
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	23,761	0,1331
23	BARRIO FABRIL	25,441	0,1345
24	BARRIO LOURDES	25,669	0,1348
25	BARRIO ANDALUZ	23,888	0,1332
26	BARRIO 2 DE MAYO	26,868	0,1359
27	BARRIO CONSTRUCTOR	25,761	0,1348
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	26,491	0,1355
29	BARRIO SAN BERNARDO	30,194	0,1392
30	BARRIO LA FLORIDA	32,387	0,1416

Correlación C.c. vs. I.P.

$$Y = \frac{1}{(6,86476 + \frac{4,74556}{I.P.})}$$

Tabla 6). Resultados de las correlaciones con el índice de plasticidad.

Nº	barrios de la ciudad de Tarija	IP	Cc
1	BARRIO TABLADITA II	17,789	0,1402
2	BARRIO TABLADITA I	21,313	0,1411
3	BARRIO ALTO SENAC	8,380	0,1346
4	BARRIO CATEDRAL	9,774	0,1360
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	17,376	0,1401
6	BARRIO SAN ANTONIO	6,034	0,1307
7	BARRIO GERMAN BUSCH	11,484	0,1374
8	BARRIO LOS CHAPACOS	8,620	0,1349
9	BARRIO PANAMERICANO	8,238	0,1344
10	BARRIO 3 DE MAYO	8,257	0,1344
11	BARRIO LOS OLIVOS	4,994	0,1280
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	4,093	0,1246
13	BARRIO JUAN PABLO II	3,481	0,1215
14	BARRIO LIBERTAD	6,741	0,1321
15	BARRIO SAN PEDRO	7,073	0,1327
16	BARRIO SAN JORGE II	5,512	0,1294
17	BARRIO SAN GERONIMO	6,660	0,1320
18	BARRIO MORROS BLANCOS	6,063	0,1308
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	6,991	0,1326
20	BARRIO SAN LUIS	6,987	0,1326
21	BARRIO SAN JORGE I	7,404	0,1332
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	7,555	0,1335
23	BARRIO FABRIL	8,107	0,1342
24	BARRIO LOURDES	8,537	0,1348
25	BARRIO ANDALUZ	8,379	0,1346
26	BARRIO 2 DE MAYO	8,647	0,1349
27	BARRIO CONSTRUCTOR	9,463	0,136
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	9,390	0,136
29	BARRIO SAN BERNARDO	10,102	0,136
30	BARRIO LA FLORIDA	10,451	0,137

4.4 Comparación con otros autores.

Terzaghi, y Peck (1967) Para arcillas inalteradas:

$$C_c = 0,009(LL - 10)$$

Tabla 7). Comparación con terzaghi

Nº	barrios de la ciudad de Tarija	LL	C.c.	C.c=0.009(L.L.-10)
1	BARRIO TABLADITA II	38,377	0,1389	0,2554
2	BARRIO TABLADITA I	39,485	0,1400	0,2654
3	BARRIO ALTO SENAC	29,991	0,1304	0,1799
4	BARRIO CATEDRAL	31,030	0,1315	0,1893
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	41,184	0,1415	0,2807
6	BARRIO SAN ANTONIO	31,680	0,1322	0,1951
7	BARRIO GERMAN BUSCH	42,259	0,1425	0,2903
8	BARRIO LOS CHAPACOS	31,011	0,1315	0,1891
9	BARRIO PANAMERICANO	34,345	0,1350	0,2191
10	BARRIO 3 DE MAYO	32,213	0,1328	0,1999
11	BARRIO LOS OLIVOS	24,143	0,1238	0,1273
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	25,492	0,1254	0,1394
13	BARRIO JUAN PABLO II	24,529	0,1243	0,1308
14	BARRIO LIBERTAD	28,065	0,1283	0,1626
15	BARRIO SAN PEDRO	29,347	0,1297	0,1741
16	BARRIO SAN JORGE II	30,820	0,1313	0,1874
17	BARRIO SAN GERONIMO	29,937	0,1304	0,1794
18	BARRIO MORROS BLANCOS	32,109	0,1327	0,1990
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	34,720	0,1353	0,2225
20	BARRIO SAN LUIS	36,024	0,1366	0,2342
21	BARRIO SAN JORGE I	30,450	0,1309	0,1840
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	31,317	0,1318	0,1918
23	BARRIO FABRIL	33,548	0,1342	0,2119
24	BARRIO LOURDES	34,205	0,1348	0,2178
25	BARRIO ANDALUZ	32,267	0,1328	0,2004
26	BARRIO 2 DE MAYO	35,515	0,1361	0,2296
27	BARRIO CONSTRUCTOR	35,223	0,1358	0,2270
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	35,881	0,1365	0,2329
29	BARRIO SAN BERNARDO	40,295	0,1407	0,2727
30	BARRIO LA FLORIDA	42,838	0,1430	0,2955

Resumen Estadístico

	$C.c. = 1/(14,11 - 1,89*\ln(L.L.))$	$C.c=0.009(L.L.-10)$
Recuento	30	30
Promedio	0,13369	0,209483
Desviación Estándar	0,00500547	0,0440579
Coficiente de Variación	3,74409%	21,0317%
Mínimo	0,1238	0,1273
Máximo	0,143	0,2955
Rango	0,0192	0,1682
Sesgo Estandarizado	0,0377042	0,437293
Curtosis Estandarizada	-0,274866	-0,313686

Esta tabla contiene el resumen estadístico para las dos muestras de datos.

- Prueba para comparar medias

Hipótesis nula: $media1 = media2$

Hipótesis Alt.: $media1 \neq media2$

Suponiendo varianzas iguales: $t = -9,36231$ valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

- Prueba para comparar Desviaciones Estándar

Hipótesis Nula: $\sigma1 = \sigma2$

Hipótesis Alt.: $\sigma1 \neq \sigma2$

$F = 0,0129075$ valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Nagaraj y Murty (1985) expresaron el índice de compresión como:

$$Cc = (LL - 13)/109$$

Tabla 8). Comparación con Nagaraj y Murty.

Nº	barrios de la ciudad de Tarija	LL	C.c.	Cc=(LL-13)/109
1	BARRIO TABLADITA II	38,377	0,1389	0,2328
2	BARRIO TABLADITA I	39,485	0,1400	0,2430
3	BARRIO ALTO SENAC	29,991	0,1304	0,1559
4	BARRIO CATEDRAL	31,030	0,1315	0,1654
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	41,184	0,1415	0,2586
6	BARRIO SAN ANTONIO	31,680	0,1322	0,1714
7	BARRIO GERMAN BUSCH	42,259	0,1425	0,2684
8	BARRIO LOS CHAPACOS	31,011	0,1315	0,1652
9	BARRIO PANAMERICANO	34,345	0,1350	0,1958
10	BARRIO 3 DE MAYO	32,213	0,1328	0,1763
11	BARRIO LOS OLIVOS	24,143	0,1238	0,1022
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	25,492	0,1254	0,1146
13	BARRIO JUAN PABLO II	24,529	0,1243	0,1058
14	BARRIO LIBERTAD	28,065	0,1283	0,1382
15	BARRIO SAN PEDRO	29,347	0,1297	0,1500
16	BARRIO SAN JORGE II	30,820	0,1313	0,1635
17	BARRIO SAN GERONIMO	29,937	0,1304	0,1554
18	BARRIO MORROS BLANCOS	32,109	0,1327	0,1753
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	34,720	0,1353	0,1993
20	BARRIO SAN LUIS	36,024	0,1366	0,2112
21	BARRIO SAN JORGE I	30,450	0,1309	0,1601
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	31,317	0,1318	0,1680
23	BARRIO FABRIL	33,548	0,1342	0,1885
24	BARRIO LOURDES	34,205	0,1348	0,1945
25	BARRIO ANDALUZ	32,267	0,1328	0,1768
26	BARRIO 2 DE MAYO	35,515	0,1361	0,2066
27	BARRIO CONSTRUCTOR	35,223	0,1358	0,2039
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	35,881	0,1365	0,2099
29	BARRIO SAN BERNARDO	40,295	0,1407	0,2504
30	BARRIO LA FLORIDA	42,838	0,1430	0,2737

Resumen Estadístico

	$C.c. = 1/(14,11 - 1,89*\ln(L.L.))$	$Cc=(LL-13)/109$
Recuento	30	30
Promedio	0,13369	0,186023
Desviación Estándar	0,00500547	0,0449064
Coficiente de Variación	3,74409%	24,1402%
Mínimo	0,1238	0,1022
Máximo	0,143	0,2737
Rango	0,0192	0,1715
Sesgo Estandarizado	0,0377042	0,435085
Curtosis Estandarizada	-0,274866	-0,312629

- Prueba para comparar medias

Hipótesis nula: $\mu_1 = \mu_2$

Hipótesis Alt.: $\mu_1 \neq \mu_2$

Suponiendo varianzas iguales: $t = -6,3438$ valor-P = $3,67139E-8$

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

- Prueba para comparar Desviaciones Estándar

Hipótesis Nula: $\sigma_1 = \sigma_2$

Hipótesis Alt.: $\sigma_1 \neq \sigma_2$

$F = 0,0124243$ valor-P = **0**

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Azzouz et.al. (1976) Todas las arcillas con limite menor de 100%

$$C_c = 0,006(LL - 9)$$

Tabla 9). Comparación con Azzouz et.al.

Nº	barrios de la ciudad de Tarija	LL	C.c.	Cc=0,006(LL-9)
1	BARRIO TABLADITA II	38,377	0,1389	0,1763
2	BARRIO TABLADITA I	39,485	0,1400	0,1829
3	BARRIO ALTO SENAC	29,991	0,1304	0,1259
4	BARRIO CATEDRAL	31,030	0,1315	0,1322
5	BARRIO LUIS DE FUENTES	41,184	0,1415	0,1931
6	BARRIO SAN ANTONIO	31,680	0,1322	0,1361
7	BARRIO GERMAN BUSCH	42,259	0,1425	0,1996
8	BARRIO LOS CHAPACOS	31,011	0,1315	0,1321
9	BARRIO PANAMERICANO	34,345	0,1350	0,1521
10	BARRIO 3 DE MAYO	32,213	0,1328	0,1393
11	BARRIO LOS OLIVOS	24,143	0,1238	0,0909
12	BARRIO DEFENSORES DEL CHACO	25,492	0,1254	0,0990
13	BARRIO JUAN PABLO II	24,529	0,1243	0,0932
14	BARRIO LIBERTAD	28,065	0,1283	0,1144
15	BARRIO SAN PEDRO	29,347	0,1297	0,1221
16	BARRIO SAN JORGE II	30,820	0,1313	0,1309
17	BARRIO SAN GERONIMO	29,937	0,1304	0,1256
18	BARRIO MORROS BLANCOS	32,109	0,1327	0,1387
19	BARRIO SIMON BOLIVAR	34,720	0,1353	0,1543
20	BARRIO SAN LUIS	36,024	0,1366	0,1621
21	BARRIO SAN JORGE I	30,450	0,1309	0,1287
22	BARRIO BARTOLOME ATTAR	31,317	0,1318	0,1339
23	BARRIO FABRIL	33,548	0,1342	0,1473
24	BARRIO LOURDES	34,205	0,1348	0,1512
25	BARRIO ANDALUZ	32,267	0,1328	0,1396
26	BARRIO 2 DE MAYO	35,515	0,1361	0,1591
27	BARRIO CONSTRUCTOR	35,223	0,1358	0,1573
28	BARRIO PEDRO ANTONIO FLORES	35,881	0,1365	0,1613
29	BARRIO SAN BERNARDO	40,295	0,1407	0,1878
30	BARRIO LA FLORIDA	42,838	0,1430	0,2030

Resumen Estadístico

	$C.c. = 1/(14,11 - 1,89*\ln(L.L.))$	$Cc=0,006(LL-9)$
Recuento	30	30
Promedio	0,13369	0,145667
Desviación Estándar	0,00500547	0,0293661
Coefficiente de Variación	3,74409%	20,1598%
Mínimo	0,1238	0,0909
Máximo	0,143	0,203
Rango	0,0192	0,1121
Sesgo Estandarizado	0,0377042	0,438486
Curtosis Estandarizada	-0,274866	-0,31304

- Prueba para comparar medias

Hipótesis nula: $media1 = media2$

Hipótesis Alt.: $media1 \neq media2$

Suponiendo varianzas iguales: $t = -2,20207$ valor-P = 0,0316504

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

- Prueba para comparar Desviaciones Estándar

Hipótesis Nula: $\sigma1 = \sigma2$

Hipótesis Alt.: $\sigma1 \neq \sigma2$

$F = 0,0290534$ valor-P = 0

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

La principal diferencia de las correlaciones determinadas por otros autores es el rango de los valores utilizados.

En la comparación de medias y desviaciones típicas la fórmula de Azzouz et.al. Nos arroja un valor de probabilidad más cercana a la significancia de 5 %.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES

Para determinar la ecuación que tenga el mejor ajuste entre las variables, fue necesaria la ayuda del programa “Statgraphics”

“Determinación experimental del índice de compresión en las arcillas y la correlación con las características plásticas de los suelos.”

- Se llegó a cumplir el objetivo principal proponiendo una correlación para la obtención del índice de compresión de las arcillas presentando ecuaciones en función de las características plásticas de los suelos.
- El índice de compresión aumenta conforme lo hace el límite líquido, lo cual permite observar que este parámetro influye directamente en la compresibilidad de los suelos.
- El uso de correlaciones empíricas entre los parámetros de compresibilidad y las propiedades índice permiten predecir el valor del asentamiento que se producirá en un sitio, siendo esto de gran utilidad en la práctica de la ingeniería.
- Comparando los resultados de las correlaciones presentadas, para obtener el índice de compresión, se ha demostrado que el límite líquido presenta la mejor relación, con un coeficiente de correlación de 0.871 y la siguiente ecuación:

$$C. c = \frac{1}{(14,1148 - 1,89612 * \ln(L. L.))}$$

Con un valor de $R^2=75,84\%$ esto describe que hay un buen ajuste y un coeficiente $r = 0,871$

- En la comparación de la correlación obtenida y las fórmulas de índice de compresión del autor Azzouz et.al. ($C_c=0,006(LL-9)$), Nos arroja un valor de probabilidad $P = 0,0316504$ la cual es la fórmula que más cercana está la significancia de 5 %.

- Los resultados obtenidos con las ecuaciones deberán tomarse como un valor estimativo que no sustituye las pruebas que deben hacerse para obtener un análisis definitivo del índice de compresión.

5.2 RECOMENDACIONES

- Es primordial que la muestra éste bajo condiciones adecuadas, en su extracción, manejo y transporte. Debido que la muestra al perder humedad no reflejará las propiedades reales del suelo in situ; y como consecuencia, los ensayos no serán los esperados.
- Utilizar los instrumentos adecuados para la manipulación y preparación de la muestra, previos a la realización del ensayo, ya que una muestra bien preparada refleja la exactitud y confiabilidad de los resultados.
- Procurar la calibración, mantenimiento y cuidado del equipo de laboratorio para la elaboración de los ensayos; de este modo se asegura una adecuada obtención de datos.
- Revisar el consolidómetro antes de su uso para asegurarse que cuente con todos sus accesorios y cargas necesarias y así proceder a su uso.
- Utilizar papel filtro en la muestra que se encuentra en el anillo y así evitar pérdida de la muestra.
- Recopilar información de compresibilidad y las características plásticas de los suelos y verificar la aplicabilidad de las correlaciones obtenidas.
- Con la presente investigación presenta un aspecto de aplicación sobre el índice de compresión, no siendo ésta una limitante para futuros estudios para ampliar el rango de aplicación o apoyo a similares proyectos.