



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO A ESCALA REDUCIDA EN UNA  
CIMENTACIÓN SUPERFICIAL PARA EL ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE  
BALASTO**

**ANDRÉS CAMILO CONTRERAS CÓDIGO: 503772**  
**JHIMER ANDRES QUIÑONES CÓDIGO: 506487**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**  
**BOGOTA D.C.**  
**2020**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO A ESCALA REDUCIDA EN UNA  
CIMENTACIÓN SUPERFICIAL PARA EL ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE  
BALASTO**

**ANDRÉS CAMILO CONTRERAS TORRES CÓDIGO: 503772  
JHIMER ANDRES QUIÑONES CÓDIGO: 506487**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero civil**

**Director  
JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS  
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
MODALIDAD INVESTIGACION  
BOGOTA D.C.  
2020**



## Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Compartir bajo la Misma Licencia** — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

Bogotá, 17, diciembre, 2020

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 10 |
| 2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....                                    | 12 |
| 3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....                         | 16 |
| 3.1. PROBLEMA .....  | 16 |
| 4. MARCO DE REFERENCIA.....  | 18 |
| 4.1. MARCO TEORICO .....   | 18 |
| 4.1.1. CIMENTACIÓN.....  | 18 |
| 4.1.2. CAPACIDAD ÚLTIMA DE CARGA.....                                    | 19 |
| 4.1.3. ENSAYO DE PLACA DE CARGA.....                                     | 19 |
| 4.1.4. PARÁMETROS ELÁSTICOS PARA EL ESFUERZO UNIAXIAL.....               | 21 |
| 4.1.5. LEY DE HOOKE.....   | 22 |
| 4.1.6. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN CARGAS PUNTUALES POR BOUSSINEQS..... | 23 |
| 4.1.7. CONCEPTO DE BULBO DE PRESIÓN.....                                 | 23 |
| 4.2. MARCO CONCEPTUAL.....   | 29 |
| 5. OBJETIVOS .....   | 31 |
| 5.1. GENERAL .....   | 31 |
| 5.2. ESPECÍFICOS .....   | 31 |
| 6. ALCANCES Y LIMITACIONES.....  | 32 |
| 7. PROTOCOLO DE BIOSEGURIDAD POR COVID-19 .....                          | 33 |
| 8. METODOLOGÍA.....  | 34 |
| 8.1. EN EL LABORATORIO .....   | 34 |
| 8.2. DIAGRAMA DE PROCEDIMIENTO DE PRACTICA EN LABORATORIO..              | 35 |
| 8.3. PRESUPUESTOS DEL TRABAJO Y RECURSOS FINANCIEROS .....               | 36 |
| 8.4. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA .....                                 | 37 |
| 8.5. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE PARTÍCULAS DE LA MUESTRA.....             | 39 |
| 8.6. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS PARA EL MONTAJE DEL ENSAYO .....             | 44 |
| 8.6.1. PRENSA HIDRÁULICA.....  | 44 |
| 8.6.2. PLACA DE SOPORTE .....  | 45 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 8.6.3. | DISEÑO Y FABRICACIÓN DE CÁMARA DE MUESTRA.....                 | 46 |
| 8.6.4. | OTROS ELEMENTOS DEL MONTAJE .....                              | 49 |
| 8.7.   | PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE PLACA DE CARGA EN LABORATORIO ..... | 51 |
| 8.7.1. | PROTOCOLO COVID .....  | 51 |
| 8.7.2. | PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE ESPECIMEN.....                    | 51 |
| 8.7.3. | MONTAJE DE CÁMARA DE CARGA EN PRENSA UNIVERSAL .....           | 53 |
| 8.7.4. | INSTALACIÓN DE DIALES DE MEDICIÓN .....                        | 55 |
| 8.7.5. | APLICACIÓN DE CARGA Y REGISTRO DE DEFORMACIONES .....          | 56 |
| 8.7.6. | INFORME DE LABORATORIO.....                                    | 58 |
| 9.     | RESULTADOS .....   | 61 |
| 9.1.1. | ENSAYO N°1 .....   | 61 |
| 9.1.2. | ENSAYO N°2 .....   | 61 |
| 9.1.3. | ENSAYO N°3 .....   | 61 |
| 9.1.4. | ENSAYO N°4 .....   | 62 |
| 9.1.5. | ENSAYO N°5 .....   | 62 |
| 9.1.6. | ENSAYO N°6 .....   | 63 |
| 10.    | ANÁLISIS DE RESULTADOS.....                                    | 64 |
| 11.    | CONCLUSIONES.....  | 71 |
| 12.    | RECOMENDACIONES.....   | 73 |
| 14.    | BIBLIOGRAFÍA .....   | 74 |
| 15.    | ANEXOS .....   | 77 |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1. Comportamiento cimentación flexible.....                    | 21 |
| Ilustración 2. REPRESENTACIÓN BULBO DE PRESION.....                        | 24 |
| Ilustración 3. Bulbo de presión .....                                      | 25 |
| Ilustración 4. DIAGRAMA DE METODOLOGÍA PARA ENSAYO.....                    | 35 |
| Ilustración 5. MEZCLA GRANULO MÉTRICA.....                                 | 37 |
| Ilustración 6.CAUCE RÍO GUAYURIBA. ....                                    | 38 |
| Ilustración 7. CUENCA RÍO GUAYURIBA ENTRE ACACÍAS Y VILLAVICENCIO..        | 39 |
| Ilustración 8.GRÁFICA CURVA GRANULOMÉTRICA COMPARATIVA MUESTRA-MDC25.....  | 41 |
| Ilustración 9. GRÁFICA CURVA GRANULOMÉTRICA COMPARATIVA MUESTRA-SGB38..... | 42 |
| Ilustración 10. PRENSA MARSHALL, PRENSA MANUAL Y MANÓMETRO. ....           | 45 |
| Ilustración 11. PRENSA PLACAS DE CARGA.....                                | 46 |
| Ilustración 12. CÁMARA DE CARGA.....                                       | 47 |
| Ilustración 13. CÁMARA DE CARGA ISOMÉTRICO. ....                           | 48 |
| Ilustración 14. PLANO CÁMARA DE CARGA ANTES DE MODIFICACIÓN.....           | 49 |
| Ilustración 15. COMPARADORES DE CARATULA Y PISÓN DE COMPACTACION.....      | 50 |
| Ilustración 16. PREPARACION DE LAMUESTRA. ....                             | 52 |
| Ilustración 17. MONTAJE DE CAMARA DE CARGA EN PRENSA MARSHALL. ....        | 53 |
| Ilustración 18. MONTAJE DE COMPARADORES DE CARÁTULA.....                   | 55 |
| Ilustración 19. APLICACIÓN DE CARGAS DEL MATERIAL. ....                    | 57 |
| Ilustración 21. PROCESO DE CARGA. ....                                     | 60 |
| Ilustración 22. GRÁFICA TENSIÓN VS DEFLEXIÓN. ....                         | 65 |
| Ilustración 23. GRÁFICA $K_s$ VS CICLO DE CARGA. ....                      | 67 |
| Ilustración 24. GRÁFICA DEFORMACION VS CICLO DE CARGA. ....                | 69 |
| Ilustración 25. GRÁFICA TENSIÓN POR UNIDAD VS CICLO DE CARGA.....          | 70 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. VALORES KS PARA SUELOS GRANULARES. ....         | 26 |
| Tabla 2. VALORES DE KS PARA SUELOS ARENOSOS.....         | 27 |
| Tabla 3. PRESUPUESTO .....                               | 36 |
| Tabla 4. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA. .... | 40 |
| Tabla 5.NORMAS Y ESPECIFICACIONES. Art. 320. ....        | 43 |
| Tabla 6.CONDICIONES DE ENSAYO .....                      | 60 |
| Tabla 7.CONDICIONES DE MUESTRAS.....                     | 66 |



## LISTA DE ANEXOS

|   |     |
|---|-----|
| Anexo A. Calculo ensayo N°1. ....                               | 77  |
| Anexo B. Calculo ensayo N°2. ....                               | 79  |
| Anexo C. Cálculos ensayos N°3. ....                             | 81  |
| Anexo D. Cálculos ensayos N°4. ....                             | 83  |
| Anexo E. Cálculos ensayos N°5. ....                             | 84  |
| Anexo F. Cálculos ensayos N°6. ....                             | 86  |
| Anexo G. Gráfica tensión normal vs deformación ensayo N°1. .... | 88  |
| Anexo H. Gráfica tensión normal vs deformación ensayo N°2. .... | 89  |
| Anexo I. Gráfica tensión normal vs deformación ensayo N°3. .... | 90  |
| Anexo J. Gráfica tensión normal vs deformación ensayo N°4. .... | 91  |
| Anexo K. Gráfica tensión normal vs deformación ensayo N°5. .... | 92  |
| Anexo L. Gráfica tensión normal vs deformación ensayo N°6. .... | 93  |
| Anexo M. Ensayo granulométrico arenas. ....                     | 94  |
| Anexo N. Ensayo equivalencia de arena promedio. ....            | 95  |
| Anexo O. Determinación azul de metileno para arenas. ....       | 95  |
| Anexo P. Partículas fracturadas en un agregado grueso. ....     | 96  |
| Anexo Q. Contenido de vacíos en agregado fino. ....             | 96  |
| Anexo R. Índice de aplanamiento y alargamiento. ....            | 97  |
| Anexo S. Equivalente de arena promedio. ....                    | 98  |
| Anexo T. Azul de metileno en agregados finos. ....              | 98  |
| Anexo U. Resistencia al desgaste. ....                          | 99  |
| Anexo V. Resistencia del agregado grueso al desgaste. ....      | 99  |
| Anexo W. Determinación del valor de finos. ....                 | 100 |
| Anexo X. Solidez de los agregados. ....                         | 101 |

## 1. INTRODUCCIÓN

En la ingeniería civil el suelo es la base de las construcciones, por esto al momento de realizar un proyecto de construcción se debe tener en cuenta que el suelo necesitará soportar las cargas de la estructura o tener un tipo de apoyo en este y se encargará de brindar a la estructura resistencia y estabilidad, por esto se debe cerciorar que el suelo se encuentre en condiciones óptimas y realizar un respectivo estudio del mismo para determinar sus propiedades y capacidad, teniendo en cuenta el tipo de proyecto que se quiera realizar.

El apoyo de la estructura con el suelo se realiza a partir de las fundaciones, las cuales son la base que se encarga de soportar la superestructura y repartir las cargas. este sistema suelo fundación, abarca una serie de constantes, entre estas encontramos la constante de resorte o coeficiente de balasto, el cual se encarga de determinar por unidad de área la deformidad que las estructuras térreas, como lo son cimientos, pavimentos, vías férreas, entre otras, transmiten verticalmente al terreno.

El coeficiente de balasto ( $k_s$ ), también es conocido como coeficiente de reacción de subrasante o coeficiente de resorte, es un factor que determina el asentamiento que puede tener una estructura, el  $K_s$  relaciona la presión a la que está sometido un suelo de fundación y la deformación que se produce en ese mismo suelo, es así como el ingeniero diseñador adopta el  $K_s$  como parámetro de entrada para diseño de las dimensiones de su cimentación con el fin de soportar las cargas requeridas. El ensayo de plato de carga es un ensayo patronado que permite establecer *in situ* el  $K_s$  de un suelo, mediante el uso de platos

metálicos con dimensiones estandarizadas y la aplicación de cargas ya establecidas que permiten determinar cuál será el asentamiento de un suelo de fundación, este es el método más confiable en la actualidad para establecer un  $K_s$  para una fundación.

## 2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El coeficiente de balasto ( $k_s$ ) ha sido un tema recurrente de estudio, con el cual se busca determinar las reacciones que puede tener el terreno al recibir una serie de cargas externas, y puede ser realizado a través de diferentes métodos. Estos han sido evaluados, estudiados y comparados, intentando determinar cuál de ellos es más verídico.

Tomamos en cuenta una serie de antecedentes de estudios que se realizaron para determinar el coeficiente por medio teórico, experiencias investigativas y revisiones teóricas, para documentar acerca del tema, pero se ahondará en un único artículo sobre ensayo de placa de carga en laboratorio, el cual se acerca más al planteamiento de nuestra investigación.

Manuel Freire, en su artículo “Precisiones para el empleo del método del módulo de balasto en edificación” (1999), busca determinar a partir del coeficiente de balasto, la deformación que transmiten las edificaciones al suelo, a través de diferentes métodos, entre los cuales se encuentran:

- Tabulaciones publicadas: Terzaghi (1955). Bowles (1974), (1982), (1984). Dept. of Navy, (1982). Kramrish (1984).
- Ensayos de placa de carga: Terzaghi (1955). Sowers (1977)
- Estimación por ensayo de laboratorio o in situ: ACI 336 2R-88
- Uso mixto: Ulrich (1988). Banavalkar y Ulrich (1984). Focht et al (1978)

A partir de las formulaciones de cada método para la determinación del coeficiente de balasto, espera contrastar y hallar su correcta aplicación teniendo en cuenta el tipo de terreno y el cimiento.

Kenedy Socualaya (2017), en su trabajo “Caracterización de suelos para la obtención de coeficiente de balasto”, busca determinar las propiedades físicas y químicas del suelo, por medio de ensayos de laboratorio comunes, como cono de arena, contenido de humedad, límite plástico, límite líquido, entre otros, teniendo como ensayo base para la determinación del coeficiente de balasto el nomograma de la curva logarítmica del CBR. A partir de este estudio, logra determinar que el coeficiente de balasto, se ve directamente afectado por las características del suelo dónde se realicen los ensayos, y así mismo, recomienda que la forma correcta de determinar el coeficiente de balasto es mediante la realización del ensayo de campo y no mediante cálculos teóricos, ya que estos tienden a alejarse de los datos experimentales.

Acevedo Trujillo (2017), en su investigación “Determinación del módulo de reacción (k) para el conjunto de capa triturada y sub-rasante”, plantea la caracterización del suelo mediante el ensayo de placa de carga, para analizar la sub-rasante triturada y comparar a su vez las deformaciones que el suelo tiene cuando se realiza la prueba con diferentes espesores y materiales en este. Al igual que Kenedy Socualaya (2017), Acevedo afirma que los valores hallados a través métodos empíricos son diferentes a los obtenidos experimentalmente, y por esto ratifica que los ensayos de campo son más confiables que los teóricos.

De la bibliografía consultada para determinar el coeficiente de balasto por medio de placa de carga, hallamos artículos que hablan de distintos métodos para realizar el cálculo y de las diferentes formas y equipos para realizar el ensayo en campo, como se mencionó anteriormente; teniendo en cuenta que nuestro objetivo es realizar el ensayo de placa en laboratorio, se buscó consolidar las bases teóricas que sustentaran nuestro propósito, pero no fue posible, ya que la información es muy vaga o casi nula, sin embargo se encontró un estudio exploratorio donde realizan el ensayo en laboratorio semejante al que se llevara a cabo en el presente proyecto.

Jonathan G. Cortés Mena (2010) “Estudio exploratorio para la determinación del coeficiente de balasto a partir de ensayos en laboratorio para suelos cohesivos”.

El objetivo de este proyecto fue determinar el coeficiente de balasto por medio de un ensayo de placa de carga en campo, laboratorio, CBR y otros métodos teóricos sobre una misma muestra de suelo y así comparar los resultados. Propuso un modelo de ensayo en laboratorio (carga uniaxial) con muestras inalteradas, buscando que estas mantuvieran las mismas propiedades físicas y químicas del suelo del ensayo en campo. Dentro del proceso en laboratorio se utilizó un odómetro para contener la muestra, una placa común diámetro de 12,5 cm, 3 deformímetros y el gato hidráulico, encargado de aplicar la carga. Al realizar la comparación de los resultados obtenidos en cada método, encontraron que el valor en laboratorio es dos veces mayor que el coeficiente en campo y suponen que esto se debe al proceso que se le realizó a la muestra en el momento de toma y tratamiento para el ensayo

en laboratorio, el cual alteró las propiedades físicas y químicas de esta, llegan a la conclusión que es necesario realizar más investigaciones para realizar este método.

El proceso de diseño de una cimentación normalmente se ve limitado por el acceso a la información de la caracterización del suelo de fundación de la estructura, algunos ejemplos que justifican la falta de información en el diseño de una cimentación son: la etapa de diseño de la ingeniería corresponde a estudios básicos que no contemplan una gran inversión en investigación geotécnica, por dificultades en acceso al lugar de la construcción del proyecto para llevar equipos avanzados, alto costos de los ensayos geotécnicos. Tiempos demasiados largos de ejecución de ensayos que retrasan la entrega de la información que permita al ingeniero estructural contar con un KS confiable para el diseño de su cimentación.

### **3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **3.1. PROBLEMA**

Se ha identificado que para trabajos relacionados con la construcción de vías y edificaciones no existe un procedimiento académico que pueda orientar a los futuros profesionales de la ingeniería en la aplicación de un método para hallar la resistencia de una estructura subrasante en situ, lo anterior debido a costos relacionados con los equipos utilizados en campo para evaluar este coeficiente es por eso que mediante la investigación propuesta se busca establecer sentar las bases para implementar para la academia un ensayo de placa de carga a escala en laboratorio que determine el coeficiente de Balasto “K” de un suelo de fundación.

Cuando el ingeniero civil busca determinar un  $K_s$  o coeficiente de Balasto puede encontrarse con diferentes métodos numéricos o analíticos que apoyándose en ensayos de campo le permiten resolver el problema de aproximarse a una definición del comportamiento elástico para un suelo según un elemento de cimentación que transmitirá cargas.

Cuando el ingeniero busca hacer un estudio de cimentaciones se encuentra con el problema de establecer un parámetro de coeficiente de balasto ( $K_s$ ), según MUZAS (2002) si el ingeniero realiza el análisis del problema utilizando las herramientas del computador y software de análisis normalmente aplica unas recomendaciones que de  $K_s$  que entrega la compañía que elaboro el software basándose en ensayos que evalúan las propiedades del terreno, pero como afirma MUZAS (2002) lo que se debe tener en cuenta es que el  $K_s$  no es una característica constante del terreno sino que este valor depende de otras variables como



tipo y geometría de fundación, las cargas transmitidas a la fundación, dirección de las fuerzas; estas variables se convierten en un problema y su respuesta no depende del software del diseño y sus recomendaciones sino de la interpretación del ingeniero y modelo matemático aplicado para su resolución.

#### **4. MARCO DE REFERENCIA MARCO TEORICO**

Como explica BRAJA.DAS (2001) la importancia del diseño de la cimentación para una estructura, radica en que esta sea capaz de no sobre esforzar el suelo sobre el que se apoya, el mal diseño de una cimentación puede ocasionar un excesivo asentamiento o una falla cortante del suelo, lo que ocasionaría daños a la estructura. Los distintos tipos de cimentación como: zapatas aisladas, losas de cimentación, pilotes o pilas perforadas, son alternativas que un ingeniero puede diseñar según los requerimientos de la estructura que se quiere soportar y del suelo sobre el que se apoyará dicha cimentación. En esta investigación se realizará un acercamiento a la interacción de la cimentación y el suelo para una zapata aislada como caso de estudio.

##### **4.1.1. CIMENTACIÓN**

Se llama cimentación a la parte más baja de una estructura, la cual está encargada de transferir las cargas de la estructura al suelo sobre el que esta descansa BRAJA.DAS (2001), una cimentación es un diseño de ingeniería, cuyo propósito es evitar que las cargas estructurales tengan contacto directo con el suelo, ya que dependiendo de su consistencia, variación de estratos, propiedades mecánicas y físicas, nivel freático, capacidad portante, entre otros, puede variar su comportamiento, pudiendo hacer que este tenga un asentamiento excesivo o sobrecarga y por lo tanto, se llegue a la falla ocasionando daños en la estructura, que se pueden presentar a corto tiempo. Por esto se llega a la conclusión de realizar cimentaciones, las cuales buscan transferir las cargas estructurales a través del suelo por medio de un estudio geotécnico del mismo, que permite identificar el tipo de suelo, la profundidad de la cimentación, el tipo de cimentación y las dimensiones de la

misma, garantizando de este modo que las cargas de la estructura sean transmitidas de una forma equilibrada.

#### **4.1.2. CAPACIDAD ÚLTIMA DE CARGA**

Terzaghi (1943) presentó por primera vez una teoría para evaluar la capacidad última de carga, en la que argumenta que si una profundidad  $D_f$  es igual o menor al ancho de la cimentación ( $B$ ), esta será determinada como cimentación poco profunda. Posteriormente a los argumentos presentados por Terzaghi, una serie de investigadores sugirieron que las cimentaciones con  $D_f$  igual a 3 o 4 veces el ancho de la cimentación se denominarían cimentaciones poco profundas.

#### **4.1.3. ENSAYO DE PLACA DE CARGA**

Este ensayo se lleva a cabo por medio de una serie de cargas sobre una placa rígida, la cual estará apoyada sobre la superficie del terreno, ayudando a determinar la carga última ( $q_u$ ) que este puede llegar a resistir e indica el coeficiente de balasto ( $K_s$ ) o la deformabilidad que este puede llegar a tener de forma directa. El ensayo de placa de carga debe realizarse teniendo en cuenta el método cimentación flexibles de Winkler, Jonathan G. Cortes (2010) asegura que al momento de realizar el respectivo ensayo de placa, esta debe mantenerse rígida para que el asentamiento sea equilibrado, ya que si la carga que se aplica a la placa no es correctamente distribuida, el coeficiente de balasto  $k_s$  será incorrecto, debido a que los esfuerzos transmitidos al terreno no serán equilibrados y generarán una variación en la determinación del coeficiente.

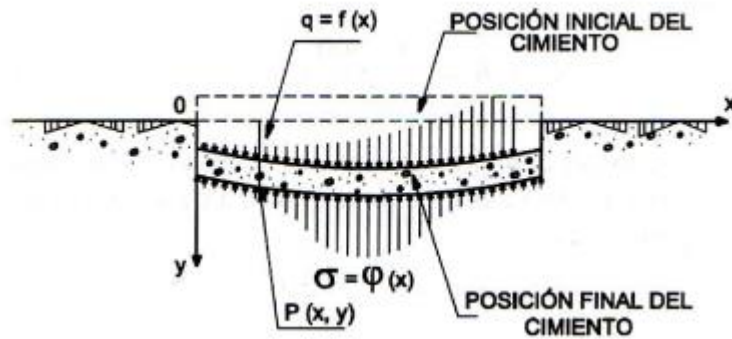
El estudio del comportamiento del conjunto suelo-cimentación tiene su origen según FREIRE (2000) en los estudios que llevó a cabo el ingeniero Winkler en el año de 1867,

donde planteó un modelo lineal que expresa el suelo como un conjunto infinito de muelles susceptibles a la presión de contacto generada por una viga o elemento horizontal que tiene la característica de ser deformable, OTALVARO Y NACLARES (2008) explican que el concepto de muelles o resortes que propuso WINKLER, representan el coeficiente de reacción del suelo o subrasante como  $K_s$  y que tal coeficiente se obtiene de la relación de la carga  $P$  ejercida por el elemento horizontal y el asentamiento o deformación que sufre la subrasante  $W$ , entonces para efectos de interpretación, la ecuación formulada por Winkler se puede escribir de la siguiente manera:

$$K_s = \frac{q}{W}$$

El estudio de  $k_s$  de Winkler (1867) fue usado por el ingeniero Zimmermann como un caso aplicado a la mecánica para analizar los esfuerzos en la interacción de las vigas transversas de los ferrocarriles apoyados sobre material granular o balasto (Ilustración 1), las variables aplicadas en este análisis fueron: módulo de elasticidad de la viga, ancho y largo de la viga, momento de inercia de la viga, asentamiento de la viga, fuerza de corte vertical.

*Ilustración 1. Comportamiento cimentación flexible*



*Fuente. (calavera 2000)*

MUZAS (2002) afirma que es común que los métodos numéricos usen el método de WINKLER para la elección del coeficiente de balasto, pero que existen otros autores que han realizado aportes al estudio del  $K_s$  como lo hizo en su caso Karl Terzaghi en 1955, quien comienza a analizar elementos estructurales como vigas horizontales y estructuras verticales como pilotes, pantallas y tablestacas. Según lo anterior se puede diferenciar que WINKLER propuso el análisis  $K_s$  aplicado al diseño de cimentaciones flexibles desde un único punto de carga vertical y la deformación en el mismo punto del terreno. CORTEZ (2010) explica que Terzagui propone el análisis de elementos de distintas geometrías (ancho  $B$  y largo  $L$  de la cimentación) y con direcciones de  $k_s$  en sentido vertical y  $k_h$  en sentido horizontal, el trabajo de Terzagui se caracteriza por realizar utilizando unidades y por diferenciar su método para suelos cohesivos y para suelos granulares.

#### **4.1.4. PARÁMETROS ELÁSTICOS PARA EL ESFUERZO UNIAXIAL.**

Para poder interpretar lo que sucede cuando se deforma el suelo como consecuencia de la aplicación de una carga, podemos apoyarnos en la descripción hecha por Gutiérrez,

Hernández y Garnica (2018), donde se explica que la elasticidad de un material depende de dos parámetros que son el módulo de Young, que es la relación que existe entre un esfuerzo aplicado a un material y la deformación del mismo material, el comportamiento del material se describe por tres etapas o zonas que son la elástica, plástica y falla o rotura, la zona plástica se caracteriza por la capacidad del material para deformarse mientras está sometida a una carga y al suprimirse la carga recupera su forma inicial, con relación al coeficiente de Poisson debemos recordar que se puede interpretar como la relación entre la deformación horizontal y la deformación normal que sufre un material al momento de la aplicación de una carga. Es un requisito que el material sea homogéneo para que los únicos parámetros de elasticidad a evaluar sean el módulo de Young y la relación de Poisson.

#### **4.1.5. LEY DE HOOKE.**

Según Beer & Johnston (2009), es posible determinar la manera en que interactúan los esfuerzos normales y las deformaciones normales para un sólido elástico con iguales características isotrópicas, este comportamiento fue descrito por Robert Hooke mediante las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

Podemos identificar que para cada ecuación los valores de entrada al problema son módulo de Young y relación de Poisson, se aclara por parte Beer & Johnston (2009), que los esfuerzos cortantes no tienen efecto sobre las deformaciones normales.

#### 4.1.6. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN CARGAS PUNTUALES POR BOUSSINEQS

Esfuerzo vertical:

$$\sigma_z = \frac{3 P z^3}{2\pi \sqrt{r^2 + z^2}}$$

Esfuerzo radial:

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi} \left[ \frac{3 r^2 z}{\sqrt{r^2 + z^2}} - \frac{1 - 2\nu}{r^2 + z^2 + z\sqrt{r^2 + z^2}} \right]$$

Esfuerzo tangencial:

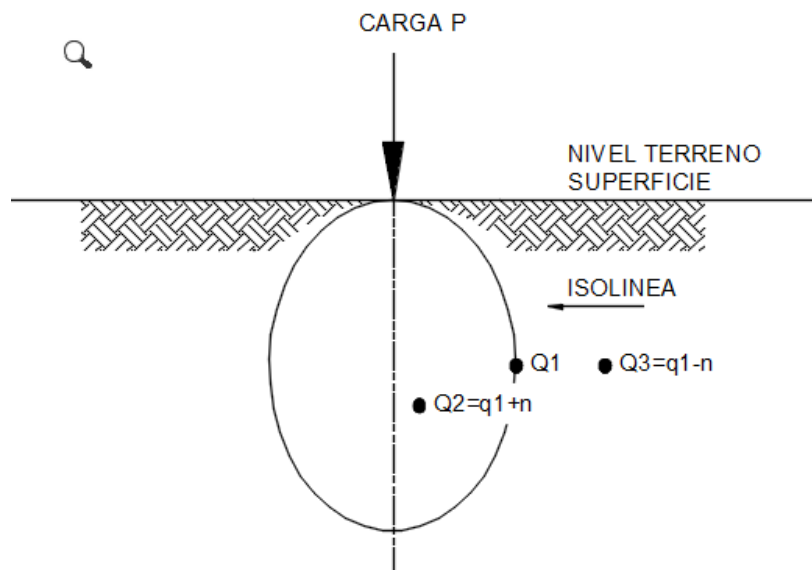
$$\sigma_t = -\frac{P}{2\pi} (1 - 2\nu) \left[ \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} - \frac{1}{r^2 + z^2 + z\sqrt{r^2 + z^2}} \right]$$

#### 4.1.7. CONCEPTO DE BULBO DE PRESIÓN.

Un bulbo de presiones es el área dentro de una figura alargada y redondeada formada por un conjunto de isobaras de esfuerzos o stress isobars, una isobara es un contorno de tensión representado por líneas que unen todos los puntos en la subrasante, en los que la presión vertical tiene la misma magnitud. Un conjunto de isobaras forma una gráfica a la que se le denomina bulbo de presiones. Teniendo en cuenta que la isobara representa una frontera para un esfuerzo de igual magnitud, todos los puntos que se encuentran fuera de esa

frontera formada por la isolínea representan cargas menores y todos los puntos que se encuentran dentro representan cargas mayores a la representada por la isobara que nos identifica la magnitud. Este Concepto fue propuesto por JOSEPH BOUSSINESQ (1842-1929), aplicado a un suelo medio homogéneo, elástico, isotrópico y limitado en uno de sus lados y que se extiende de manera infinita en sus otras direcciones.

*Ilustración 2. REPRESENTACIÓN BULBO DE PRESION.*



*Fuente. Los Autores.*

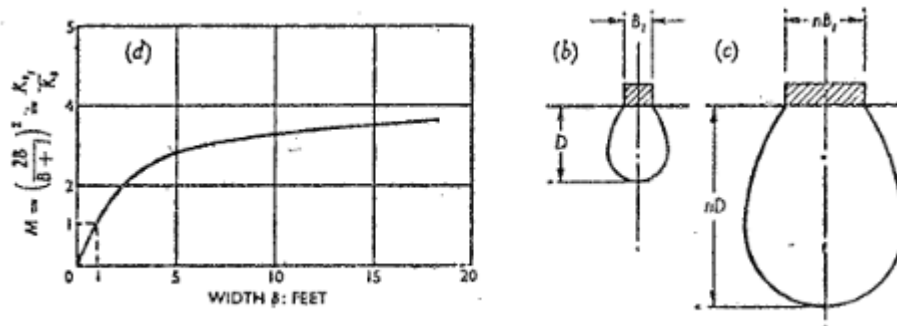
Terzagui (1955) realizó trabajos de investigación para determinar la reacción de subrasante en respuesta al momento flector ocasionados por una viga flexible, en estos trabajos se planteaban ecuaciones diferenciales para la determinación del  $K_s$ , incluso a partir de pruebas de carga, pero estas teorías no implicaban el tamaño del área de aplicación de la misma. En 1893 Engensser introdujo el concepto  $B$ , que refiere el ancho de viga y que implica que a mayor ancho de viga decrece el coeficiente  $K_s$  de la subrasante, este concepto



permitió a Terzagui hacer unas suposiciones fundamentales que son: a) La relación  $K_s$  entre el desplazamiento vertical y la presión de contacto  $P$ , es independiente de la carga  $P$ , de lo cual se puede interpretar que la carga transmitida por una estructura a una cimentación no se puede definir como presión de contacto a una subrasante, b) El  $k_s$  tiene el mismo valor en cada punto del área donde aplica la presión de contacto.

Terzagui representa a la influencia del ancho de la viga en el valor de  $K_s$  como el **bulbo de presión** que se interpreta como el espacio dentro del cual los esfuerzos normales aplicados a una subrasante (presión de contacto) actúan con una magnitud de 1.25 veces mayor a la presión normal que soporta la subrasante, las características de este comportamiento son la profundidad  $D$  y la magnitud de la presión de contacto debido al peso propio de la viga. Lo anterior lo dedujo Terzagui porque cuando realizaba en el ensayo de placa de carga, la mayor parte del asentamiento y de la compresión de la subrasante ocurría cuando se aplicaba un cuarto de carga.

**Ilustración 3.** Bulbo de presión.



**Fuente.** Terzagui (1955).

Terzagui finalmente recomienda ecuaciones para determinar el  $K_s$  en función de constantes de los promedios obtenidos de múltiples test realizados en campo y en función de la clasificación de suelo cohesivos y granulares, además para cada grupo se deberá determinar una clasificación adicional teniendo en cuenta resultados de cono de penetración estándar.

Para suelos arenosos:

$$k_s = \bar{k}_{s1} \left( \frac{B + 1}{2B} \right)^2$$

**Tabla 1. VALORES  $K_s$  PARA SUELOS GRANULARES.**

| Values of $\bar{k}_{s1}$ in tons/cu. ft for square plates, 1 ft $\times$ 1 ft, or beams 1 ft wide, resting on sand |       |        |           |
|--|-------|--------|-----------|
| Relative density of sand   | Loose | Medium | Dense     |
| Dry or moist sand, limiting values for $\bar{k}_{s1}$  | 20-60 | 60-300 | 300-1,000 |
| Dry or moist sand, proposed values   | 40    | 130    | 500       |
| Submerged sand, proposed values  | 25    | 80     | 300       |

Fuente: Terzagui (1955).

Para suelos arcillosos:

$$k_{s1} = \bar{k}_{s1} \cdot \frac{1}{1.5B}$$

**Tabla 2. VALORES DE KS PARA SUELOS ARENOSOS.**

| Values of $\bar{k}_{s1}$ in tons/cu. ft for square plates, 1 ft x 1 ft and for long strips, 1 ft wide, resting on pre-compressed clay |        |            |       |
|---|--------|------------|-------|
| Consistency of clay   | Stiff  | Very stiff | Hard  |
| Values of $q_{H_1}$ , tons/sq. ft   | 1-2    | 2-4        | > 4   |
| Range for $\bar{k}_{s1}$ , square plates  | 50-100 | 100-200    | > 200 |
| Proposed values, square plates  | 75     | 150        | 300*  |

For rectangular plates with width 1ft and length  $l$  ft:  $k_{s1} = \bar{k}_{s1} \frac{l + 0.5}{1.5l}$

Fuente. Terzagui (1955).

Donde:

K= Coeficiente de balasto de la cimentación de ancho B(kg/cm3).

B= Ancho de la cimentación (cm).

Ks (1) = Coeficiente de balasto de la placa de 30 cm x 30 cm (kg/cm3)

Existen distintas formas en que se puede obtener este valor Ks en la práctica de la ingeniería, según OTALVARO Y NACLARES (2008) los métodos usados generalmente:

- Ensayo de placa.
- Seguimiento de los asentamientos de la cimentación real.
- Correlaciones con otras propiedades geotécnicas con tablas de valores típicos de diferentes autores.

- Métodos analíticos basados en coeficiente de balasto de autores como: Winkler, Terzagui, Morrison, Bowles, Vesic.
- Modelos numéricos de elementos finitos. Algunos ejemplos son: ETABS que es recomendado para modelación de pilotes, PLAXIS que se caracteriza por el uso de elementos finitos para el análisis.

## 4.2. MARCO CONCEPTUAL

### **CARGA ÚLTIMA $q_u$**

Según BRAJA DAS (2005), se denomina carga ultima  $q_u$  a la capacidad de un suelo para soportar una carga  $P$  por área unitaria, cuando la carga por área unitaria en un suelo excede  $q_u$  se presenta un fenómeno de falla.

### **FALLA DEL SUELO**

BRAJA DAS (2005) define la falla de suelo como el desplazamiento que se da en un plano cualquiera de la masa de un suelo causado por la combinación de un esfuerzo normal y uno cortante. Para poder determinar el ángulo y plano de la falla en un suelo se pueden utilizar conceptos básicos de Envolvente de falla, cuyos autores son Mohr-Coulomb. Para determinar la resistencia de un suelo al esfuerzo cortante se utilizan los ensayos de laboratorio de corte directo y triaxial.

### **PRUEBA DE PLACA EN CAMPO**

BRAJA DAS (2005) explica que esta prueba in-situ se realiza para evaluar la capacidad de carga última de una cimentación, así como la capacidad admisible basada en función del asentamiento tolerable de la subrasante, las normas que explican en detalle el procedimiento para su realización son (Prueba D-1194-72, 1997 de la ASTM).

## **ASENTAMIENTO**

Según BRAJA DAS (2005), es la deformación de las partículas del suelo causado por cargas que se aplican por la construcción de cimentaciones, la deformación se presenta por el reacomodo de partículas, expulsión de agua o aire de los espacios o vacíos del suelo. El asentamiento provocado por una construcción se puede caracterizar como: *asentamiento inmediato*, que es la deformación elástica del suelo sin pérdida en el contenido de agua. *Asentamiento por consolidación primaria*, ocurre cuando hay expulsión de agua contenida en el suelo de característica cohesiva, *Asentamiento por consolidación secundaria*, se produce cuando la deformación del suelo tiene un comportamiento plástico y se relaciona con la carga permanente que se le aplicó al suelo con la construcción de una estructura.

## **COEFICIENTE DE BALASTO (KS)**

También conocido como coeficiente de reacción de subrasante o coeficiente de resorte, es un factor que determina el asentamiento que puede tener una estructura, el  $K_s$  relaciona la presión a la que está sometido un suelo de fundación y la deformación que se produce en este mismo.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. GENERAL**

Determinar el módulo de balasto  $K_s$  a partir de un ensayo de placa de carga a escala reducida en laboratorio para una cimentación superficial.

### **5.2. ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el suelo de fundación que va a soportar la placa de carga diseñada para el ensayo.
- Ensamblar los componentes del ensayo para ejecutarlo exitosamente en el laboratorio.
- Determinar el coeficiente de balasto mediante la curva de carga vs deformación obtenida.

## 6. ALCANCES Y LIMITACIONES

El proyecto se llevará a cabo en un periodo de tiempo aproximado de seis meses, entre 2020-3 y 2021-1, con el cual se espera encontrar una solución al problema planteado, de si es posible obtener un coeficiente de balasto por medio de un ensayo de placa de carga en laboratorio, buscando cumplir los procesos metodológicos que se realizan a diario en los ensayos de placa carga en campo. Como producto final se espera entregar un informe de los resultados obtenidos y el análisis de estos.

- El ensayo de laboratorio busca establecer relaciones de KS para un suelo en sentido vertical, en ningún momento se analizarán valores de coeficientes de reacción de subrasante horizontales (Kh), el análisis se realizará para cargas verticales.
- Se aclara que el objetivo de la presente investigación no es el estudio de las características y propiedades del material, sino la reproducción en laboratorio de un ensayo cuya aplicación es exclusivamente in situ y cuya reproducción en un laboratorio puede abrir puertas a futuras investigaciones como el efecto de confinamiento en los suelos.



## 7. PROTOCOLO DE BIOSEGURIDAD POR COVID-19

A continuación, se presentan las medidas de responsabilidad individual y autocuidado, que deben ser cumplidas por todos los usuarios del laboratorio (profesor, laboratorista, estudiantes, auxiliar y visitantes).

- El uso de elementos de protección personal (EPP) es indispensable en todo momento: tapabocas, gafas, guantes, bata u overol
- Desinfectar los EPP antes de ingresar
- Realizar lavado de manos o uso de gel antibacterial al ingresar
- Cada 3 horas, mientras se encuentren en el laboratorio, hacer una pausa, lavarse las manos e hidratarse
- Usar los tapetes desinfectantes al ingresar
- Mantener un distanciamiento seguro de mínimo 2 metros con otras personas
- Asegurar una adecuada ventilación de los espacios utilizados
- Limpiar los elementos, herramientas, maquinaria y área de trabajo antes y después de su uso, con alcohol al 70%
- Realizar la toma de temperatura antes de ingresar al laboratorio
- No se permitirá el ingreso de personas con síntomas de gripa, fiebre igual o mayor a 38°C, diarrea, dolor de cabeza, pérdida del gusto o del olfato, entre otros síntomas que indiquen sospecha de contagio por COVID-19
- No compartir elementos personales y de estudio (teléfonos, bolígrafos, computadoras calculadoras, etc.)
- No consumir alimentos ni bebidas dentro del laboratorio

## **8. METODOLOGÍA**

El alcance del presente proyecto de investigación es experimental, por tanto se sustenta en el trabajo desarrollado en laboratorio, para lo cual se tiene como propósito crear un modelo de ensayo de placa de carga a escala reducida en laboratorio, utilizando sus herramientas y realizando ensayos en una maqueta mediante el método de plato de carga, con el fin de establecer la posibilidad de representar el asentamiento producido por la carga de un elemento de fundación a escala. Así mismo, esto es fundamental para identificar la posibilidad de obtener un  $K_s$  que represente el asentamiento en un suelo de fundación ocasionado por la carga producida por una placa de carga que simula una zapata a una escala determinada.

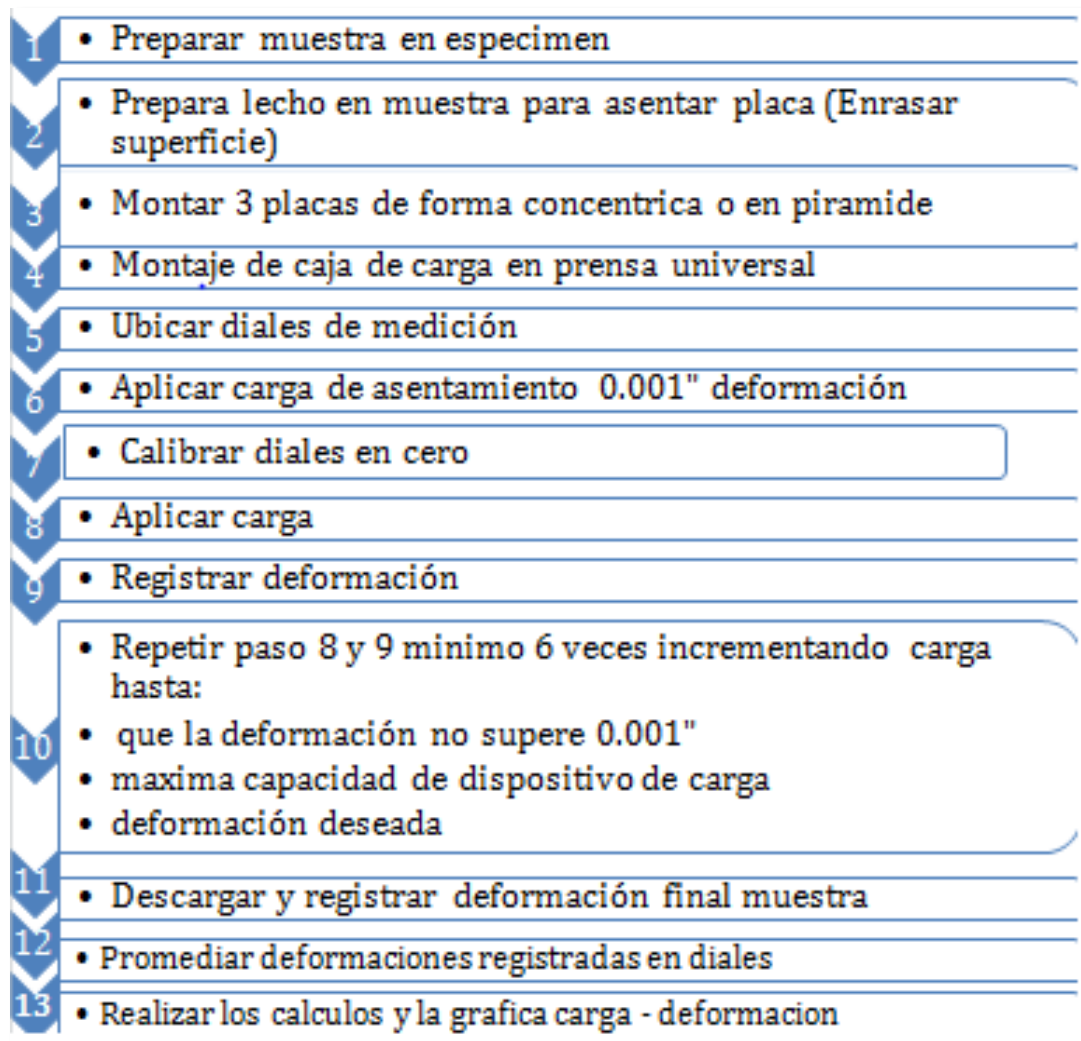
### **8.1. EN EL LABORATORIO**

- Crear un modelo de ensayo de placa de carga a escala reducida en laboratorio.
- Utilizando herramientas de laboratorio y realizando ensayos en una maqueta mediante el método de plato de carga, saber si es posible representar el asentamiento producido por la carga de un elemento de fundación a escala.
- Poder determinar si es posible obtener un  $K_s$  que represente el asentamiento en un suelo de fundación ocasionado por la carga producida por una placa de carga que simula una zapata a una escala determinada.

## 8.2. DIAGRAMA DE PROCEDIMIENTO DE PRACTICA EN LABORATORIO

A continuación, se realiza una propuesta de la secuencia de pasos para orientación del profesional o estudiante que se interesa por realizar el ensayo de placa de carga a escala en laboratorio.

*Ilustración 4. DIAGRAMA DE METODOLOGÍA PARA ENSAYO*



*Fuente. Los Autores.*

### 8.3. PRESUPUESTOS DEL TRABAJO Y RECURSOS FINANCIEROS

*Tabla 3. PRESUPUESTO*

| <b>PRESUPUESTO GLOBAL DEL ANTEPROYECTO</b>                          |  |                   |                   |
|---|--|-------------------|-------------------|
|   |  | <b>INGRESOS</b>   | <b>EGRESOS</b>    |
| <b>Ingresos</b>   |  | -                 | -                 |
| Auxilio o patrocinio para la elaboración del trabajo.               |  | -                 | -                 |
| Recurso propio (s)  |  | 690.000,00        | -                 |
| <b>Egresos</b>  |  | -                 | -                 |
| Recurso Humano –Honorarios y servicios personales-<br>laboratorista |  | -                 | 100.000,00        |
| Equipo (Prensa o marco universal)                                   |  | -                 | 0,00              |
| Papelería   |  | -                 | 100.000,00        |
| Deformímetros o diales de medición                                  |  | -                 | 120.000,00        |
| Elaboración placa   |  | -                 | 50.000,00         |
| Elaboración recipiente muestra- Espécimen                           |  | -                 | 100.000,00        |
| Viajes (transporte)   |  | -                 | 0.000,00          |
| Pruebas de laboratorio  |  | -                 | 120.000,00        |
| Imprevistos   |  | -                 | 100.000,00        |
| <b>Totales</b>  |  | <b>690.000,00</b> | <b>690.000,00</b> |

*Fuente. Los Autores.*

#### 8.4. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

Se realizó la compra de 100 kg de muestra de agregado utilizado para la elaboración de material MDC25, mezcla asfáltica en caliente de gradación continua, a simple vista se identifica como material de color grisáceo, se entrega separado en bolsas según su tamaño de partícula, se identifica la presencia de gravas y arenas; se escogió este material porque al seleccionar un material arcilloso se presentaba la problemática de realizar una consolidación inicial de la muestra por varios días, lo que nos restaba tiempo para realización de los ensayos de placa de carga, en comparación, la selección de materiales granulares permite un elaboración de la muestra el mismo día de la realización de los ensayos.

*Ilustración 5. MEZCLA GRANULO MÉTRICA.*



*Fuente. Los Autores.*

La fuente del material según el proveedor, corresponde a la cuenca del río Guayuriba, ubicado en el departamento del Meta en su gran mayoría, este río es afluente de la cuenca del río Orinoco (Ilustración 7.), es fuente de extracción de material de arrastre utilizado

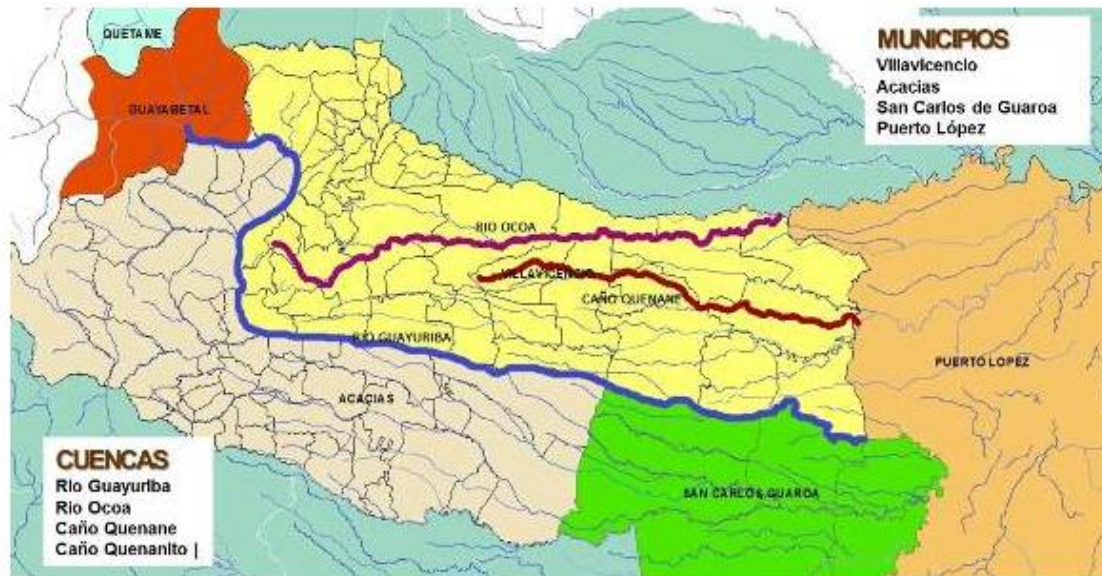
para construcción, las ciudades más importantes que se ubican en su cauce son Villavicencio y Acacías. Esta fuente de material pétreo se caracteriza (Cortez M, Gordillo L. & VASQUEZ C. 2020) por ser depósito de rocas metamórficas de bajo grado de metamorfismo, hace parte de las unidades geológicas Quetame y Región del borde Llanero, teniendo una caracterización litología de cuarcitas, filitas y metalimolitas. Estos materiales se encuentran como depósitos aluviales, fluvio-glaciales. La breve descripción de la geología hecha anteriormente aclara porqué empresas de agregados y cementos como CEMEX han establecido plantas de producción a lo largo del cauce del río Guayuriba.

***Ilustración 6. CAUCE RÍO GUAYURIBA.***



*Fuente: (Cortez y Gordillo 2020).*

**Ilustración 7. CUENCA RÍO GUAYURIBA ENTRE ACACÍAS Y VILLAVICENCIO.**



Fuente: <http://icaoc.unillanos.edu.co/index.php/proyecto-cuencas>.

## 8.5. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE PARTÍCULAS DE LA MUESTRA

La preparación de la muestra se hizo mezclando los distintos tipos de partículas que estaban separados por tamaño sin aplicar ningún tipo de norma, se trató de tomar muestras iguales de los distintos tamaños para que la densidad de la muestra fuera alta y de esta manera se pudieran aplicar cargas altas a la muestra pero que las deformaciones fueran de una magnitud baja. Una vez realizada la mezcla para caracterizar se seleccionó una muestra de 2377.8 gramos, la distribución granulométrica indicada en la tabla 3, muestra que el 62% de la mezcla se encuentra retenida entre los tamices  $\frac{3}{4}$ " y N° 4 lo que permite clasificar ese porcentaje como gravas, un 32% por arenas y un 6% lo conforman limos y/o arcillas. Se identificó que este material no cumplía con las condiciones requeridas para una mezcla MDC25 según el manual de normas y especificaciones INVIAS art. 450-13, esta

clasificación fue suministrada por el vendedor, el porqué no cumple se evidencia en la curva del material (grafica 8), es evidente que la curva del material no se encuentra dentro de las franjas superior e inferior determinada para material MDC25 INVIAS, el material que se escogió como referencia para la muestra de ensayo es subbase granular SGB-38 del INVIAS. Este material nos brindará una referencia para hacer futuras comparaciones en la investigación. Según la norma INVIAS, la curva obtenida en la granulometría realizada se ubica dentro de la zona de aceptación de las franjas permitidas para un material SGB-38. Otra referencia que puede aplicarse a la investigación es la referencia del ensayo de resistencia del material CBR que para la una SBG es de 30 % a 40 % según INVIAS.

**Tabla 4. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA.**

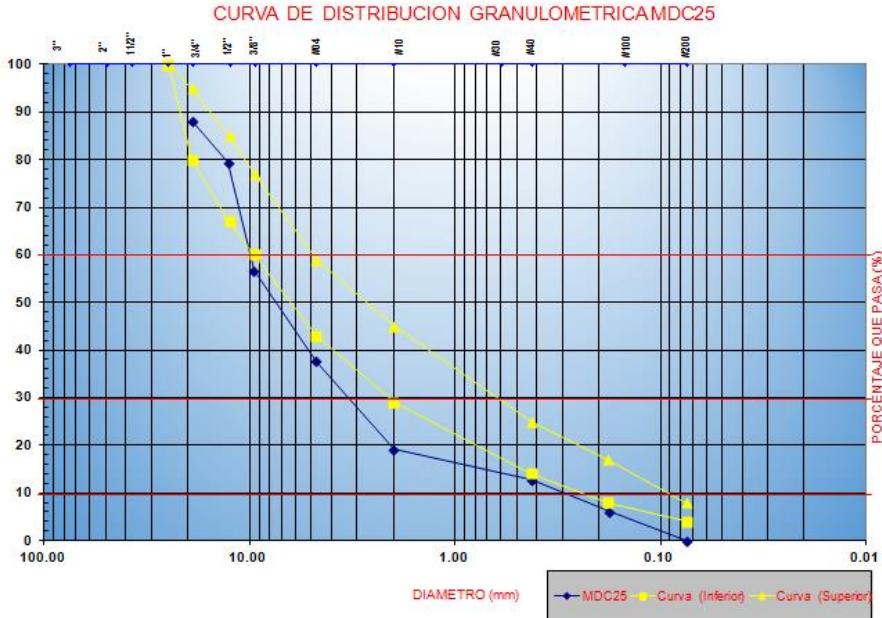
| GRANULOMETRIA MUESTRA   |                    |            |        |
|-------------------------|--------------------|------------|--------|
| peso total muestra (gr) |                    | 2377.8     |        |
| Tamiz                   | Peso retenido (gr) | % retenido | % Pasa |
|                         |                    |            | 100%   |
| 3/4"                    | 282.6              | 11.9%      | 88.1%  |
| 1/2"                    | 208.9              | 8.8%       | 79.3%  |
| 3/8"                    | 539.1              | 22.7%      | 56.7%  |
| N°4                     | 451.2              | 19.0%      | 37.7%  |
| N°10                    | 441.0              | 18.5%      | 19.1%  |
| N°40                    | 151.2              | 6.4%       | 12.8%  |
| N°80                    | 158.2              | 6.7%       | 6.1%   |
| N°200                   | 145.6              | 6.1%       | 0.0%   |

*Fuente. Los Autores.*

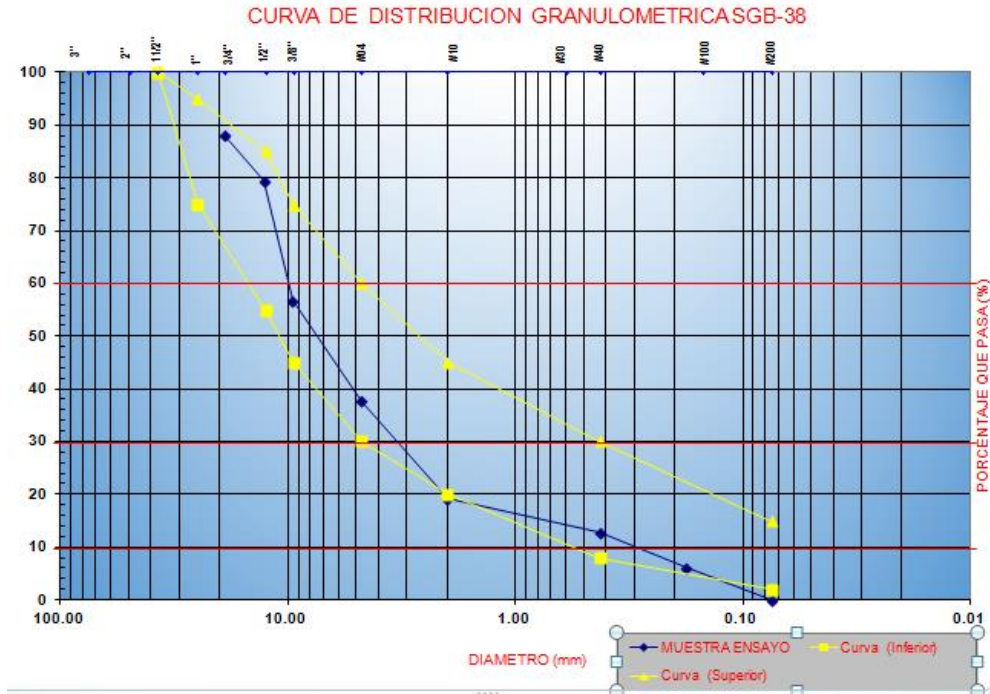
En la siguiente gráfica se puede evidenciar que la zona de arenas y parte de gravas no cumple las especificaciones del INVIAS para un material MDC-25.



**Ilustración 8. GRÁFICA CURVA GRANULOMÉTRICA COMPARATIVA MUESTRA-MDC25**



**Ilustración 9. GRÁFICA CURVA GRANULOMÉTRICA COMPARATIVA MUESTRA-SGB38.**



*Fuente. Los Autores.*

Otros parámetros que se pueden caracterizar para nuestra muestra de ensayo es el coeficiente de uniformidad  $C_u$  y coeficiente de curvatura  $C_c$ , ambos parámetros determinan la gradación del suelo o de la densidad de la muestra, especifican si existen muchos vacíos en nuestra muestra o por lo contrario indican el porcentaje de densidad de la misma.

- $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \cdot D_{10})$  (Los suelos bien gradados tienen valores de este coeficiente comprendidos entre 1 y 3)
- $C_u = D_{60}/D_{10}$ . (comprendido entre 5 y 20 el suelo es poco uniforme y si es mayor de 20 se trata de un suelo bien gradado)

Datos obtenidos:

D10= 0.3mm, D30= 3,2mm y D60=10mm

Cc= 3,41

Cu= 33,33

Con los anteriores datos podemos clasificar la muestra para el ensayo como: *GW Gravas bien gradadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos* según el método unificado USCS además podemos inferir que la muestra tiene una densidad apropiada para realizar el ensayo de placa de carga.

**Tabla 5. NORMAS Y ESPECIFICACIONES. Art. 320.**

| TIPO DE GRADACIÓN   | TAMIZ (mm / U.S. Standard) |                |            |              |             |               |                |                 |                  |
|---|----------------------------|----------------|------------|--------------|-------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|
|   | 50.0<br>2"                 | 37.5<br>1 1/2" | 25.0<br>1" | 12.5<br>1/2" | 9.5<br>3/8" | 4.75<br>No. 4 | 2.00<br>No. 10 | 0.425<br>No. 40 | 0.075<br>No. 200 |
|   | % PASA                     |                |            |              |             |               |                |                 |                  |
| SBG-50  | 100                        | 70-95          | 60-90      | 45-75        | 40-70       | 25-55         | 15-40          | 6-25            | 2-15             |
| SBG-38  | -                          | 100            | 75-95      | 55-85        | 45-75       | 30-60         | 20-45          | 8-30            | 2-15             |
| Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±) | 0%                         | 7%             |            |              | 6%          |               |                | 3%              |                  |

Fuente INVIAS 2012.

## **8.6. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS PARA EL MONTAJE DEL ENSAYO**

Para la investigación se planteó el montaje y diseño de un equipo en laboratorio con el fin de realizar el ensayo de placa de carga, para simular el mismo procedimiento de ensayo elaborado en campo. Los elementos del montaje son:

### **8.6.1. PRENSA HIDRÁULICA**

Para simular en laboratorio el camión de carga y el dispositivo de carga utilizado en campo como elemento que contrarresta las fuerzas que el gato hidráulico aplica a la subrasante, se utilizaron dos equipos, en la primera parte de la investigación se usó una prensa hidráulica manual con la que se presentaron inconvenientes porque el manómetro de presión no contaba con la sensibilidad para registrar cargas menores a 20 kilogramos y en la segunda parte de la investigación se usó una prensa Marshall (Ilustración 10), con la capacidad de aplicar las cargas en incrementos moderados (aproximadamente 0,50 Kg) y controlados, equipada con un medidor digital el cual se encarga de indicar las lecturas de las cargas aplicadas.

**Ilustración 10.** PRENSA MARSHALL, PRENSA MANUAL Y MANÓMETRO.



Fuente. Los Autores.

### **8.6.2. PLACA DE SOPORTE**

Para el ensayo de placa de carga en laboratorio se construyeron tres placas circulares y se tomó como referencia la norma INVIAS I.N.V.E- 168-13. El diámetro de la placa de 7.5 mm nos da un parámetro de diseño para la cámara o caja que debe contener la muestra de suelo a ensayar, para que el ensayo sea exitoso se propone una superficie libre de 1.5 veces el diámetro de la placa alrededor del borde de la placa de carga (se tomó como referencia de norma I.N.V.E- 168-07), para que en el momento de realizar el ensayo no se creen condiciones de confinamiento. Relacionando directamente la norma INVIAS E168-13 que aplica para obras en Colombia, el diámetro de placa de carga para condiciones reales de ensayo deberían ser de 152 a 762 mm y espesor 25mm, se debe aclarar que para efectos de la investigación, las placas de diámetro 7.5cm, 6 cm y 5.5 cm reproducirán la escala del ensayo a 2:1. Cuando se realizó la práctica de laboratorio, se vio la necesidad de utilizar una placa de diámetro 10.4 cm para que los asentamientos producto de los esfuerzos

aplicados no fueran tan altos por esta novedad la escala del ensayo pasaría a ser 0,7:1 aproximadamente. (Ilustración 11)

*Ilustración 11. PRENSA PLACAS DE CARGA.*



*Fuente. Los Autores.*

### **8.6.3. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE CÁMARA DE MUESTRA**

En el diseño y fabricación de la cámara para realizar el ensayo se tuvieron en cuenta varios factores como: las dimensiones que esta debía tener para que se pudiera realizar el ensayo sin que presentara condiciones de confinamiento, posteriormente se tuvieron en cuenta las características del material, resistencia, espesor, perforaciones de drenaje, uniones, entre otras, las cuales debían garantizar el correcto funcionamiento de la cámara y resistencia al momento de aplicar las cargas a la muestra dentro de esta.

Primero se realizaron los planos de la cámara en el software AutoCAD, la cual tendría unas dimensiones de 30cm de largo x 30cm de ancho y 30 cm de alto, posteriormente se

determinó que para las láminas laterales se usaría acero cold rolled calibre No°16, el cual tiene un espesor de 0,0598 pulgadas, para la base se usó igualmente acero cold rolled de calibre No°12 con un espesor de 0,1046 pulgadas, un mayor calibre para que no presente pandeo por la aplicación de cargas verticales, se realizaron perforaciones de 3/8 de pulgada separadas cada 0,025 mm con la función de drenar la humedad de la muestra, la lámina frontal se construyó en acrílico de 5mm de espesor para poder observar algún tipo de reacción del terreno al momento de realizar la prueba, las paredes de la cámara fueron unidas con tornillos de 1/8 x 1/2 pulgada y tuerca estándar. (Ilustración 12)

*Ilustración 12. CÁMARA DE CARGA.*

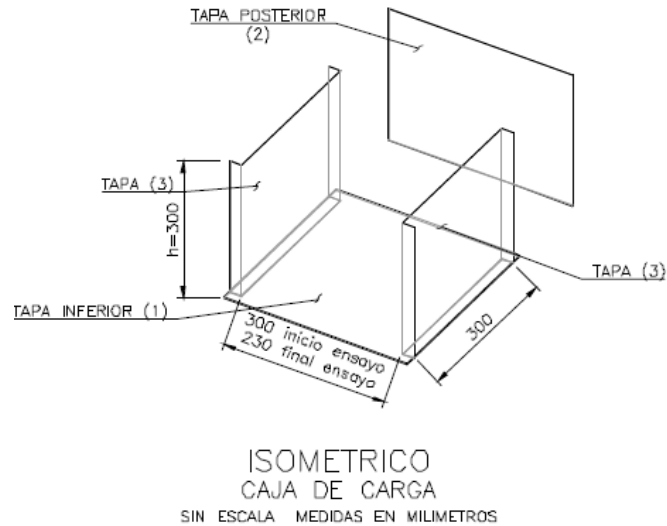


*Fuente. Los Autores.*

Al realizar el ensayo en la prensa hidráulica seleccionada, se detectó que estaba mal calibrado el manómetro, por lo tanto las lecturas de las cargas que la prensa estaba transmitiendo a la muestra no eran correctas, debido a la pandemia nos fue imposible conseguir una prensa hidráulica con las mismas características y dimensiones, se consiguió

una prensa Marshall por lo tanto fue necesario cambiar las dimensiones de la cámara de muestra, teniendo como nuevas dimensiones 30 cm en las paredes laterales x 23 cm en la lámina de acrílico frontal y de acero posterior x 30 cm de alto, manejando las mismas especificaciones y características de los materiales y manteniendo así las condiciones de la cámara para que no presente confinamiento.

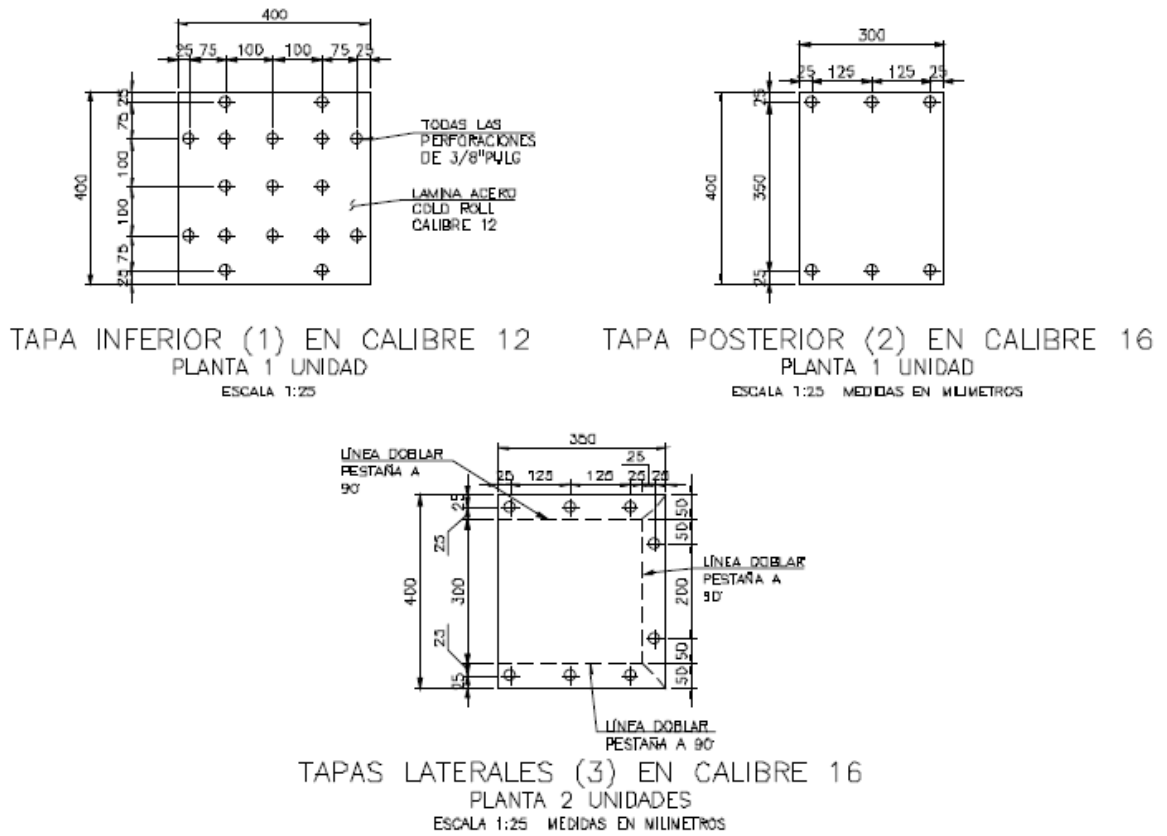
**Ilustración 13. CÁMARA DE CARGA ISOMÉTRICO.**



*Fuente. Los Autores.*



**Ilustración 14. PLANO CÁMARA DE CARGA ANTES DE MODIFICACIÓN.**



*Fuente. Los Autores.*

#### **8.6.4. OTROS ELEMENTOS DEL MONTAJE**

- Comparadores de caratula o deformímetros con una precisión de 0,001mm, los cuales pueden medir deflexiones de hasta 10 mm. Así como en el ensayo de campo, se utilizaron 2 deformímetros, los cuales se encargaron de registrar las deformaciones según la relación carga – tiempo y fueron ubicados sobre una lámina de acero que hace las veces de viga, diseñada a escala para medir las deformaciones del material.

- Báscula, en la cual se midió la cantidad, peso de la muestra a ensayar y la relación agua/material para determinar porcentaje de humedad.
- Bandeja mezcladora
- Pisón de compactación de 2,5kg, para realizar la compactación de la muestra en la cámara antes de realizar cada ensayo.

*Ilustración 15. COMPARADORES DE CARATULA Y PISÓN DE COMPACTACION.*



*Fuente. Los Autores.*

## **8.7. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE PLACA DE CARGA EN LABORATORIO**

### **8.7.1. PROTOCOLO COVID**

En el proceso de preparación y alistamiento del montaje se siguió el protocolo COVID, utilizando elementos de protección personal (EPP), la correspondiente desinfección y control al ingresar al laboratorio, como uso de gel antibacterial, uso del tapete desinfectante, toma de temperatura y la adecuada ventilación en el espacio utilizado, posteriormente se realizó la limpieza y desinfección de los elementos, herramientas, maquinaria y área de trabajo con un alcohol etílico de concentración del 70%.

### **8.7.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE ESPECIMEN**

Se realizó una mezcla de diferentes tamaños de partículas de gravas y arenas para elaborar la muestra, se deja claro que para este ensayo no se lavó la muestra, esta se entregó por parte del proveedor en estado seco. Se realizó la mezcla con elementos como palas en una bandeja de mezcla hasta que visualmente se observó una distribución homogénea de los tamaños de las partículas seleccionadas, el peso total de la muestra sin contar la caja fue de 20 Kg. Una vez se obtuvo una mezcla homogénea se procedió a llenar la cámara o caja de carga con material hasta una altura de 10 cm aproximadamente, después con el pisón de compactación de 2,5Kg inicialmente se dieron 60 golpes a tres muestras y 20 y 40 golpes a otras dos muestras, con un martillo de cara plana circular de 50mm de diámetro, dejándolo

caer a una altura de 12” aproximadamente. Lo anterior para lograr una compactación del 50% de la muestra o que la densidad de la muestra sea un 100% de su límite de densidad máximo (lo anterior según referencia de Norma I.N.V. E – 141 2013), el anterior paso se repitió para conformar tres capas de material cada una apisonada uniformemente y lograr una muestra con altura aproximada de 25cm dentro de la caja o cámara de carga. Este fue el procedimiento de elaboración de la primera muestra para realizar el ensayo propuesto, para la obtención de una mayor cantidad de datos que permitan realizar el análisis de la prueba se proponen diferentes condiciones de humedad y compactación para poder evidenciar como estos aspectos afectan el  $K_s$  de un material en laboratorio, tener una mayor cantidad de ensayos nos puede dar una mínima indicación del comportamiento en campo para el ensayo de placa de carga.

*Ilustración 16. PREPARACION DE LA MUESTRA.*



*Fuente. Los Autores.*

### 8.7.3. MONTAJE DE CÁMARA DE CARGA EN PRENSA UNIVERSAL

Este montaje se realizó en un taller de mecánica ya que al estar inhabilitados los laboratorios de los centros académicos por la pandemia global, fue la opción más inmediata como laboratorio improvisado, este lugar facilitó el uso de una prensa hidráulica de 12 toneladas de fuerza y de operación manual; para realizar el ensayo se adaptó la prensa hidráulica a la altura de la cámara de muestras, posteriormente se instalaron dos deformímetros o comparadores de carátula en los soportes magnéticos y se pusieron estos en la parte superior de la prensa en donde sería su ubicación durante el ensayo para el registro de las deformaciones que presentara la muestra, se alistaron las 3 placas de carga las cuales fueron puestas en forma piramidal y en la parte superior se pondría nuestra viga de deflexión (regleta en acero) en la cual estarían apoyadas las puntas de los comparadores de carátula. (Ilustración 17).

*Ilustración 17. MONTAJE DE CAMARA DE CARGA EN PRENSA MARSHALL.*



*Fuente. Los Autores.*

En este montaje se presentó el problema nombrado con el manómetro de la prensa, ya que no registraba las cargas de magnitudes pequeñas que se le aplicaban a la muestra, por lo que fue necesario descartar el sitio como laboratorio para el ensayo.

Se identifica como etapa dos de esta investigación cuando se logra contratar los servicios de un laboratorio especializado en ensayos para materiales de construcción de vías, este lugar contaba con prensa tipo Marshall, que se caracteriza por aplicar las cargas en sentido ascendente y el registro de la magnitud de la carga se hace en con una sensibilidad de gramos, se logró aplicar cargas superiores a la tonelada con este equipo. Se presentaron dos restricciones para este equipo, la primera y más importante fue el cambio del ancho de la caja de 30cm a 23cm en una sola cara para que permitiera la entrada en la estructura de la prensa, la segunda restricción que se presentó con este equipo fue que al realizar ensayos previos utilizando la placa de diámetro 7.5 mm, la deformación obtenida en el material sobrepasaba la sensibilidad de los compactadores de carátula de una manera demasiado alta en la primera carga, se desplazaba más de la mitad del vástago del comparador de carátula para una carga de 5 Kg, por lo que se tomó la decisión de aumentar el área de la placa de carga a una de diámetro 10.14 cm, lo que ocasionó que sólo cumpliéramos el 60% de la distancia requerida como borde libre para evitar efectos de confinamiento en los resultados, al ser mayor del 50% el borde libre requerido para el ensayo se decidió continuar con el procedimiento.

#### **8.7.4. INSTALACIÓN DE DIALES DE MEDICIÓN**

Para este paso del procedimiento, como ya se realizaron pruebas previas es importante aclarar la necesidad de colocar una lámina o regleta metálica sobre las placas de carga, una vez instalados los comparadores de carátula, que sirve como superficie de soporte para los vástagos de los comparadores, se deberá dejar lo más cerca posible el comparador de la regleta o superficie de medición para que el vástago pueda registrar deformaciones grandes en el material, si la deformación es muy grande se excede la longitud de medición del elemento y el montaje se deberá repetir. Una vez hecho el montaje descrito se aplica una carga hasta que el comparador marque una deformación inicial de 0.002mm, esta carga se denomina carga de asiento, después de este paso se llevan los comparadores a ceros y se sigue con el procedimiento de aplicación de carga.

***Ilustración 18. MONTAJE DE COMPARADORES DE CARÁTULA***



*. Fuente. Los Autores.*

### **8.7.5. APLICACIÓN DE CARGA Y REGISTRO DE DEFORMACIONES**

En este paso del ensayo se aplicaron ciclos de carga que se determinan por la velocidad de aplicación y por la magnitud, cuando se hace referencia a velocidad se debe tener en cuenta el tiempo entre diferenciales de carga aplicados, se recomienda realizar una carga inicial de valor  $x$  y esperar 3 minutos para la aplicación de la siguiente carga que deberá ser de una magnitud parecida a la anterior, durante la espera de los tres minutos se deberá registrar la diferencia de asentamiento del material de la muestra que indica el comparador de carátula. Se deberán registrar mínimo 6 ciclos de carga. La magnitud de la carga cuando el ensayo se realiza in situ se determina por la resistencia o capacidad de carga de la subrasante requerida por el ingeniero para soportar una estructura cualquiera, es decir que ya se conoce el valor de resistencia de la subrasante requerido y el criterio del profesional permite determinar las cargas iniciales a aplicar a la muestra. Para el caso de ensayo en laboratorio, los valores están sujetos a la capacidad de carga de la máquina o prensa a utilizar y de los materiales y elementos de la caja de carga que pueden verse sometidos a esfuerzos mayores de los que sus materiales de fabricación como el acero les permite soportar. El final del ensayo se identifica cuando después de aplicar la carga y transcurridos los tres minutos no se registre una deformación mayor a los 0.002 mm en el material de ensayo.



*Ilustración 19. APLICACIÓN DE CARGAS DEL MATERIAL.*



*Fuente. Los Autores.*

Se deberá tener registro de los datos obtenidos indicando magnitud de la fuerza aplicada y deformación obtenida para cada comparador de carátula. La construcción de la gráfica se hará con los datos de presión de carga vs deformación, se debe entender que la fuerza aplicada por la máquina o prensa se distribuye en el área de contacto de la placa de carga obteniendo la presión de carga. De esta manera podemos determinar un coeficiente de resorte  $K_s$  para el material que se está evaluando en el procedimiento. Se aclara que en este método no se evalúa el ciclo de descarga del material, ya que para determinar el  $K_S$  de una subrasante no se requiere esta información.

## **8.7.6. INFORME DE LABORATORIO**

### **Ensayo de laboratorio**

Previo a la ejecución del ensayo se realizó el protocolo COVID y se realizó el esquema del montaje como la preparación de los materiales, maquinaria y objetos que se utilizarían en el ensayo. Se planeó realizar 6 ensayos en los que se variaría el porcentaje de humedad.

Para el primer ensayo se utilizó una mezcla de gravas con arena de 2377.8 gr sin agregar agua a la muestra dando a esta un porcentaje de humedad del 0%, fueron mezcladas hasta que se logró una muestra uniforme, luego se puso esta porción de material en la cámara de ensayo y con el pisón de compactación se realizó la compactación del material basado en el ensayo de CBR.

Para la compactación del material del primer ensayo, se dividió la muestra en tres partes iguales, las cuales fueron introducidas una por una en la cámara de ensayo, realizándoles a cada una respectivamente su proceso de compactación por medio de 20 golpes con el pisón de manera uniforme, para evitar que las placas se entierren en el material.

Se adecuó la altura de la prensa Marshall para que entrara la cámara de ensayo con la muestra, esta se puso en la prensa donde se enrasó y se ubicaron las placas en el centro de la cámara en forma piramidal, luego se bajo el pistón centrado a la placa hasta quedar en contacto con la misma, se ubicó el soporte magnético en la barra izquierda de la prensa y se sujetó a este el comparador de carátula, de tal modo que el vástago del dial descansara en la lámina inferior, sirviendo esta como viga de deflexión. Se ubicó la punta del vástago del

dial en esta superficie ya que la prensa Marshall realiza el empuje de fuerza de abajo hacia arriba.

Para esta muestra, el proceso de carga de ajuste o fijación, se realizó teniendo en cuenta el proceso de fijación No.2 de la norma invias I.N.V.E-168-13, donde se realizó el asentamiento del conjunto de placas de apoyo y posteriormente aplicándole a la muestra una precarga o carga inicial de 25 kg, estos datos de carga se toman como la lectura cero, colocando los comparadores de carátula nuevamente en cero para iniciar las cargas cíclicas del ensayo.

En el procedimiento de aplicación de carga fue usado el método No.1 de la norma invias I.N.V.E-168-13, donde luego de realizar el proceso de fijación y poner los comparadores de carátula de nuevo en cero, se empezaron a aplicar cargas en aumento uniforme de 20 kg y en una rata moderada de aproximadamente 20 segundos, tomando así las lecturas de carga y deflexión para cada incremento, continuando este proceso hasta llegar a la deflexión máxima total escogida, para este ensayo se decidió realizar el aumento de cargas hasta llegar una deflexión máxima de 10 mm, la cual se cumplió con una carga máxima de 454 kg, al llegar a este punto se dejó esta carga durante 3 minutos y se procedió a soltar la carga de la prensa hasta la carga cero o cuando los medidores del comparador de caratula eran cero, se esperó 3 minuto nuevamente como indica la norma y se tomó lectura de la recuperación del material la cual para este ensayo del 0% de humedad fue de 2 mm, dando así por finalizado el ensayo N°1.

**Ilustración 20. PROCESO DE CARGA.**



*Fuente. Los Autores.*

Este proceso se realizó de la misma forma para todos los ensayos, pero se debe tener en cuenta que la cantidad de agua, porcentaje de humedad, compactación y carga inicial, cambian para cada ensayo de la siguiente forma:

**Tabla 6. CONDICIONES DE ENSAYO**

|                             | Ensayo N°1 | Ensayo N°2 | Ensayo N°3 | Ensayo N°4 | Ensayo N°5 | Ensayo N°6 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Cantidad de agua (gr)       | 0          | 200        | 400        | 400        | 600        | 1000       |
| Humedad (%)                 | 0          | 1          | 2          | 2          | 3          | 5          |
| N° de golpes                | 20         | 40         | 40         | 60         | 60         | 60         |
| Carga inicial (kg)          | 25         | 25         | 12         | 29         | 17         | 17         |
| Aumento de carga Aprox (kg) | 20         | 50         | 100        | 100        | 100        | 100        |
| Ciclos de carga             | 16         | 23         | 19         | 21         | 18         | 18         |

*. Fuente. Los Autores.*

## **9. RESULTADOS**

### **9.1.1. ENSAYO N°1**

Este ensayo se realizó con el material completamente seco (0% de humedad), se realizó compactación de 20 golpes por capa y se hizo una carga inicial de 25 kg, se realizaron 16 cargas con aumento de fuerza constantes hasta llegar a una deflexión de 10 mm y una carga máxima de 454 kg, esta muestra tuvo una recuperación de 2 mm al terminar el proceso de aplicación de cargas. (Ver anexo 1)

### **9.1.2. ENSAYO N°2**

Este ensayo se realizó agregando a la muestra inicial 200 gr de agua, para que este se realizara con el 1% de humedad en la muestra, se realizó compactación de 40 golpes por capa y se realizó una carga inicial de 25 kg, se realizaron 23 cargas con aumento de fuerza constantes hasta que se observó que no había una variación alta en las deflexiones, la variación era en promedio de 0,20 mm en los últimos 10 aumentos de carga, por lo tanto se determinó finalizar ahí el ensayo, con una carga máxima de 1240 kg, esta muestra tuvo una recuperación de 0,79 mm al terminar el proceso de aplicación de cargas. (Ver anexo 2)

### **9.1.3. ENSAYO N°3**

Este ensayo se realizó agregando a la muestra inicial 400 gr de agua, dándole a esta un 2% de humedad, se realizó compactación de 40 golpes por capa y se realizó una carga inicial de 12 kg, se realizaron 19 cargas con aumento de fuerza constante de 100 kg y a pesar de esto se observaban deflexiones de 2 mm o mayores tras cada aumento de carga hasta la

carga final que fue de 1905 kg, esta muestra tuvo una recuperación de 2,6 mm al terminar el proceso de aplicación de cargas.

Se observó que había una dispersión en las lecturas, ya que se aplicaban cargas elevadas y las deflexiones seguían siendo muy altas, por lo tanto se decidió terminar el ensayo para repetirlo, evaluando las posibles causas que afectaron la muestra y así corregirlas para que se pudiera realizar de manera correcta. (Ver anexo 3)

#### **9.1.4. ENSAYO N°4**

Se repitió el ensayo N°3, con la misma cantidad de agua 400 gr, repitiendo de este modo un 2% de humedad en la muestra. Al realizarse el análisis del ensayo N°3 se detectó que la muestra no había sido bien compactada por eso presentaba una dispersión en las lecturas de carga - deformación, por lo tanto se decidió realizar una compactación de 60 golpes por capa con el pisón de 5 kg, luego se realizó una carga inicial de 29 kg, se realizaron 21 cargas con aumento de fuerza constante de 100 kg, hasta llegar a una deflexión deseada de 10 mm y una carga final de 2103 kg, esta muestra tuvo una recuperación de 1,28 mm al terminar el proceso de aplicación de cargas. (Ver anexo 4)

#### **9.1.5. ENSAYO N°5**

Para este ensayo se agregó a la muestra inicial 600 gr de agua, para que esta obtuviera un porcentaje del 3% de humedad, se realizó compactación con 60 golpes por capa y se realizó una carga inicial de 17 kg, se realizaron 18 cargas con aumento de fuerza constantes de 100 kg hasta que se observó que había un aumento constante en las deflexiones que se

registraban para cada carga, se registró una carga final de 1822 kg y una recuperación de 2,22 mm. (Ver anexo 5)

#### **9.1.6. ENSAYO N°6**

En este ensayo se agregó a la muestra inicial 1000 gr de agua, para que esta lograra obtener un porcentaje del 5 % de humedad, se realizó compactación por medio de 60 golpes por capa con el pisón, se realizó una carga inicial de 17 kg, se realizaron 18 cargas con aumento de fuerza constantes de 100 kg hasta llegar a una deflexión de 10 mm y una carga máxima de 1802 kg, al realizar el proceso de descarga esta muestra tuvo una recuperación de 1,74 mm. (Ver anexo 6)

## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta los resultados de los cálculos y de las gráficas obtenidas en los ensayos, se pudo realizar una comparación visual y analítica de las diferentes gráficas que podemos realizar con los datos obtenidos en el laboratorio, para realizar así un análisis exhaustivo de las diferencias, cambios o reacciones que pueden tener en los distintos ensayos respecto a las variaciones de ciclos, aumentos de carga, porcentaje de humedad, compactación y/o cualquier otro factor que tenga que ver con la muestra.

Los datos obtenidos en el ensayo se pueden apreciar en la gráfica deformación del material vs tensión normal (Ilustración 21), estos dos datos son los insumos necesarios para encontrar la resistencia  $K_s$  del material. Esta gráfica representa para cada ensayo el comportamiento del material. Esta información que suministra permite apreciar una línea de ensayo (1) y línea de ensayo (3) que están separadas de un grupo (A) conformado por las líneas de ensayo (2), (4), (5) y (6), este grupo de líneas se cruzan en algunos tramos y describen una tendencia similar, teniendo en cuenta el recorrido de las curvas se puede explicar su cercanía por la compactación de 40 y 60 golpes para el grupo de líneas (A) pero se debe tener en cuenta que la humedad es diferente para las 4 muestras del grupo (A). De la línea de ensayo (1) podemos describir que los asentamientos son de una magnitud parecida pero la resistencia a la presión máxima de carga es mucho menor. Para el ensayo (1) la tensión máxima soportada del material es de  $0,55 \text{ MN/m}^2$  y para el grupo de ensayos (A) la tensión máxima soportada del material es superior a  $1.2 \text{ MN/m}^2$ .



*Ilustración 21. GRÁFICA TENSION VS DEFLEXIÓN.*



*Fuente. Los Autores.*

La comparación de las cargas máximas soportadas en los ensayos evidencia que la humedad contenida del material es un factor determinante para la resistencia de una subrasante, para este ensayo la diferencia es de una relación de 2.5 a 1 para la resistencia a la tensión de carga entre un material seco y otro con contenido de humedad, de esta manera se puede llevar a la discusión si el contenido de humedad afecta la densidad de un material como una subrasante al punto que su ausencia le reste un 50% de su capacidad de carga.

Para la curva de ensayo (3) se presentan datos que no concuerdan con el ensayo porque teniendo una humedad igual y una mayor compactación al ensayo (4) se encuentra en una zona intermedia entre la curva de ensayo (1) y el grupo (A) de ensayos, no cumple con la tendencia.

Otra observación que podemos hacer sobre la gráfica del ensayo es que la humedad contenida en la muestra es un factor que predomina sobre la energía de compactación

aplicada a cada muestra porque si observamos la curva del ensayo (2) se identifica que las condiciones de elaboración de la muestra le permitieron soportar más carga que las otras a pesar de no ser la que mayor compactación tenía.

**Tabla 7. CONDICIONES DE MUESTRAS.**

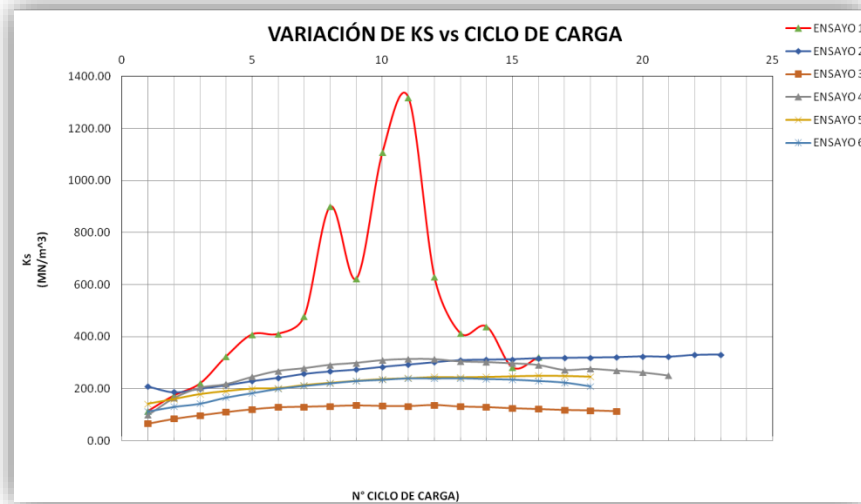
| CONDICIONES INICIALES<br>DE LAS MUESTRAS PARA ENSAYO |           |              |              |
|--|-----------|--------------|--------------|
| Muestra N°   | Pre carga | % de humedad | Compactacion |
|  | kg        | %            | Golpes       |
| 1  | 25        | 0            | 20           |
| 2  | 25        | 1            | 40           |
| 3  | 12        | 2            | 40           |
| 4  | 29        | 2            | 60           |
| 5  | 17        | 3            | 60           |
| 6  | 17        | 5            | 60           |

*Fuente. Los Autores.*

Siguiendo con la observación de los resultados, se construyó una gráfica de  $K_s$  vs Ciclo de carga (Ilustración 22) representa la resistencia del material a medida que se va aumentando la presión de contacto entre placa de carga y material sobre la superficie, esta permite determinar que la ausencia de humedad en el ensayo (1) causó que la curva de resistencia a la carga no tuviera una tendencia, se podría explicar como un comportamiento donde el material tratara de acomodarse para resistir la carga pero al no tener una cohesión entre sus partículas fallara súbitamente ante el aumento de la carga, de otra manera se comportaron las muestras que sí tenían un contenido de humedad porque las curvas de la gráfica para cada ensayo muestran una tendencia a ser estables en su condición de resistir un aumento de presión de contacto. De esta gráfica se puede identificar que las muestras (2) y (4)

tuvieron un comportamiento de resistencia a la carga similar aunque el material del ensayo (4) falló antes que el material del ensayo (2) reforzando así que el contenido óptimo de humedad en una muestra de material es fundamental para resistir la presión de contacto de una estructura.

**Ilustración 22. GRÁFICA  $K_s$  VS CICLO DE CARGA.**



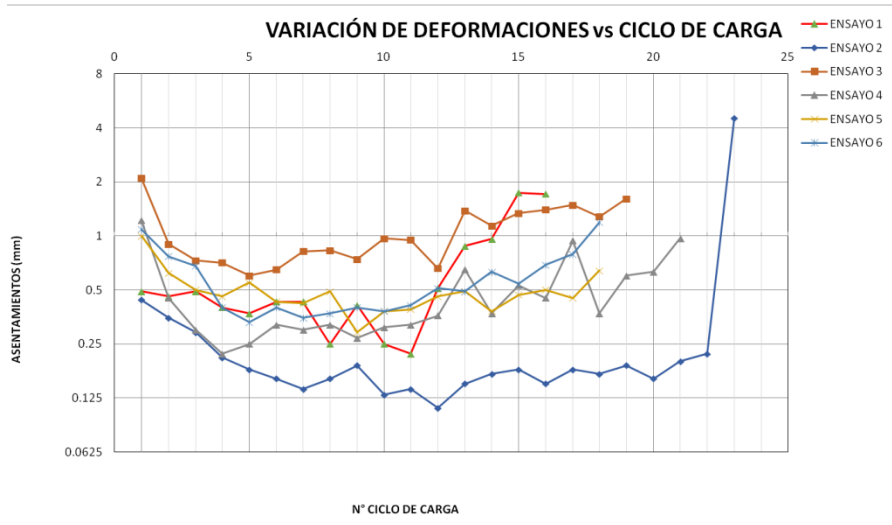
*Fuente. Los Autores.*

Analizando la gráfica de los asentamientos que se produjeron para cada muestra de ensayo por ciclo de carga (Ilustración 23), es posible afirmar que la muestra del ensayo (2) es la que soporta mayor cantidad de ciclos de carga sufriendo asentamientos más pequeños en comparación con las otras muestras, una vez más se comprueba que la resistencia de un material para soportar una carga distribuida en un área determinada está determinada por el contenido de humedad del material y no de la compactación, como los asentamientos fueron más pequeños para el ensayo (2) existe la posibilidad que el contenido de humedad

de las muestras (6) y (5) sobrepasara el requerido para generar unión en las partículas y por el contrario evitara que el esqueleto mineral de la muestra transmitiera de manera correcta los esfuerzos aplicados. La muestra del ensayo (3) fue la que presentó las deformaciones más grandes, una posible causa de este comportamiento del material pudo ser una compactación con una distribución no uniforme del material por esta razón se determina que los datos de este ensayo no son confiables.

En la gráfica de deformaciones vs ciclos de carga se puede observar que en la muestra del ensayo (2) el promedio de las deformaciones se encuentra entre los 0.125mm y 0.25mm que son valores muy pequeños comparados con el promedio de las muestras de los ensayos (4), (5) y (6) que está entre 0.25 y 0.5 casi el doble de deformación, lo que sí es evidente es que para la muestra del ensayo (2) se ve como el material completa su gráfica teniendo una zona de carga que se denomina estable, comienza en el ciclo 1 hasta el 12 donde las deformaciones disminuyen sin importar el aumento de carga la tensión de superficie de carga máxima es de 0.753 (MN/m<sup>2</sup>) al superar esta carga las deformaciones comienzan a aumentar súbitamente hasta que hay una deformación muy grande de 4mm aproximadamente, que se sale de la tendencia de la curva y puede representar una falla del material.

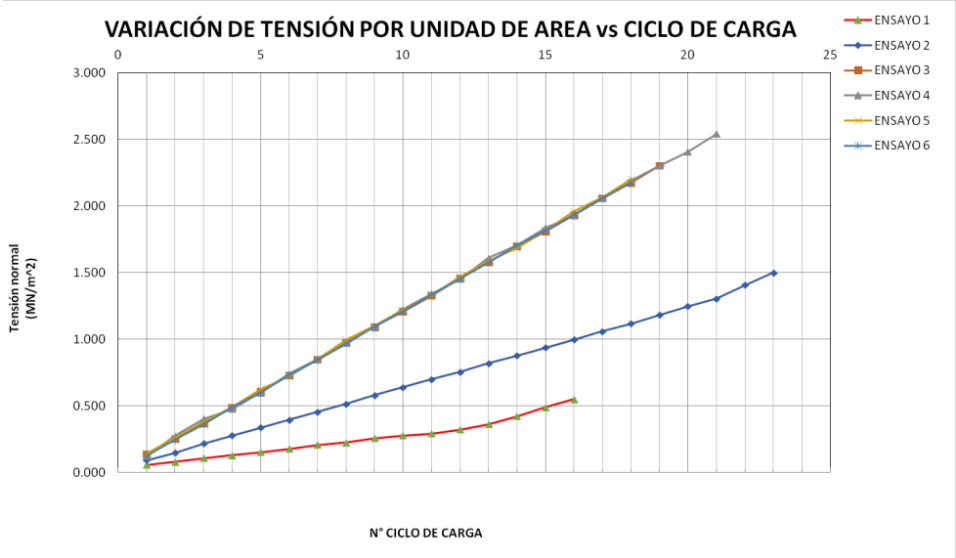
**Ilustración 23. GRÁFICA DEFORMACION VS CICLO DE CARGA.**



*Fuente. Los Autores.*

Al revisar los datos obtenidos de tensión por unidad de área soportada por cada muestra en los diferentes ensayos (Ilustración 24), se observa que las muestras a las que se le aplicaron cargas más altas fueron las de los ensayos (3), (4), (5), y (6) las magnitudes de las cargas fueron muy parecidas en cada ciclo de carga y fueron mayores que las aplicadas al material del ensayo, la anterior descripción puede causar un error de interpretación al determinar la resistencia del material siendo fácil suponer que como las cargas aplicadas fueron mayores, entonces dicho material soporta más carga, la anterior afirmación es errada porque para los ensayos (3), (4), (5), y (6) se obtuvieron datos de deformaciones más altas que las obtenidas para el ensayo de la muestra (2), es así como se puede comprobar que la resistencia del material, solo se puede interpretar en el ensayo de ciclo de carga como la relación entre esfuerzo vs deformación denominado KS o módulo de resistencia de la subrasante.

*Ilustración 24. GRÁFICA TENSIÓN POR UNIDAD VS CICLO DE CARGA.*



*Fuente. Los Autores.*

## 11. CONCLUSIONES

En el desarrollo de la investigación se identificó que para la obtención del valor del grado de resistencia de una subrasante Ks mediante el ensayo de placa en laboratorio, la manipulación del contenido de humedad de la muestra es un factor determinante en los resultados aún por encima de la energía de compactación aplicada al material durante la preparación de la muestra. Se puede afirmar que una densidad alta de una muestra de suelo no garantiza que soporte mayores cargas con bajas deformaciones frente a muestras que tienen una densidad menor pero cuyo contenido de humedad es el óptimo. Es por esto que la importancia del Ks en el diseño y construcción de infraestructura está relacionada con el buen criterio del profesional que está en la capacidad de diseñar una estructura que cumpla con los asentamientos máximos permitidos por la norma y así garantizar el óptimo funcionamiento de dicha estructura.

Si bien el ensayo de placa tiene como objetivo determinar una deformación máxima del suelo para una tensión generada por el contacto de la placa, podemos identificar y relacionar a este ensayo en laboratorio otras propiedades y características de las muestras de suelo como geometría de partículas, dureza, desgástate, limpieza, resistencia y contenido de humedad, para poder hacer conclusiones sobre el comportamiento que puede tener el material según sus condiciones in situ. Es de gran importancia recordar que para este ensayo las dimensiones de la cámara cumplen un papel fundamental porque simulan la resistencia triaxial que puede tener el suelo en condiciones reales y de esta manera las dimensiones de la caja se convierten en una variable de estudio para el desarrollo futuro de ensayos de esta tipología.

Para realizar el ensayo de placa de carga en laboratorio uno de los factores más importante es hacer una compactación adecuada del material, puesto que si no se hace correctamente, la fuerza ejercida por la prensa terminará haciendo que la muestra se abra y la placa se entierre en ella, obteniendo de este modo datos erróneos en el ensayo.

El desarrollo de esta investigación es una demostración de la posibilidad que existe para el desarrollo de nuevos métodos de caracterización de muestras, que apoyándose en las bases establecidas por otros investigadores y contando con una mayor cantidad de insumos e información, permiten poder realizar conclusiones significativas sobre el comportamiento y composición de una muestra de suelo y en el laboratorio.



## 12. RECOMENDACIONES

- Se propone para futuras investigaciones relacionadas con el tema de ensayo de placa de carga en laboratorio, investigar el fenómeno de confinamiento que se puede ocasionar por las dimensiones de la cámara de carga, así mismo se pueden incluir elementos que simulen estructuras como pilotes o tablestacas para ver como varía el  $K_s$  de una muestra de material sometido a presiones de carga en la prensa de carga.
- Se recomienda profundizar en la investigación de métodos de corrección de datos obtenidos para una resistencia de subrasante  $K_s$  y determinar si se puede plantear un método unificado para aplicar a los cálculos obtenidos en el ensayo de placa de carga.
- Para futuros ensayos a escala en laboratorio con el método de placa de carga se puede implementar el uso de materiales cohesivos, que permitan ver el comportamiento de las muestras modificando el contenido de humedad y aplicando cargas de consolidación previa.
- Para un próximo ensayo se recomienda tener en cuenta las mismas variables en cuanto a aumentos y número de ciclos de cargas para realizar una comparación asertiva de las reacciones del material con respecto a su contenido de humedad.
- Debido a que este es un trabajo de investigación donde se ve viable realizar un ensayo de placa de carga en laboratorio, se recomienda realizar para futuras investigaciones la comparación entre un ensayo en situ y uno en laboratorio con la misma muestra y propiedades de material, para conocer de este modo la dispersión real de los datos obtenidos en el laboratorio con respecto al ensayo tradicional y de este modo poder determinar un coeficiente de corrección.

## 14. BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, C., & HENAO, L. (2017). Determinación del modulo de reacción (k) para el conjunto de capa triturada y sub-rasante. *Cartagena:s.n.*, 98. p

ACI 336 2R-88. (2002). Suggested Analysis Design Procedures for Combined Footings and Mats. American Concrete Institute.

BANAVAKAR, P. V., & ULRICH, E. (1984, Octubre). Republic Bank Center: Structural and Geotechnical Features. *International Conference on Tall Buildings*. Singapur.

BOWLES, J. (1974). Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering. New York: McGraw Hill.

BOWLES, J. (1982). *Foundation Analysis and Design* (3 ed.). New York: McGraw Hill.

BOWLES, J. E. (1984). *Physical and Geotechnical Properties of Soil* (2 ed.). New York: McGraw Hill.

BRAJA, M. D. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (1 ed.). Editorial Thomson.

CALAVERA, J. (2000). Cálculo de Estructuras de Cimentación. 245-267 p.

CORTÉS MENA, J. G. (2010). Estudio exploratorio para la determinación del coeficiente de balasto a partir de ensayos en laboratorio para suelos cohesivos.

CORTES, M., & VELAZQUEZ, C. (2020). Analisis y determinacion de los factores naturales y antropicos sobre el rio Guayuriba y su influencia sobre la banca de la via marginal de la selva jurisdiccion Villavicencio-Acacias km 57 hasta el km 56, sector puente sobre el rio Guayuriba . *Universidad Cooperativa de Colombia* , 66-67 p.

DEPT. OF NAVY. (n.d.). *Soil Mechanics. Design Manual NAVFAC DM-7.1. Naval Facilities Engineering Command*. Alexandria . Retrieved from Naval Facilities Engineering Command.

FOCHT, J. A., KHAN, F., & GEMEINHARDT, J. (1978, Mayo). Performance of One Shell Plaza Deep Mat Foundation. 593-608. *Proceedings ASCE*,V. 104 p.

FREIRE, M. (1999). Precisiones para el empleo del método del módulo de balasto en edificación. *Informes De La Construcción*, 51(463), 23-25 p.

FREIRE, M. (1999). Precisiones para el empleo del método del módulo de balasto en edificación. 51(463), 23-35 p.

FREIRE, M. (2000). Interacción del suelo, cimiento y estructura: el caso de las zapatas.

INVIAS, I. N. (2007). Ensayo de placa con carga estática no repetida, para emplearen la evaluación y diseño de pavimentos. Colombia: En NORMA I.N.V.E-168-07 p.

KRAMRISH, F. F. (1985). *Handbook of Concrete Engineering* (2 ed.). (M. Fintel, Ed.) New York: Van Nostrand Reinhold Company.

MUZAS, F. (2002). Consideraciones sobre la elección de coeficientes de balasto. *Revista de obras públicas* .

- OTÁLVARO, I. F. (2008). Elementos para obtener el módulo de reacción de subrasante.
- REQUENA, N. (2007). Determinación del coeficiente de balasto en cimentaciones. 6 p.
- SOCULAYA, K. (2019). Caracterización de suelos para la obtención de coeficiente de balasto, Distrito San Agustín de Cajas, año 2017.
- sowers, g. (1977, Octubre 17-21). Foundation Modulus for a Mat on Sand. (P. n. 2937, Ed.) New York: American Society of Civil Engineers.
- SUÁREZ SUÁREZ, J. A., & PANTOJA ARBOLEDA, P. V. (2015). Estudio sobre la relación entre el ensayo de penetración estándar y el coeficiente de balasto (k) para suelos derivados de cenizas volcánicas en la zona de expansión urbana de Cerritos-Pereira. (*Doctoral dissertation, Universidad Libre Seccional Pereira*).
- TERZAGHI, K. (1955). Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction. *Geotechnique*, 5(4), 297-326 p.
- TERZAGUI, K. (1995). Evaluation of coefficients subgrade reaction.
- ULRICH, E. (1988). Geotechnical Considerations in Mat Foundations Design. Chicago: Structural and Geotechnical Lecture Series. ASCÇ, Sección Illinois.

## 15. ANEXOS

### ANEXO A. CALCULO ENSAYO N°1.

|                    |  |  |  |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|
| <b>Ensayo N° 1</b> |  |  |  |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|

|              |    |        |  |  |  |  |
|--------------|----|--------|--|--|--|--|
| Precarga     | 25 | kg     |  |  |  |  |
| % de humedad | 0  | %      |  |  |  |  |
| Compactación | 20 | Golpes |  |  |  |  |

| N°<br>Ciclo de<br>carga | Carga<br>(kg) | Carga<br>kN | Tensión<br>normal<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | Deformación<br>por<br>ciclo de carga<br>(mm) | Deformación<br>acumulada<br>(mm) | Ks<br>(MN/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|---------------|-------------|---|--|----------------------------------|----------------------------|
| 1                       | 46            | 0.45        | 0.056                                     | 0.490  | 0.49                             | 0.00                       |
| 2                       | 66            | 0.65        | 0.080                                     | 0.460  | 0.95                             | 173.43                     |
| 3                       | 89            | 0.87        | 0.108                                     | 0.490  | 1.44                             | 219.55                     |
| 4                       | 107           | 1.05        | 0.129                                     | 0.400  | 1.84                             | 323.35                     |
| 5                       | 125           | 1.23        | 0.151                                     | 0.370  | 2.21                             | 408.37                     |
| 6                       | 146           | 1.43        | 0.176                                     | 0.430  | 2.64                             | 410.42                     |
| 7                       | 170           | 1.67        | 0.205                                     | 0.430  | 3.07                             | 477.89                     |
| 8                       | 186           | 1.82        | 0.225                                     | 0.250  | 3.32                             | 899.34                     |
| 9                       | 211           | 2.07        | 0.255                                     | 0.410  | 3.73                             | 622.08                     |
| 10                      | 229           | 2.24        | 0.277                                     | 0.250  | 3.98                             | 1107.25                    |

|    |     |      |       |       |        |         |
|----|-----|------|-------|-------|--------|---------|
| 11 | 240 | 2.35 | 0.290 | 0.220 | 4.20   | 1318.67 |
| 12 | 265 | 2.60 | 0.320 | 0.510 | 4.71   | 628.09  |
| 13 | 300 | 2.94 | 0.363 | 0.880 | 5.59   | 412.09  |
| 14 | 348 | 3.41 | 0.421 | 0.960 | 6.55   | 438.18  |
| 15 | 404 | 3.96 | 0.488 | 1.740 | 8.29   | 280.66  |
| 16 | 454 | 4.45 | 0.549 | 1.710 | 10.000 | 320.93  |
|    | 0   | 0    |       |       |        |         |

*Fuente. Los Autores*

**ANEXO B. CALCULO ENSAYO N°2.**

| <b>Ensayo N° 2</b>               |                       |                     |  |  |   |                                  |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|--|--|---|----------------------------------|
|                                  |                       |                     |  |  |   |                                  |
| Precarga                         | 25                    | kg                  |  |  |   |                                  |
| % de humedad                     | 1                     | %                   |  |  |   |                                  |
| Compactación                     | 40                    | Golpes              |  |  |   |                                  |
|                                  |                       |                     |  |  |   |                                  |
| <b>N°<br/>Ciclo de<br/>carga</b> | <b>Carga<br/>(kg)</b> | <b>Carga<br/>kN</b> | <b>Tensión<br/>normal<br/>(MN/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Deformación<br/>por<br/>ciclo de carga<br/>(mm)</b> | <b>Deformación<br/>acumulada<br/>(mm)</b> | <b>Ks<br/>(MN/m<sup>3</sup>)</b> |
| 1                                | 76                    | 0.74                | 0.092  | 0.440  | 0.44                                      | 208.79                           |
| 2                                | 122                   | 1.20                | 0.147  | 0.350  | 0.79                                      | 186.67                           |
| 3                                | 179                   | 1.75                | 0.216  | 0.290  | 1.08                                      | 200.34                           |
| 4                                | 228                   | 2.23                | 0.276  | 0.210  | 1.29                                      | 213.65                           |
| 5                                | 279                   | 2.73                | 0.337  | 0.180  | 1.47                                      | 229.42                           |
| 6                                | 326                   | 3.19                | 0.394  | 0.160  | 1.63                                      | 241.76                           |
| 7                                | 376                   | 3.68                | 0.455  | 0.140  | 1.77                                      | 256.78                           |
| 8                                | 425                   | 4.17                | 0.514  | 0.160  | 1.93                                      | 266.18                           |
| 9                                | 479                   | 4.69                | 0.579  | 0.190  | 2.12                                      | 273.12                           |
| 10                               | 528                   | 5.17                | 0.638  | 0.130  | 2.25                                      | 283.66                           |
| 11                               | 578                   | 5.66                | 0.699  | 0.140  | 2.39                                      | 292.33                           |

|    |      |       |       |       |      |        |
|----|------|-------|-------|-------|------|--------|
| 12 | 623  | 6.11  | 0.753 | 0.110 | 2.50 | 301.23 |
| 13 | 678  | 6.64  | 0.820 | 0.150 | 2.65 | 309.27 |
| 14 | 726  | 7.11  | 0.878 | 0.170 | 2.82 | 311.20 |
| 15 | 776  | 7.60  | 0.938 | 0.180 | 3.00 | 312.67 |
| 16 | 825  | 8.09  | 0.997 | 0.150 | 3.15 | 316.59 |
| 17 | 876  | 8.58  | 1.059 | 0.180 | 3.33 | 317.99 |
| 18 | 924  | 9.06  | 1.117 | 0.170 | 3.5  | 319.12 |
| 19 | 978  | 9.58  | 1.182 | 0.190 | 3.69 | 320.38 |
| 20 | 1031 | 10.10 | 1.246 | 0.160 | 3.85 | 323.70 |
| 21 | 1080 | 10.58 | 1.305 | 0.200 | 4.05 | 322.34 |
| 22 | 1163 | 11.40 | 1.406 | 0.220 | 4.27 | 329.23 |
| 23 | 1240 | 12.15 | 1.499 | 4.540 | 4.54 | 330.15 |

*Fuente. Los Autores*



ANEXO C. CÁLCULOS ENSAYOS N°3.

| <b>Ensayo N° 3</b>               |                       |                     |  |  |   |                                  |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|--|--|---|----------------------------------|
| Precarga                         | 12                    | kg                  |  |  |   |                                  |
| % de humedad                     | 2                     | %                   |  |  |   |                                  |
| Compactación                     | 40                    | Golpes              |  |  |   |                                  |
|                                  |                       |                     |  |  |   |                                  |
| <b>N°<br/>Ciclo de<br/>carga</b> | <b>Carga<br/>(kg)</b> | <b>Carga<br/>kN</b> | <b>Tensión<br/>normal<br/>(MN/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Deformación<br/>por<br/>ciclo de carga<br/>(mm)</b> | <b>Deformación<br/>acumulada<br/>(mm)</b> | <b>Ks<br/>(MN/m<sup>3</sup>)</b> |
| 1                                | 115                   | 1.13                | 0.139  | 2.100  | 2.1                                       | 66.20                            |
| 2                                | 210                   | 2.06                | 0.254  | 0.900  | 3.00                                      | 84.61                            |
| 3                                | 302                   | 2.96                | 0.365  | 0.730  | 3.73                                      | 97.87                            |
| 4                                | 404                   | 3.96                | 0.488  | 0.710  | 4.44                                      | 109.99                           |
| 5                                | 503                   | 4.93                | 0.608  | 0.600  | 5.04                                      | 120.64                           |
| 6                                | 604                   | 5.92                | 0.730  | 0.650  | 5.69                                      | 128.31                           |
| 7                                | 701                   | 6.87                | 0.847  | 0.820  | 6.51                                      | 130.16                           |
| 8                                | 805                   | 7.89                | 0.973  | 0.830  | 7.34                                      | 132.57                           |
| 9                                | 905                   | 8.87                | 1.094  | 0.740  | 8.08                                      | 135.39                           |
| 10                               | 998                   | 9.78                | 1.206  | 0.970  | 9.05                                      | 133.30                           |
| 11                               | 1098                  | 10.76               | 1.327  | 0.950  | 10.00                                     | 132.72                           |

|    |      |       |       |       |       |        |
|----|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 12 | 1207 | 11.83 | 1.459 | 0.660 | 10.66 | 136.87 |
| 13 | 1306 | 12.80 | 1.579 | 1.380 | 12.04 | 131.12 |
| 14 | 1405 | 13.77 | 1.698 | 1.140 | 13.18 | 128.86 |
| 15 | 1497 | 14.67 | 1.810 | 1.340 | 14.52 | 124.62 |
| 16 | 1599 | 15.67 | 1.933 | 1.400 | 15.92 | 121.41 |
| 17 | 1702 | 16.68 | 2.057 | 1.490 | 17.41 | 118.17 |
| 18 | 1800 | 17.64 | 2.176 | 1.280 | 18.69 | 116.42 |
| 19 | 1905 | 18.67 | 2.303 | 1.610 | 20.3  | 113.44 |

*Fuente. Los Autores*

**ANEXO D. CÁLCULOS ENSAYOS N°4.**

| <b>Ensayo N° 4</b>               |                       |                     |  |  |   |                                  |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|--|--|---|----------------------------------|
| Precarga                         | 29                    | kg                  |  |  |   |                                  |
| % de humedad                     | 2                     | %                   |  |  |   |                                  |
| Compactación                     | 60                    | Golpes              |  |  |   |                                  |
|                                  |                       |                     |  |  |   |                                  |
| <b>N°<br/>Ciclo de<br/>carga</b> | <b>Carga<br/>(kg)</b> | <b>Carga<br/>kN</b> | <b>Tensión<br/>normal<br/>(MN/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Deformación<br/>por<br/>ciclo de carga<br/>(mm)</b> | <b>Deformación<br/>acumulada<br/>(mm)</b> | <b>Ks<br/>(MN/m<sup>3</sup>)</b> |
| 1                                | 100                   | 0.98                | 0.121  | 1.220  | 1.22                                      | 99.08                            |
| 2                                | 227                   | 2.22                | 0.274  | 0.450  | 1.67                                      | 164.31                           |
| 3                                | 332                   | 3.25                | 0.401  | 0.300  | 1.97                                      | 203.71                           |
| 4                                | 394                   | 3.86                | 0.476  | 0.220  | 2.19                                      | 217.47                           |
| 5                                | 495                   | 4.85                | 0.598  | 0.250  | 2.44                                      | 245.22                           |
| 6                                | 612                   | 6.00                | 0.740  | 0.320  | 2.76                                      | 268.03                           |
| 7                                | 705                   | 6.91                | 0.852  | 0.300  | 3.06                                      | 278.49                           |
| 8                                | 815                   | 7.99                | 0.985  | 0.320  | 3.38                                      | 291.47                           |
| 9                                | 902                   | 8.84                | 1.090  | 0.270  | 3.65                                      | 298.72                           |
| 10                               | 1013                  | 9.93                | 1.224  | 0.310  | 3.96                                      | 309.22                           |

|    |      |       |       |       |       |        |
|----|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 11 | 1110 | 10.88 | 1.342 | 0.320 | 4.28  | 313.49 |
| 12 | 1201 | 11.77 | 1.452 | 0.360 | 4.64  | 312.88 |
| 13 | 1331 | 13.04 | 1.609 | 0.650 | 5.29  | 304.14 |
| 14 | 1413 | 13.85 | 1.708 | 0.370 | 5.66  | 301.77 |
| 15 | 1521 | 14.91 | 1.839 | 0.530 | 6.19  | 297.02 |
| 16 | 1596 | 15.64 | 1.929 | 0.450 | 6.64  | 290.55 |
| 17 | 1704 | 16.70 | 2.060 | 0.940 | 7.58  | 271.74 |
| 18 | 1813 | 17.77 | 2.192 | 0.370 | 7.95  | 275.66 |
| 19 | 1904 | 18.66 | 2.302 | 0.600 | 8.55  | 269.18 |
| 20 | 1991 | 19.51 | 2.407 | 0.630 | 9.18  | 262.17 |
| 21 | 2103 | 20.61 | 2.542 | 0.970 | 10.15 | 250.45 |

*Fuente. Los Autores*

#### **ANEXO E. CÁLCULOS ENSAYOS N°5.**

| <b>Ensayo N° 5</b>               |                       |                     |  |   |   |                                  |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|--|---|---|----------------------------------|
| Precarga                         | 17                    | kg                  |  |   |   |                                  |
| % de humedad                     | 3                     | %                   |  |   |   |                                  |
| Compactación                     | 60                    | Golpes              |  |   |   |                                  |
|                                  |                       |                     |  |   |   |                                  |
| <b>N°<br/>Ciclo de<br/>carga</b> | <b>Carga<br/>(kg)</b> | <b>Carga<br/>kN</b> | <b>Tensión<br/>normal<br/>(MN/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Deformación<br/>por<br/>ciclo de carga</b> | <b>Deformación<br/>acumulada<br/>(mm)</b> | <b>Ks<br/>(MN/m<sup>3</sup>)</b> |

|    |      |       |       | (mm)  |             |        |
|----|------|-------|-------|-------|-------------|--------|
| 1  | 117  | 1.15  | 0.141 | 1.000 | 1           | 141.43 |
| 2  | 214  | 2.10  | 0.259 | 0.620 | 1.62        | 159.68 |
| 3  | 314  | 3.08  | 0.380 | 0.500 | 2.12        | 179.04 |
| 4  | 407  | 3.99  | 0.492 | 0.460 | 2.58        | 190.69 |
| 5  | 519  | 5.09  | 0.627 | 0.550 | 3.13        | 200.43 |
| 6  | 596  | 5.84  | 0.720 | 0.430 | 3.56        | 202.37 |
| 7  | 705  | 6.91  | 0.852 | 0.420 | 3.98        | 214.12 |
| 8  | 824  | 8.08  | 0.996 | 0.490 | <u>4.47</u> | 222.83 |
| 9  | 909  | 8.91  | 1.099 | 0.290 | 4.76        | 230.84 |
| 10 | 1010 | 9.90  | 1.221 | 0.380 | 5.14        | 237.52 |
| 11 | 1101 | 10.79 | 1.331 | 0.390 | 5.53        | 240.66 |
| 12 | 1215 | 11.91 | 1.469 | 0.460 | 5.99        | 245.19 |
| 13 | 1310 | 12.84 | 1.584 | 0.490 | 6.48        | 244.37 |
| 14 | 1394 | 13.66 | 1.685 | 0.380 | 6.86        | 245.63 |
| 15 | 1504 | 14.74 | 1.818 | 0.470 | 7.33        | 248.02 |
| 16 | 1621 | 15.89 | 1.959 | 0.500 | 7.83        | 250.25 |
| 17 | 1710 | 16.76 | 2.067 | 0.450 | 8.28        | 249.64 |
| 18 | 1822 | 17.86 | 2.202 | 0.640 | 8.92        | 246.91 |

*Fuente. Los Autores*

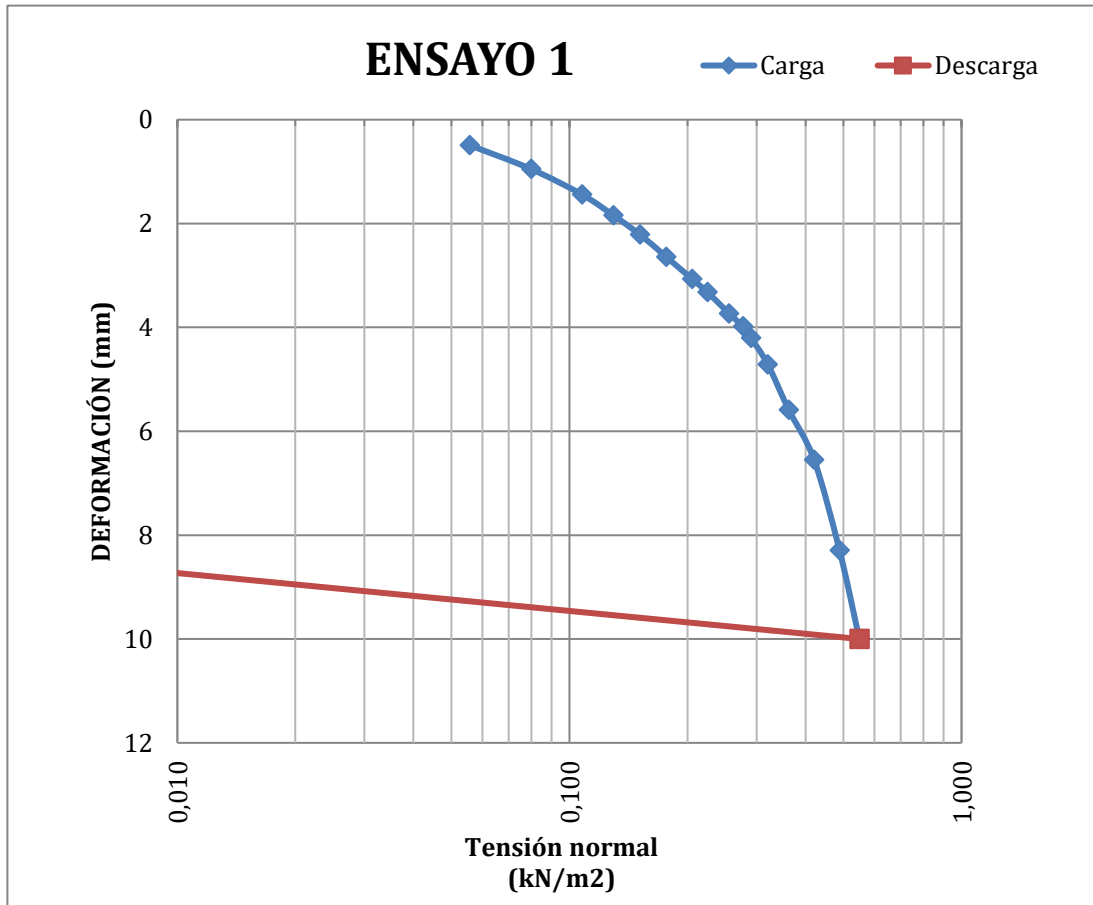
**ANEXO F. CÁLCULOS ENSAYOS N°6.**

| <b>Ensayo N° 6</b>               |                       |                     |  |  |   |                                  |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|--|--|---|----------------------------------|
| Precarga                         | 17                    | kg                  |  |  |   |                                  |
| % de humedad                     | 5                     | %                   |  |  |   |                                  |
| Compactación                     | 60                    | Golpes              |  |  |   |                                  |
|                                  |                       |                     |  |  |   |                                  |
| <b>N°<br/>Ciclo de<br/>carga</b> | <b>Carga<br/>(kg)</b> | <b>Carga<br/>kN</b> | <b>Tensión<br/>normal<br/>(MN/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Deformación<br/>por<br/>ciclo de carga<br/>(mm)</b> | <b>Deformación<br/>acumulada<br/>(mm)</b> | <b>Ks<br/>(MN/m<sup>3</sup>)</b> |
| 1                                | 102                   | 1.00                | 0.123  | 1.090  | 1.09                                      | 113.12                           |
| 2                                | 201                   | 1.97                | 0.243  | 0.770  | 1.86                                      | 130.63                           |
| 3                                | 300                   | 2.94                | 0.363  | 0.680  | 2.54                                      | 142.77                           |
| 4                                | 404                   | 3.96                | 0.488  | 0.400  | 2.94                                      | 166.11                           |
| 5                                | 495                   | 4.85                | 0.598  | 0.330  | 3.27                                      | 182.98                           |
| 6                                | 605                   | 5.93                | 0.731  | 0.400  | 3.67                                      | 199.27                           |
| 7                                | 700                   | 6.86                | 0.846  | 0.350  | 4.02                                      | 210.48                           |
| 8                                | 799                   | 7.83                | 0.966  | 0.370  | 4.39                                      | 220.00                           |
| 9                                | 908                   | 8.90                | 1.098  | 0.400  | 4.79                                      | 229.14                           |
| 10                               | 1000                  | 9.80                | 1.209  | 0.380  | 5.17                                      | 233.81                           |

|    |      |       |       |       |       |        |
|----|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 11 | 1105 | 10.83 | 1.336 | 0.410 | 5.58  | 239.37 |
| 12 | 1203 | 11.79 | 1.454 | 0.510 | 6.09  | 238.78 |
| 13 | 1305 | 12.79 | 1.577 | 0.490 | 6.58  | 239.74 |
| 14 | 1413 | 13.85 | 1.708 | 0.630 | 7.21  | 236.89 |
| 15 | 1504 | 14.74 | 1.818 | 0.540 | 7.75  | 234.58 |
| 16 | 1602 | 15.70 | 1.936 | 0.690 | 8.44  | 229.44 |
| 17 | 1705 | 16.71 | 2.061 | 0.790 | 9.23  | 223.29 |
| 18 | 1802 | 17.66 | 2.178 | 1.190 | 10.42 | 209.04 |

*Fuente. Los Autores*

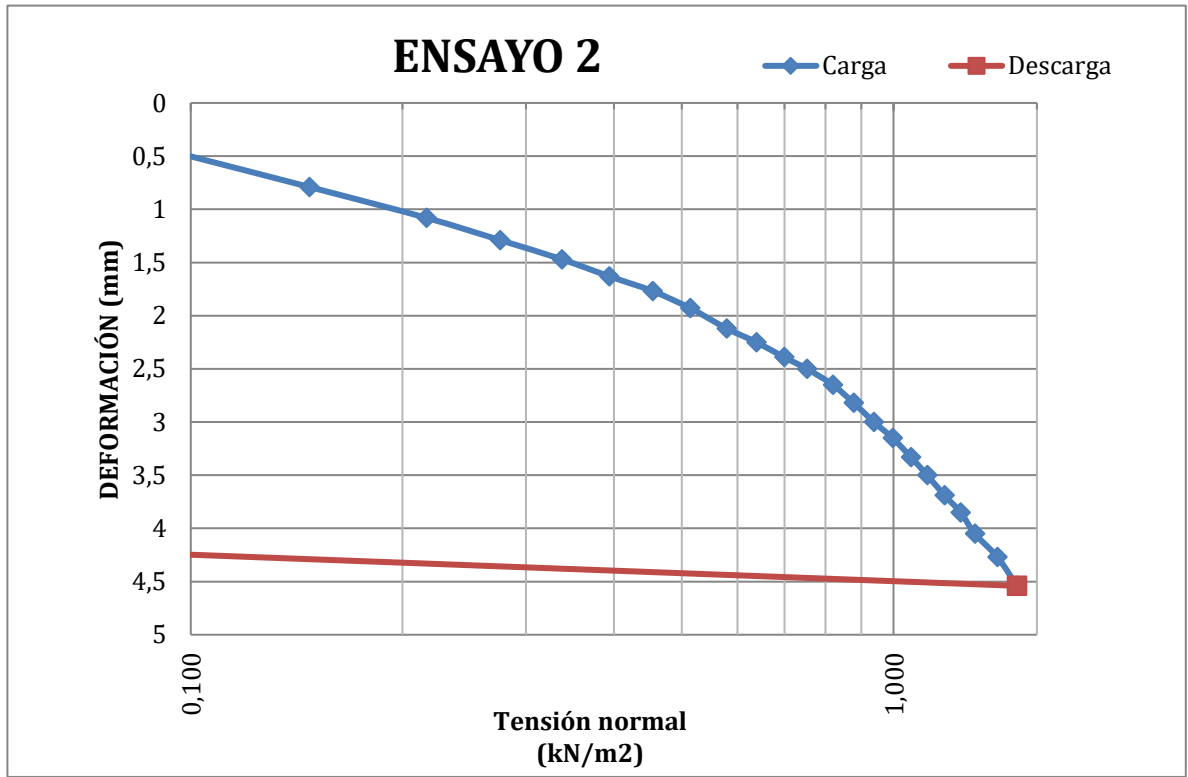
ANEXO G. GRÁFICA TENSIÓN NORMAL VS DEFORMACIÓN ENSAYO N°1.



Fuente. Los Autores

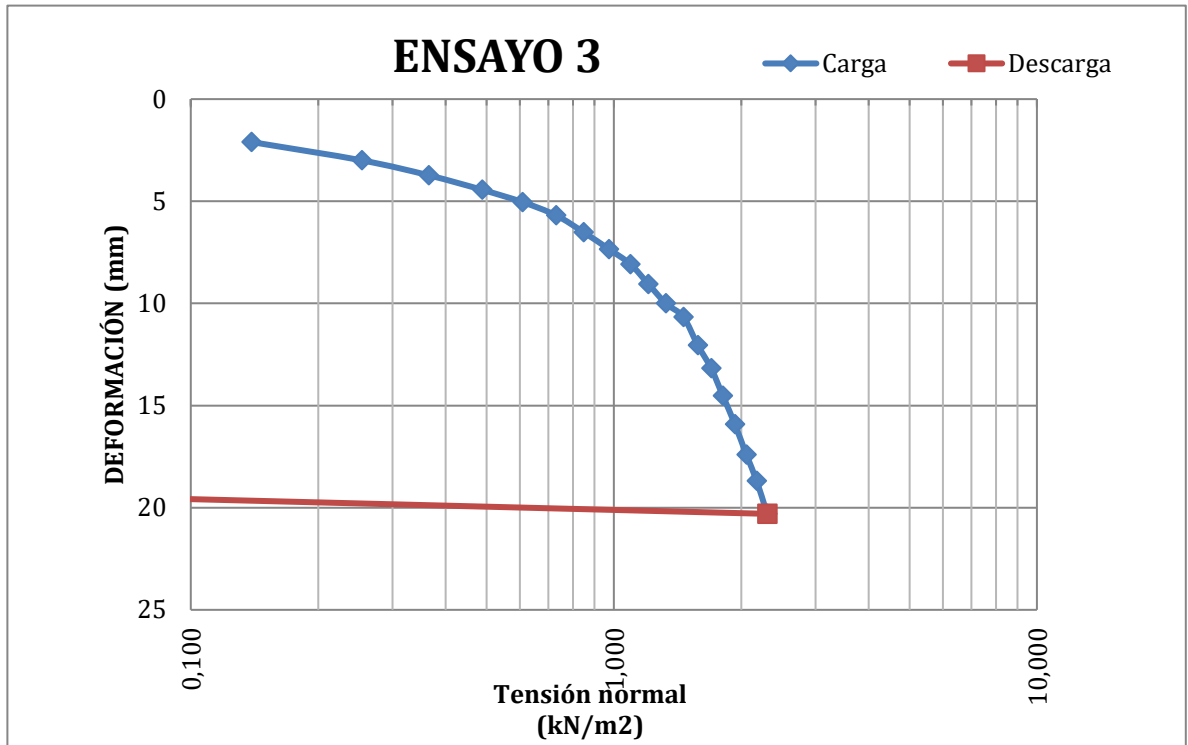


ANEXO H. GRÁFICA TENSIÓN NORMAL VS DEFORMACIÓN ENSAYO N°2.



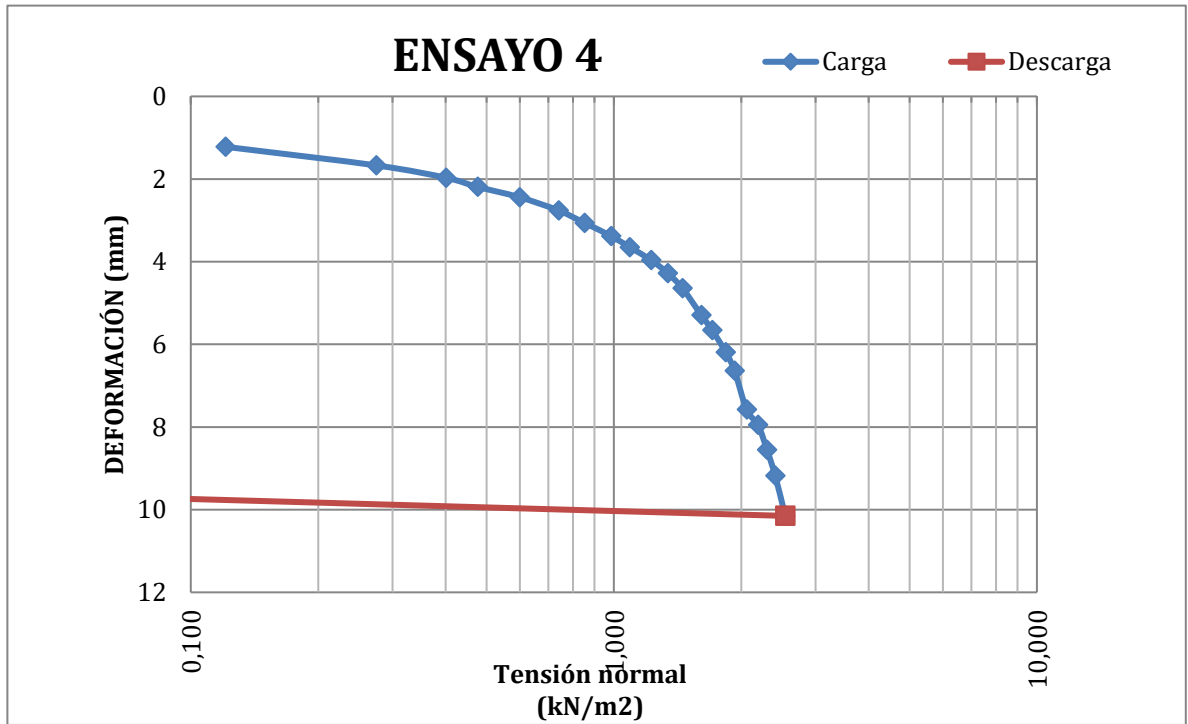
Fuente. Los Autores

ANEXO I. GRÁFICA TENSIÓN NORMAL VS DEFORMACIÓN ENSAYO N°3.



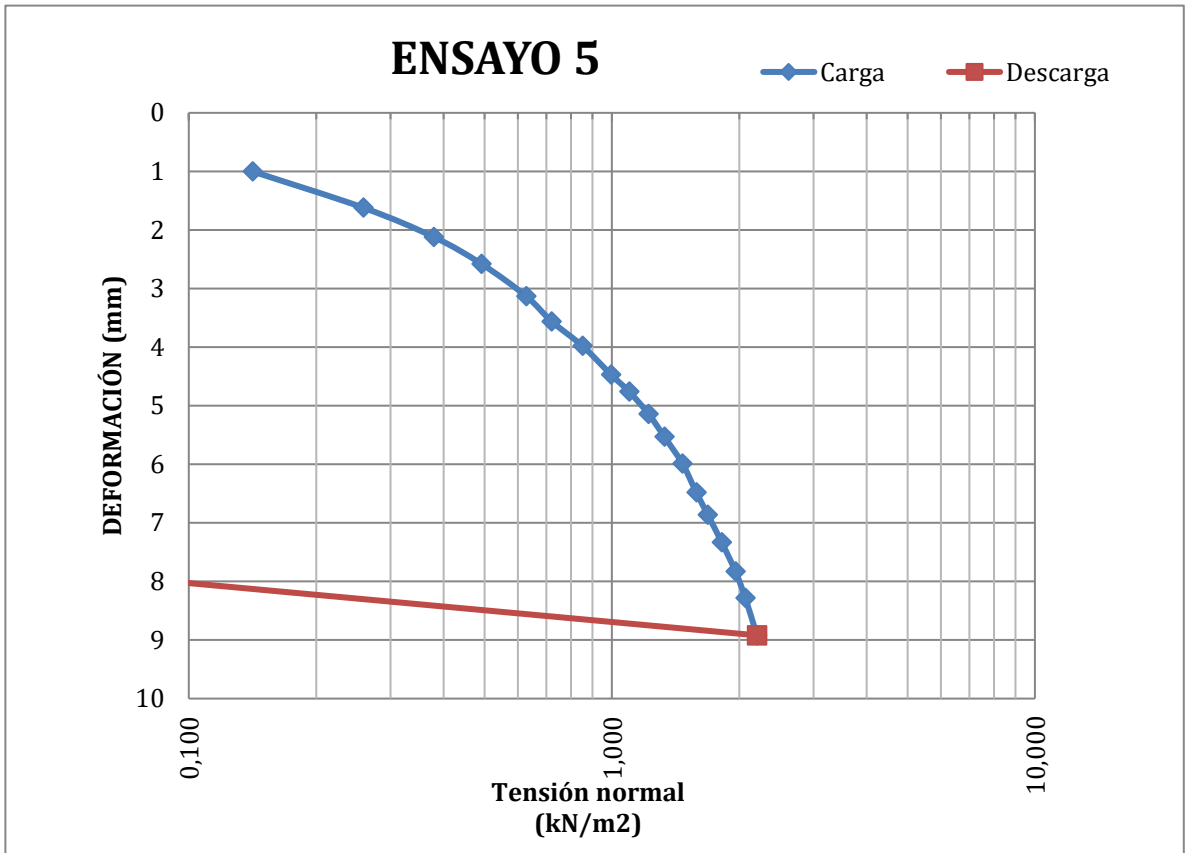
Fuente. Los Autores

ANEXO J. GRÁFICA TENSIÓN NORMAL VS DEFORMACIÓN ENSAYO N°4.



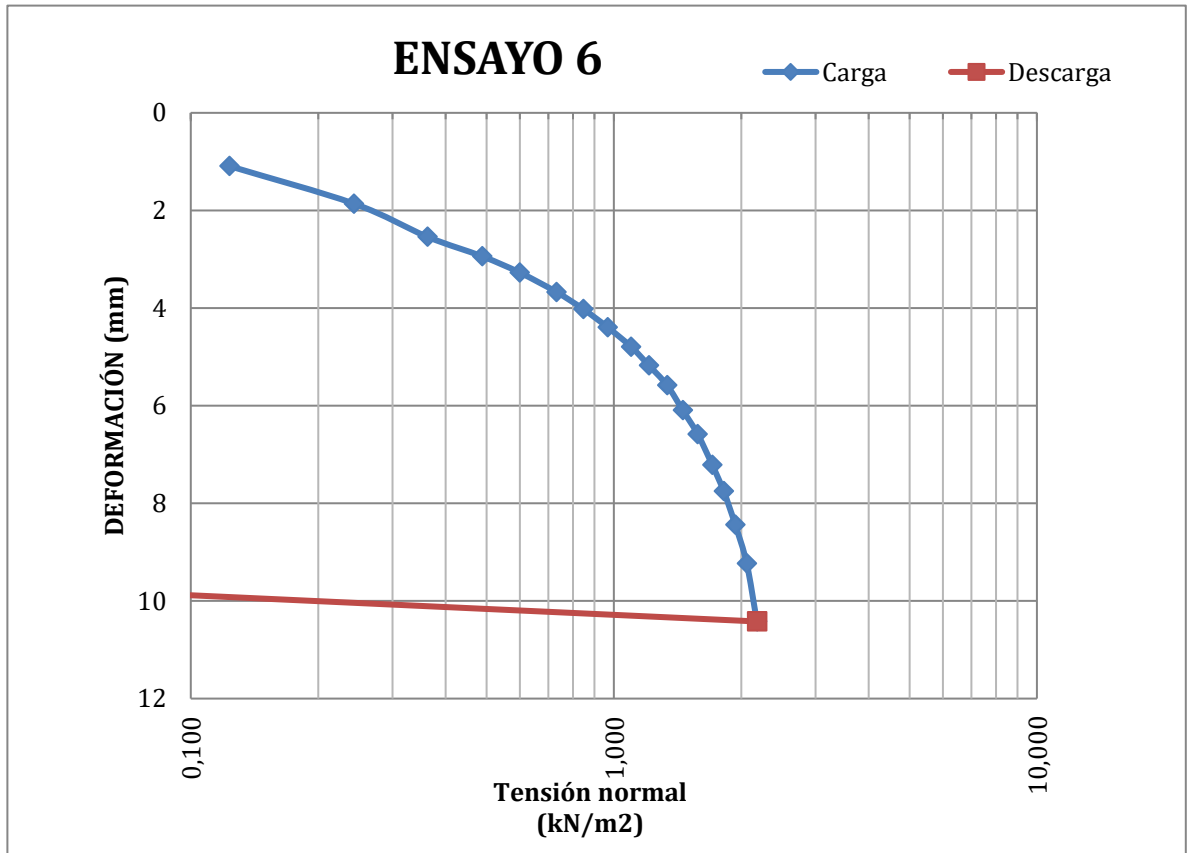
Fuente. Los Autores

ANEXO K. GRÁFICA TENSIÓN NORMAL VS DEFORMACIÓN ENSAYO N°5.



Fuente. Los Autores

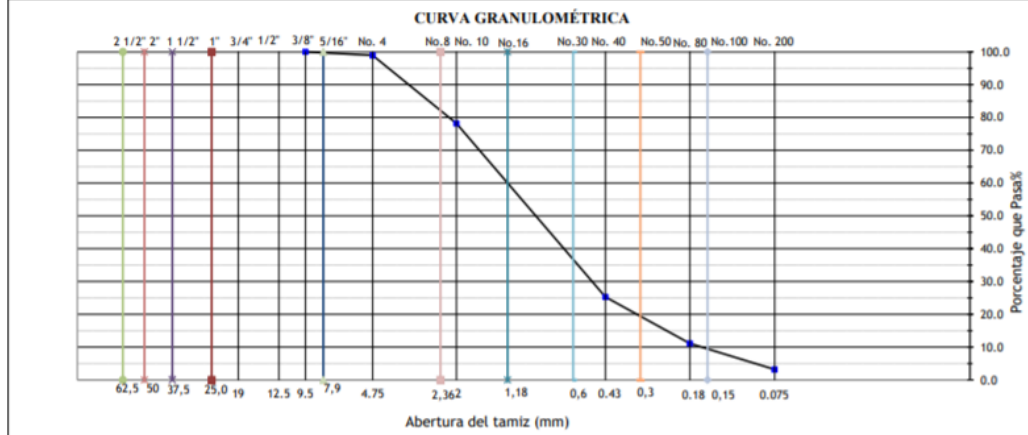
ANEXO L. GRÁFICA TENSIÓN NORMAL VS DEFORMACIÓN ENSAYO N°6.



Fuente. Los Autores

ANEXO M. ENSAYO GRANULOMÉTRICO ARENAS.

| Masa muestra total seca antes de lavado (g)   |       | 795.1   |  |            |       |  |
|---|-------|---|--|------------|-------|--|
| Masa muestra total seca después de lavado (g) |       | 773.7   |  |            |       |  |
| Tamiz   |       | Masa de la fracción de cada tamiz en la muestra total (g) | Masa de la fracción de cada tamiz en la muestra reducida B (g) | % Retenido | %pasa |  |
| ""  | mm    |   |  |            |       |  |
| 1 1/2"  | 37.5  |   |  |            |       |  |
| 1"  | 25    |   |  |            |       |  |
| 3/4"  | 19    |   |  |            |       |  |
| 1/2"  | 12.5  |   |  |            |       |  |
| 3/8"  | 9.5   |   |  |            | 100.0 |  |
| No. 4   | 4.75  | 8.5   |  | 1.1        | 98.9  |  |
| No. 10  | 2     | 165.0   |  | 20.8       | 78.2  |  |
| No. 40  | 0.43  | 420.7   |  | 52.9       | 25.3  |  |
| No. 80  | 0.18  | 112.6   |  | 14.2       | 11.1  |  |
| No. 200                                       | 0.075 | 63.1  |  | 7.9        | 3.2   |  |



Fuente. Proveedor material

**ANEXO N. ENSAYO EQUIVALENCIA DE ARENA PROMEDIO.**

|   |                                  |     |  |  |
|---|----------------------------------|-----|--|--|
| Solución utilizada: Stock   | Tiempo de reposo (10 min ± 1r 10 |     | Periodo de sedimentación (20 min ± 15s) 20 |  |
| Prueba No.  | 1                                | 2   | 3  |  |
| Lectura Arcilla (mm)  | 138                              | 140 | 140  | Método de ensayo: Manual                 |
| Lectura de Arena, incluida longitud del indicador de lectura (mm) | 352                              | 350 | 350  | Longitud indicador de arena (mm) 254.0   |
| Lectura Arena (mm)  | 98                               | 96  | 96   | <b>EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO (%)</b> |
| Equivalente de arena (%)  | 71                               | 69  | 69   | <b>69</b>                                |
| OBSERVACIONES:<br>_____<br>_____                                  |                                  |     |  |  |

*Fuente. Proveedor material.*

**ANEXO O. DETERMINACIÓN AZUL DE METILENO PARA ARENAS.**

|   |            |
|---|------------|
| <b>ETERMINACION DEL VALOR DE AZUL DE METILENO</b>             |            |
| Fraccion que pasa tamiz 75 µm                                 | X          |
| Fraccion que pasa tamiz 4,75 mm                               |            |
| Volumen total añadido de la solución de azul de metileno (ml) | 12.0       |
| Masa de la muestra seca de ensayo (g)                         | 30.0       |
| <b>VALOR DEL AZUL DE METILENO (%)</b>                         | <b>4.0</b> |
| OBSERVACIONES:<br>_____<br>_____                              |            |

*Fuente. Proveedor material*

## ANEXO P. PARTÍCULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO.

PORCENTAJE DE PARTICULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO (I.N.V. E-227/13)  
Referencia: MDC-25

| Tamaño máximo de                |         | No. ESPECIFICADO DE CARAS FRACTURADAS: A PARTIR DE UNA CARA  |   |                                   |  |
|---------------------------------|---------|--|---|-----------------------------------|--|
| Tamiz                           |         | Masa porción de ensayo                                       | Masa de partículas fracturadas                        | Masa de partículas no fracturadas | Porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas |
| Pasa                            | Retiene | (g)  | (g)   | (g)                               | (%)  |
| Tamaño máximo de la muestra:    | 1"      | 3205,0   | 2981,0  | 224,0                             | 93   |
|                                 | 3/8"    | 224,6  | 205,0   | 19,6                              | 91   |
|                                 |         | No. ESPECIFICADO DE CARAS FRACTURADAS: A PARTIR DE DOS CARAS |   |                                   |  |
|                                 | 1"      | 3205,0   | 2729,0  | 476,0                             | 85   |
|                                 | 3/8"    | 224,6  | 168,0   | 56,6                              | 75   |
| Masa total porción de ensayo(g) |         | 3429,6   | % DE CARAS FRACTURADAS POR MASA A PARTIR DE UNA CARA  |                                   | 93   |
|                                 |         |  | % DE CARAS FRACTURADAS POR MASA A PARTIR DE DOS CARAS |                                   | 84   |

*Fuente. Proveedor material*

## ANEXO Q. CONTENIDO DE VACÍOS EN AGREGADO FINO.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS EN AGREGADOS FINOS NO COMPACTADOS-ANGULARIDAD (I.N.V. E-239/13)  
Referencia: MDC-25

| Prueba No.   | 1     | 2     |
|--|-------|-------|
| Masa del cilindro (g)                                  | 191,0 | 191,0 |
| Volumen del cilindro (cm <sup>3</sup> )                | 100,0 | 100,0 |
| Masa de la muestra + cilindro (g)                      | 327,9 | 327,8 |
| Masa neta de la muestra (g)                            | 136,9 | 136,8 |
| Gravedad específica de la muestra (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,61  | 2,61  |
| Angularidad del agregado fino (%)                      | 47,5  | 47,6  |
| ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO (%)                      | 48    |       |

*Fuente. Proveedor material*



## ANEXO R. ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO.

ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS (I.N.V. E-230/13)

Referencia MDC-25

| ÍNDICE DE APLANAMIENTO |         |   |   |   |  |  |
|------------------------|---------|---|---|---|--|--|
| Tamiz                  |         | Masa de las partículas en cada fracción (g) | Masa de partículas planas que pasan (g) | Índice de aplanamiento por fracción (%) | Suma de las masas de las partículas en cada fracción (g) | Suma de las masas de las partículas planas (g) |
| Pasa                   | Retiene |   |   |   |  |  |
| 1 ½"                   | 1 "     |   |   |   | 4.226,0  | 577,5  |
| 1"                     | 3/4"    | 1.302,0                                     | 164,5                                   | 12,6%                                   |  |  |
| 3/4"                   | 1/2"    | 1.145,0                                     | 151,8                                   | 13,3%                                   |  |  |
| 1/2"                   | 3/8"    | 754,0                                       | 115,1                                   | 15,3%                                   |  |  |
| 3/8"                   | 1/4"    | 1.025,0                                     | 146,1                                   | 14,3%                                   |  |  |
| TOTALES                |         |   |   |   | 4.226,0  | 577,5  |
| ÍNDICE DE APLANAMIENTO |         |   |   |   |  | 14%  |
| ÍNDICE DE ALARGAMIENTO |         |   |   |   |  |  |
| Tamiz                  |         | Masa de las partículas en cada fracción (g) | Masa de partículas largas retenidas (g) | Índice de alargamiento por fracción (%) | Suma de las masas de las partículas en cada fracción (g) | Suma de las masas de las partículas largas (g) |
| Pasa                   | Retiene |   |   |   |  |  |
| 1 ½"                   | 1 "     |   |   |   | 4.226,0  | 697,4  |
| 1"                     | 3/4"    | 1.302,0                                     | 90,2                                    | 6,9%                                    |  |  |
| 3/4"                   | 1/2"    | 1.145,0                                     | 151,9                                   | 13,3%                                   |  |  |
| 1/2"                   | 3/8"    | 754,0                                       | 167,0                                   | 22,1%                                   |  |  |
| 3/8"                   | 1/4"    | 1.025,0                                     | 288,3                                   | 28,1%                                   |  |  |
| TOTALES                |         |   |   |   | 4.226,0  | 697,4  |
| ÍNDICE DE ALARGAMIENTO |         |   |   |   |  | 17%  |

Fuente. Proveedor material

## ANEXO S. EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO.

| EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS (I.N.V. E-133/13) MÉTODO MANUAL |     |     |     |                                   |       |  |
|--|-----|-----|-----|-----------------------------------|-------|--|
| Referencia: MDC-25   |     |     |     |                                   |       |  |
| Prueba No.   | 1   | 2   | 3   |                                   |       |  |
| Lectura Arcilla (mm)   | 162 | 164 | 164 |                                   |       |  |
| a, incluida longitud del indicador   | 348 | 348 | 350 | Longitud indicador de arena (mm)  | 254,0 |  |
| Lectura Arena (mm)   | 94  | 94  | 96  | EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO (%) |       |  |
| Equivalente de arena (%)   | 58  | 57  | 59  |                                   | 58    |  |

*Fuente. Proveedor material*

## ANEXO T. AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS.

| VALOR DEL AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS (I.N.V. E-235/13) |      |
|---|------|
| Referencia: MDC-25  |      |
| DETERMINACION DEL VALOR DE AZUL DE METILENO                     |      |
| Fraccion que pasa tamiz 75 $\mu$ m                              | X    |
| Fraccion que pasa tamiz 4,75 mm                                 |      |
| Solución de azul de metileno total utilizada (ml)               | 11,0 |
| Masa de la muestra seca (g)                                     | 30,0 |
| VALOR DEL AZUL DE METILENO (%)                                  | 3,7  |

*Fuente. Proveedor material*

## ANEXO U. RESISTENCIA AL DESGASTE

RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS <37,5mm (1 1/2") Y >19 mm (3 /4") POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES (I.N.V. E-218 Y 219)

Referencia: MDC-25

Tamaño máximo nominal (mm): 1"

| Prueba                                   | En seco<br>100Rev | En seco<br>500Rev | Despues de<br>48h de<br>inmersión<br>500rev. |
|--|-------------------|-------------------|--|
| Gradación usada                          | B                 | B                 | B  |
| No. De esferas                           | 11                | 11                | 11   |
| No. De revoluciones                      | 100               | 500               | 500  |
| Masa muestra seca inicial de ensayo (g)  | 5003,2            | 5003,2            | 5002,6                                       |
| Masa muestra seca despues del ensayo (g) | 4746,3            | 3892              | 3702   |
| PORCENTAJE DESGASTE (%)                  | 5%                | 22%               | 26%  |
| RELACIÓN HÚMEDO/SECO A 500 REV.          | 1                 |                   |  |

Tabla 218-1. (norma I.N.V. E-218/13) Granulometrías de la muestra de agregado para ensayo

*Fuente. Proveedor material*

## ANEXO V. RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO AL DESGASTE.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DESGASTE POR ABRASIÓN UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL (I.N.V.E-238/13)

Referencia: MDC-25

| Prueba No.                         | 1               | 2               |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Gradación usada                    | A = $\geq 3/4"$ | A = $\geq 3/4"$ |
| Masa de esferas (g)                | 5001,6          | 5002            |
| No. De revoluciones totales (RPM)  | 12000           | 12000           |
| Masa muestra seca inicial (g)      | 1500,4          | 1501,6          |
| Masa muestra seca final (g)        | 1330,4          | 1326,9          |
| PÉRDIDA MICRO - DEVAL (%)          | 11,3            | 11,6            |
| PÉRDIDA MICRO - DEVAL PROMEDIO (%) | 11              |                 |

*Fuente. Proveedor material*

**ANEXO W. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE FINOS.**

| DETERMINACIÓN DEL VALOR DE 10% FINOS (I.N.V. E-224/13)                             |        |
|--|--------|
| Referencia:  | MDC-25 |
| <b>MATERIAL SECO</b>   |        |
| Masa del material que contiene el recipiente cilindrico (g)                        | 2651,2 |
| Masa del material retenido en el tamiz No. 8 despues de la aplicación de carga (g) | 2391,2 |
| Penetración del pistón de carga (mm)   | 22,0   |
| PORCENTAJE DE FINOS (%)  | 9,8    |
| VALOR EN SECO OBTENIDO (CARGA KN)  | 220,54 |
| VALOR EN SECO CALCULADO AL 10%FINOS (CARGA KN)                                     | 223,62 |
| <b>MATERIAL HÚMEDO</b>   |        |
| Masa del material que contiene el recipiente cilindrico (g)                        | 2654,3 |
| Masa del material retenido en el tamiz No. 8 despues de la aplicación de carga (g) | 2415,9 |
| Penetración del pistón de carga (mm)   | 22,0   |
| PORCENTAJE DE FINOS (%)  | 9,0    |
| VALOR EN HUMEDO OBTENIDO (CARGA KN)  | 182,44 |
| VALOR EN HUMEDO CALCULADO AL 10%FINOS (CARGA KN)                                   | 196,75 |
| RELACIÓN HÚMEDO/SECO AL 10 % FINOS   | 88     |

*Fuente. Proveedor material.*

**ANEXO X. SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS.**

SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO(I.N.V. E-220/13)  
Referencia: MDC-25

| AGREGADO GRUESO                |         |                    |                     |                              |                                       |                         |                                     |                 |                   |
|--------------------------------|---------|--------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| FRACCIÓN                       |         | Gradación original | Gradación corregida | Masa de la fracción ensayada | No de partículas al iniciar el ensayo | Masa despues del ensayo | No de partículas despues del ensayo | Pérdida en Masa | Perdida ponderada |
| Pasa                           | Retiene | (%)                | (%)                 | (g)                          |                                       | (g)                     |                                     | %               | %                 |
| 2 1/2"                         | 2"      |                    |                     |                              |                                       |                         |                                     |                 |                   |
| 2"                             | 1 1/2"  |                    |                     |                              |                                       |                         |                                     |                 |                   |
| 1 1/2"                         | 1"      |                    |                     |                              |                                       |                         |                                     |                 |                   |
| 1"                             | 3/4"    | 12,5               | 25,5                | 523,8                        | 31                                    | 481,6                   | 30                                  | 8,1             | 2,1               |
| 3/4"                           | 1/2"    | 11,5               | 23,5                | 663,8                        |                                       | 623,5                   |                                     | 6,1             | 1,4               |
| 1/2"                           | 3/8"    | 7,5                | 15,3                | 330,1                        |                                       | 305,4                   |                                     | 7,5             | 1,1               |
| 3/8"                           | No. 4   | 17,5               | 35,7                | 300,2                        |                                       | 277,5                   |                                     | 7,6             | 2,7               |
| SANIDAD DEL AGREGADO GRUESO(%) |         |                    |                     |                              |                                       |                         |                                     |                 | 7,3               |
| AGREGADO FINO                  |         |                    |                     |                              |                                       |                         |                                     |                 |                   |
| FRACCIÓN                       |         | Gradación original | Gradación corregida | Masa de la fracción ensayada | Masa despues del ensayo               | Pérdida en Masa         | Perdida ponderada                   |                 |                   |
| Pasa                           | Retiene | (%)                | (%)                 | (g)                          | (g)                                   | %                       | %                                   |                 |                   |
| 3/8"                           | No. 4   | 17,5               | 30,3                | 300,2                        | 277,5                                 | 7,6                     | 2,3                                 |                 |                   |
| No. 4                          | No. 8   | 11,8               | 20,5                | 100,0                        | 94,6                                  | 5,4                     | 1,1                                 |                 |                   |
| No. 8                          | No. 16  | 8,3                | 14,4                | 100,0                        | 95,2                                  | 4,8                     | 0,7                                 |                 |                   |
| No. 16                         | No. 30  | 8,1                | 14,0                | 100,0                        | 93,8                                  | 6,2                     | 0,9                                 |                 |                   |
| No. 30                         | No. 50  | 6,5                | 11,3                | 100,0                        | 92,0                                  | 8,0                     | 0,9                                 |                 |                   |
| No. 50                         | No. 100 | 5,5                | 9,5                 | 100,0                        | 96,0                                  | 4,0                     | 0,4                                 |                 |                   |
| SANIDAD DEL AGREGADO FINO (%)  |         |                    |                     |                              |                                       |                         |                                     |                 | 6,2               |

*Fuente. Proveedor material*

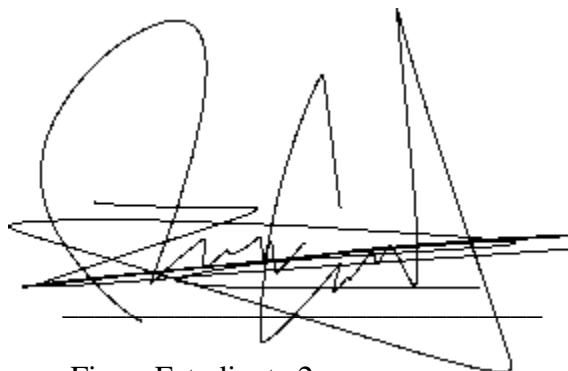


---

Firma Estudiante 1

Jhimer Andres Quiñones

Código 506487



---

Firma Estudiante 2

Andrés Camilo Contreras Torres

Código 503772

---

Firma Asesor del Trabajo de Grado

Juan Carlos Ruge Cárdenas

FECHA (17/11/2020)

