



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS**

**“Evaluación de la precisión en la determinación de densidad natural de material de base de un pavimento urbano en la ciudad del Cusco”**

**PRESENTADO POR**

**QUISPE HUAMAN, Víctor.**

**Bachiller en Ingeniería Civil**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**ASESOR TECNICO:**

**ING. GIANCARLO V. FERNANDEZ VENERO**

**ASESOR METODOLÓGICO:**

**Dr. EDWARDS JESUS AGUIRRE ESPINOZA**

**CUSCO-PERÚ**

**2019**

## DEDICATORIA

Por encima de todo, dedico esta tesis a Dios, quien me puso de esta manera, permitiéndome reconocer y descubrir cómo ser mejor paso a paso, administrando de manera consistente mi preparación como profesional.

De igual forma dedico esta tesis a mis padres: **ISAIAS Y JUANA** que han sabido formarme con buenos hábitos de humildad, sentimientos y valores, lo cual me ha ayudado a sobre salir de cualquier obstáculo. A mis hermanos **MARIO, PAULINA, SANTOS, ISABELA, MELCHOR, BENEDICTA** quienes me han apoyado y por estar dispuestos a escucharme y ayudarme en cualquier momento. familia en general, por su ayuda incondicional y por impartirme grandes momentos con mi persona.

El Autor

## AGRADECIMIENTO

Mis Sinceros Agradecimientos a la Universidad Alas Peruanas - Cusco escuela profesional de ingeniería civil y en ella a los distinguidos docentes quienes con su experiencia y ética nos enseñaron en las aulas donde a cada uno de los que acudimos con sus conocimientos nos guiaron que nos servirán en nuestra profesión.

Al Ing. Milner Moscoso Muñoz quien con su experiencia como ingeniero constructor ha sido la guía idónea durante el proceso que ha llevado realizar esta tesis, me ha brindado el tiempo necesario, como la información para que este anhelo tan esperado sea realidad y llegue a ser felizmente culminado.

A mis asesores ing. Giancarlo, Dr. Edwards y Dictaminantes ing. Cesar, ing. David quien con sus experiencias que me han guiado a que esta investigación se realice.

A mi compañera Ruth C.C. quien en las buenas y malas siempre estuvo a mi con su apoyo incondicional y así seguir adelante para la realización de presente investigación.

El Autor

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo principal de la presente tesis fue determinar la precisión de los ensayos tradicionales de densidad de campo in-situ.

Habiendo se estudiado con el método, el tipo y nivel de investigación de la presente tesis es una de tipo descriptiva exploratoria. La población tomada para la presente investigación son las bases de pavimento urbano de la ciudad. En cuanto a las técnicas e instrumentos para la recolección de datos: en la primera fase de la tesis, la principal técnica de recolección de datos fue la recopilación documental, tanto de las bases teóricas para la tesis como de los antecedentes de investigaciones similares. Luego en la fase de ejecución de ensayos de campo y laboratorio, las principales técnicas de recolección han sido los protocolos de medición tanto de las propiedades geométricas como de las propiedades mecánicas del talud. Sobre los procedimientos de investigación e interpretación de los datos se debe tener en cuenta que estos incluyen: análisis documental, codificación temática, análisis estadístico, entre otras.

De acuerdo con lo desarrollado en la tesis, se tienen las siguientes conclusiones generales si es posible hallar la precisión de estos ensayos, a diferencia lo que sostienen las normas actuales a través del uso de una herramienta como los estudios de repetitividad y reproducibilidad (R&R).

## ABSTRACT

The main objective of this thesis was to determine the accuracy of traditional in-situ field density tests. With respect to the method, the type and level of research of this thesis is an exploratory descriptive type. The population taken for the present investigation are the urban pavement bases of the city. Regarding the techniques and instruments for data collection: in the first phase of the thesis, the main technique of data collection was the documentary compilation, both the theoretical basis for the thesis and the background of similar research. Then in the execution phase of field and laboratory tests, the main collection techniques have been the measurement protocols of both the geometrical properties and the mechanical properties of the slope. On the techniques of analysis and interpretation of information, it should be noted that these include: documentary analysis, thematic coding, statistical analysis, among others. According to what has been developed in the thesis, we have the following general conclusions if it is possible to find the precision of these tests, contrary to what the current norms maintain through the use of a tool such as repetitiveness and reproducibility (R & R) studies. .

## INTRODUCCIÓN

Presente tesis detalla la particularidad de la investigación titulado como: “Evaluación de la precisión en la determinación de densidad natural de material de base de un pavimento urbano en la ciudad del Cusco”.

El Capítulo I, describe la formulación del problema, los objetivos, la justificación e importancia del estudio y la limitación de la investigación.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico de la investigación, empezando por los antecedentes tanto internacionales como nacionales. Luego, se prosigue con las bases teóricas mencionadas. Finalmente, en este capítulo se definen los términos básicos, detalla la hipótesis y las variables del estudio.

El Capítulo III explica la metodología empleada para la investigación, así como su población y tipo de muestreo, y las técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.

En el Capítulo IV, se hace el respectivo análisis y discusión de los resultados.

En el Capítulo V, en función que se obtuvo los resultados se desarrolla las principales conclusiones y recomendaciones de la tesis.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT .....	v
INTRODUCCIÓN .....	vi
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO .....	1
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN. ....	3
1.2.1. Problema General .....	3
1.2.2. Problemas Específicos.....	3
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.3.1. Objetivo general .....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO .....	4
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.5.1. Delimitación espacial .....	4
1.5.2. Delimitación temporal.....	4
1.5.3. Delimitación conceptual.....	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	6
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	8
2.2. BASES TEÓRICAS .....	8
2.2.1. Medición.....	8
2.2.2. Errores de Precisión - Variación (difusión de los valores de medida) .....	9

2.2.2.1. Repetibilidad.....	9
2.2.2.2. Reproducibilidad .....	9
2.2.2.3. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) del sistema de medición. ....	10
2.2.3. Procedimiento del estudio de repetitibilidad y reproducibilidad .....	11
2.2.4. Métodos para el estudio de repetitibilidad y reproducibilidad .....	11
2.2.5. Concepto de Base de Pavimento .....	16
2.2.6. Compactación in situ.....	17
2.2.7. Ensayos de densidad de campo .....	17
2.2.8. Determinación de la Densidad de Campo por el Método del Cono de Arena .....	22
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS .....	35
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	37
2.4.1. Hipótesis general .....	38
2.4.2. Hipótesis específicas .....	38
2.5. VARIABLES .....	38
2.5.1. Variables de Estudio.....	38
2.5.2. Variables Intervinientes.....	38
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	39
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	39
3.2.1. Población.....	39
3.2.2. Muestra.....	39
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS ..	39
3.3.1. Técnicas de recolección de información .....	39
3.3.2. Técnicas de análisis e interpretación de la información.....	40

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
4.1. EJECUCIÓN DEL ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y DE REPRODUCIBILIDAD.....	41
4.2. CALIBRACIÓN DE LA ARENA .....	42
4.3. CALIBRACIÓN DEL CONO .....	42
4.4. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	42
4.5. EJECUCIÓN DEL ESTUDIO R&R.....	44
4.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO R&R. ....	45
4.6.1. Componentes de la varianza.....	46
4.6.2. Variación del estudio.....	46
4.6.3. Fuentes de la Varianza .....	47
4.6.4. Desviación Típica.....	48
4.6.5. Indicadores de estado .....	48
4.6.6. Estadísticas de las Mediciones por Operario y por Partes .....	49
4.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	50
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
5.1. CONCLUSIONES .....	52
5.2. RECOMENDACIONES .....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXO I : Panel fotográfico de la investigación.....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Compactación de una Base en Carretera.....	2
Figura 2: Aparato de cono de arena. ....	25
Figura 3: Plato base del aparato cono de arena.....	26
Figura 4: Speedy 2000 Determinador de humedad.....	28
Figura 5: Bases para la ejecución de las pruebas.....	41
Figura 6: Foto de los especímenes .....	41
Figura 7: Componentes de la varianza del estudio R&R.....	47
Figura 8: Dispersigrama de la medición de las partes. ....	49
Figura 9: Dispersigrama de la medición de los operadores. ....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de Anova para un sistema de medición es la que se muestra : .....	12
Tabla 2: Volúmenes de agujeros de ensayos mínimos basados en el tamaño máximo de partícula. ....	32
Tabla 3: Resultados del operario 01.....	43
Tabla 4: Resultados del operario 02.....	43
Tabla 5: Resultados del operario 02.....	44
Tabla 6: Resumen de resultados del estudio R&R.....	45
Tabla 7: Componentes de la varianza del estudio R&R. ....	46
Tabla 8: Componentes de la varianza del estudio R&R. ....	47
Tabla 9: Desviación típica del estudio R&R.....	48
Tabla 10: Indicadores de estado del estudio R&R.....	49

## ÍNDICE DE PANEL FOTOGRÁFICO

Fotografía 1: Se aprecia el lavado de arena .....	57
Fotografía 2: La arena ya lavada.....	57
Fotografía 3: Arena listo para poner al horno .....	58
Fotografía 4: Colocado de arena en el horno para el secado de 24 horas a una temperatura 110 °c.....	58
Fotografía 5: Preparando material de base.....	59
Fotografía 6: Preparando material para la muestra .....	59
Fotografía 7: Compactando con el pison .....	60
Fotografía 8: Preparando material para la otra muestra.....	60
Fotografía 9: Compactando.....	61
Fotografía 10: Tenemos las muestras ya secas .....	61
Fotografía 11: Colocado para la perforacion junto con el plato base .....	62
Fotografía 12: Se ha perforado ya los hoyos en cada muestra.....	62
Fotografía 13: Muestra 02.....	63
Fotografía 14: Muestra 01.....	63
Fotografía 15: Peso del proctor modificado.....	64
Fotografía 16: Tomando el peso del aparato del Cono de arena.....	64
Fotografía 17: Invertiendo el cono de arena para calibrar .....	65
Fotografía 18: Se suelta el material .....	65
Fotografía 19: El proctor modificado ya con la arena .....	66

Fotografía 20: Eliminando la arena sobrante .....	66
Fotografía 21: Toma de peso del proctor + arena .....	67
Fotografía 22: Rellenado de aparato de cono de arena con arena tamizado con la malla # 10 .....	67
Fotografía 23: Tamizando.....	68
Fotografía 24: Se toma el peso.....	68
Fotografía 25: Registrando los datos .....	69
Fotografía 26: Enumerando las muestras.....	69
Fotografía 27: Realizando el proceso .....	70
Fotografía 28: Continuando con el proceso .....	70
Fotografía 29: Continuando con el proceso .....	71
Fotografía 30: Toma de datos del operario 01 .....	71
Fotografía 31: Realizando el ensayo el segundo operario .....	72
Fotografía 32: Realizando el el trabajo el tercer operario.....	73
Fotografía 33: Prosiguiendo con el ensayo .....	73
Fotografía 34: Registro de Datos .....	74
Fotografía 35: Los resultados del Operario 03 .....	74

## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO

### 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La norma (MTC E,117) – 2000 titulada: “ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE LOS SUELOS EN EL CAMPO POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA.”; a la letra dice:

“La precisión de este ensayo puede ser afectada por suelos que se deforman fácilmente o que sufran cambios volumétricos en el hoyo excavado debido a que el personal camine o se detenga cerca del hoyo durante el ensayo”.

Por otro lado, la misma norma define:

Establecimiento de la Precisión – Debido a la naturaleza del suelo o de los materiales rocosos que se probaron mediante este método, aún no es posible, o en todo caso sería muy costoso en estos momentos, producir especímenes múltiples que tengan propiedades físicas uniformes. Cualquier variación que se observe en los datos es sólo una probabilidad que se debe a la variación del espécimen o al operador, o una variación de la prueba de laboratorio. (MTC E,117, 2000, pág. 133)

Así mismo, más adelante el mismo documento referido determina:

“Establecimiento de la Confiabilidad – No existe un valor de referencia aceptado para este método de ensayo, por lo tanto, la confiabilidad no puede ser determinada.”

Por otro lado, cabe recordar el concepto de confiabilidad: “Grado en que una prueba, un experimento o un instrumento de medición entrega los mismos resultados cada vez” (boletinagrario.com).

Finalmente, el mismo documento citado, estipula:

“Las pruebas realizadas por operadores inexpertos en el mismo material pueden producir diferencias sustancialmente mayores.”

Conforme se aprecia, la norma no determina que precisión debería alcanzar un ensayo de densidad, esto origina como efecto inevitable que, durante el control de calidad de las pavimentaciones, por ejemplo, se generen controversias en la aprobación de la densidad de campo, es decir en su cumplimiento respecto de las especificaciones técnicas de obra.

Las controversias al respecto pueden generar tanto paralizaciones de obra como aceptación y validación de trabajos de compactación que, en realidad tienen una calidad inadecuada y por lo tanto son inaceptables por la supervisión.

Finalmente, la consecuencia previsible es que la obra no llegue a la vida útil esperada por que los controles de calidad pueden estar debajo aún de los valores probabilísticamente adecuados.

### **Figura 1: Compactación de una Base en Carretera**



Fuente: steemkr.com

Una mejor verificación de calidad se puede obtener sabiendo y especificando cual es la precisión de cualquier ensayo, más aún de un ensayo de densidad natural o de campo, el cual como ya se ha visto, se ve afectado por múltiples factores, entre los cuales uno de los más influyentes es la pericia del operario.

Si en un expediente técnico se determina, además del valor promedio, la precisión a la que deberá llegar la medición entonces se tendrá un mejor criterio para evaluar su cumplimiento de control de calidad de cualquier compactación.

Entonces, queda la incógnita y el problema planteado: respecto de la precisión de este tipo de ensayos, y esa es precisamente la problemática sobre la cual la presente investigación trata de dilucidar.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuál es la precisión en la determinación de la densidad in-situ de material de base de un pavimento urbano?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

¿Cuáles son los factores que inciden en la determinación de la precisión de la densidad in-situ de un material de base para pavimento?

¿La medición de la densidad de campo usando el método tradicional satisface la precisión requerida?

## **1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar la precisión en la determinación de densidad natural de material de base de un pavimento urbano.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

Establecer los factores que intervienen en la medición de la densidad natural de un material de base para pavimento.

Determinar la precisión de la medición de la densidad de campo usando un método tradicional.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO**

La presente investigación pretende ser una guía actual para la determinación de la precisión en la medición de la densidad por el método del cono de arena, estableciendo las circunstancias que la alteran y analizando sus efectos de forma numérica y estadística.

La presente tesis sirve para que, tanto residentes de obra, como supervisores, tengan un criterio estadístico paramétrico para poder aceptar o rechazar la conformación de bases de pavimento urbano.

Así mismo, los proyectistas de obras viales, tales como pavimentaciones tendrán una fuente de información para establecer mejor y con mayor amplitud las exigencias de densidad que deban cumplir sus proyectos.

#### **1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **1.5.1. Delimitación espacial**

El ámbito geográfico en el que se va investigar y aplicar los instrumentos de investigación será en la ciudad del Cusco.

##### **1.5.2. Delimitación temporal**

La información que se utilizará para la investigación será desarrollada y obtenida mediante diversos ensayos y pruebas de suelos llevados a cabo durante el año 2018.

##### **1.5.3. Delimitación conceptual**

Está delimitada por:

La mecánica de los suelos.

La densidad de los sólidos.

La geometría de los cuerpos sólidos.

La precisión en las mediciones.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

##### **Estudio de determinaciones de densidad in situ para bases y suelos.**

Estudio llevado a cabo por J.F. (estudio de determinación de densidad in situ para bases y suelos), en la estación experimental de Waterways del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de Norteamérica.

El estudio se realizó para determinar la cantidad de error inherente a varios métodos utilizados por varias organizaciones para medir la densidad in situ de bases y suelos. Se estudiaron cuatro métodos: (a) desplazamiento de arena, (b) globo de agua, (c) desplazamiento de aceite, y (d) cilindros hincados. Se ideó un procedimiento de laboratorio para comparar la precisión del equipo bajo condiciones controladas y se realizaron pruebas de campo para comparar los métodos en condiciones de campo. Solo se pudieron utilizar los métodos de desplazamiento de arena y globo de agua en las pruebas de laboratorio. Se determinó que se puede esperar una variación de 1 lb/pie<sup>3</sup> de error en el método del cono de arena.

Las pruebas de laboratorio demostraron que los aparatos era precisos para determinar los volúmenes de agujeros dentro de las siguientes tolerancias:

Globo de hule: 7%.

Densímetro de Washington: 3%

Frasco de vidrio y embudo: 4%

Tarro y cono de vidrio: 2%

Cono de arena: 1%.

Además, las pruebas de campo demostraron que la precisión de los conos de densidad de arena estaba dentro de aproximadamente 2.5%. (Redus)

### **Variabilidad en las pruebas de densidad de campo.**

Estudio conducido por Noorany, Gardner, Corley y Brown para la ASTM STP en el año 2000.

Este artículo describe un estudio comparativo de los tres más utilizados

Pruebas de densidad de campo: cono de arena, nuclear y cilindro hincado para evaluar el rango de la variabilidad de estas pruebas, se construyó un aparato de compactación de suelo a gran escala para que el suelo pudiera compactarse a un contenido de agua conocido y densidad seca en condiciones cercanas al control de laboratorio. Se realizaron cinco series de pruebas en este suelo compactado a cinco diferentes contenidos de agua y densidades secas. En cada serie a la par se usó: cono de arena, densímetro nuclear y cilindros hincados de 7.6 cm. Se encontró que los resultados de la prueba de cono de arena fueron más cercanos a los valores de campo que los resultados de las pruebas nucleares, esto se debió en parte a inexactitudes en las lecturas del contenido de agua de parte del dispositivo nuclear. Cuando el contenido de agua medidos por el dispositivo nuclear fue ignorado y los contenidos de agua que fueron medidos por secado en horno, los resultados de las pruebas nucleares se hicieron más precisos, pero el rango de variabilidad en los datos medidos no disminuyó significativamente.

La prueba del cilindro hincado tuvo una tendencia a subestimar la densidad de campo real, principalmente debido a la alteración del muestreo. A pesar del

control cuidadoso de las condiciones de prueba, los datos de los tres métodos de prueba tenían una amplia gama de variabilidad.

El método del cono de arena tiene la mejor precisión; sin embargo, midió valores relativos de compactación que estaban a un 5% del valor in-situ. La variabilidad actual de los datos de este tipo de prueba en condiciones de campo podría ser mayor que los que se encuentran en este estudio, debido al menor grado de control de la calibración del peso unitario de la arena y de otras condiciones de campo.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

Lamentablemente, no se han encontrado estudios de este tipo ni en el ámbito nacional, ni el local.

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. Medición**

Stevens, citado por Mattessich 2002, establece que la medición “es el proceso de organizar hechos y relaciones empíricas dentro de un modelo formal, un modelo tomado prestado de la matemática”.

Gil (2007), citando a Stevens, advierte que “la medición es la asignación de números a objetos o fenómenos, de acuerdo a ciertas reglas”. La teoría de la medición es distinta de la teoría de la medida, ésta la concibe el autor (Stevens) como “un desarrollo nuevo y altamente abstracto de la estadística y la teoría de conjuntos”.

Torgerson (1958) señala que “la medición es la asignación de números para representar propiedades de los sistemas materiales en virtud de leyes que gobiernan estas propiedades”.

## **2.2.2. Errores de Precisión - Variación (difusión de los valores de medida)**

### **2.2.2.1. Repetibilidad**

Según (Barrio, 1999, pág. 325), “La repetibilidad es la variación causada por el dispositivo de medición. Es la variación que se observa cuando el mismo operador mide la misma parte muchas veces, usando el mismo sistema de medición, bajo las mismas condiciones”.

La proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo las mismas condiciones de medición. Donde: (1) Estas condiciones son llamadas condiciones de repetibilidad. (2) Las condiciones de repetibilidad incluyen: el mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición, utilizado bajo las mismas condiciones, el mismo lugar, repetición en un periodo corto de tiempo. (3) La repetibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de la dispersión característica de los resultados. Tradicionalmente en los estudios r&R se le conoce como la variabilidad interna a la condición. (REYES, 2007)

### **2.2.2.2. Reproducibilidad**

Según (Barrio, 1999, pág. 325) La reproducibilidad “es la variación causada por el sistema de medición. Es la variación que se observa cuando diferentes operadores miden la misma parte muchas veces, usando el mismo sistema de medición, bajo las mismas condiciones.”

La proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo condiciones de medición que cambian. Donde: (1) Una declaración válida de reproducibilidad requiere que se especifique la condición que cambia. (2) Las condiciones que cambian pueden incluir: principio de medición, método de medición, observador, instrumento de medición, patrón de referencia, lugar, condiciones de uso, tiempo. (3) La reproducibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de la dispersión característica de los resultados. (4) Se entiende que los resultados usualmente son resultados corregidos. Tradicionalmente en los estudios r&R se le conoce como la variabilidad entre las condiciones. (REYES, 2007)

#### **2.2.2.3. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) del sistema de medición.**

Un estudio R&R del sistema de medición ayuda a investigar:

Repetibilidad: Qué tanto de la variabilidad en el sistema de medición es causada por el dispositivo de medición.

Reproducibilidad: Qué tanto de la variabilidad en el sistema de medición es causada por las diferencias entre los operadores.

Si la variabilidad del sistema de medición es pequeña en comparación con la variabilidad del proceso.

Si el sistema de medición es capaz de distinguir entre partes diferentes.

### **2.2.3. Procedimiento del estudio de repetitibilidad y reproducibilidad**

Según (REYES, 2007), Los pasos generales a seguir para la realización de los estudios de Repetitibilidad y Reproducibilidad son los siguientes:

- a. Calibrar el instrumento de medición o cerciorarse de que este se encuentre calibrado, para ello es necesario determinar el sesgo del aparato.
- b. Seleccionar de dos a tres operarios que se encuentren dentro del proceso de medición que se quiere evaluar.
- c. Pedir al primer operador que mida diez muestras en orden aleatorio (las muestras deberán ser identificadas del 1 a la 10). Pedir a una tercera persona, imparcial que registre los resultados.
- d. Pedir al segundo operador que mida las mismas diez muestras en orden aleatorio. Registre los resultados y repetir lo mismo con el tercer operador.
- e. Repetir los pasos 2 y 3 para el número requerido de pruebas cerciorándose de que los resultados de la prueba inicial no sean conocidos por los operadores.
- f. Utilizar un software o en su defecto calcular en base a fórmulas los estadísticos del estudio r & R.

### **2.2.4. Métodos para el estudio de repetitibilidad y reproducibilidad**

Según (Arbeláez, Sañazar, & Vargas, 2007), “Método de Rango o el método X-barra/R: descompone la variación total en tres categorías: elemento a elemento, repetitibilidad, y reproductibilidad.”

Método de Análisis De Varianza (ANOVA): 24 El método Anova, conocido también como análisis de varianza es el método más exacto para calcular la variabilidad de un

sistema de medición porque posee la ventaja de cuantificar la variación debida a la interacción entre los operadores y las partes. Este método está basado en la misma técnica estadística utilizada para analizar los efectos de los diferentes factores en el diseño de experimentos. (Arbeláez, Sañazar, & Vargas, 2007)

Para un sistema de medición, el método Anova debe realizarse para estudiar simultáneamente los efectos de dos fuentes de variación: Operadores y Partes.

**Tabla 1: Tabla de Anova para un sistema de medición es la que se muestra :**

Fuente de variación	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios
Operador	SSA	a-1	$MSA = \frac{SSA}{a-1}$
Partes	SSB	b-1	$MSB = \frac{SSB}{b-1}$
Interacción	SSAB	(a-1)(b-1)	$MSAB = \frac{SSAB}{(a-1)(b-1)}$
Error	SSE	Ab(n-1)	$MSE = \frac{SSE}{ab(n-1)}$
Total	SST	N-1	

Fuente: Anova para un sistema de medición con dos factores

Donde:

a es el número de operadores

b es el número de partes

n es el número de medidas para cada parte por cada operador

N es el número total de datos

Los pasos que se deben seguir para realizar la tabla del Anova de dos factores son:

I. Se calcula la suma total de todos los datos, como lo muestra la ecuación

$$T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n X_{ijk} \quad (1)$$

Donde  $X_{ijk}$  son cada uno de los datos del experimento.

II. Se calcula la suma del cuadrado de todos los datos por medio de la ecuación 2.

$$T_x^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n X^2_{ijk} \quad (2)$$

Donde  $X_{ijk}$  son cada uno de los datos del experimento.

III. Se calcula la suma de los cuadrados totales de las combinaciones de factores dividido por el tamaño muestral respectivo como lo muestra la ecuación 3.

$$T^2_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T^2_{ij} \quad (3)$$

Donde  $T_{ij}$  es la suma de los datos de cada por cada operador.

IV. Se calcula la suma de los totales para el factor 1 (Operadores) y se divide por su espacio muestral respectivo por medio de la ecuación 4.

$$T^2_1 = \frac{1}{bn} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n T^2_{jk} \quad (4)$$

Donde  $T_{jk}$  es la suma de los datos de cada operador.

V. Se calcula la suma de los totales para el factor 2 (Partes) y se divide por su tamaño muestral respectivo por medio de la ecuación 5.

$$T_2^2 = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n T^2_{jk} \quad (5)$$

Donde  $T_{ik}$  es la suma de los datos para cada parte.

VI. Se calculan las sumas de los cuadrados necesarias por medio de las ecuaciones (6), (7), (8), (9) y (10).

$$SSA = T_1^2 - \frac{T^2}{N} \quad (6)$$

$$SSB = T_2^2 - \frac{T^2}{N} \quad (7)$$

$$SSAB = T_c^2 - \frac{T^2}{N} - T_1^2 - T_2^2 \quad (8)$$

$$SSE = T_x^2 - T_c^2 \quad (9)$$

$$SST = T_x^2 - \frac{T^2}{N} \quad (10)$$

Después de obtener la Tabla del Anova, se procede a calcular la variación del sistema de medida, siguiendo los pasos mostrados a continuación:

I. La repetibilidad del sistema de medida está dada por la ecuación 11.

$$r = 5,15\sqrt{MSE} \quad (11)$$

II. El porcentaje de repetibilidad se calcula por medio de la ecuación 12.

$$\%r = \frac{r}{T} \times 100\% \quad (12)$$

Donde  $T$  es la tolerancia de la característica medida.

III. La reproducibilidad del sistema de medida está dada por la ecuación 13.

$$R = 5,15 \sqrt{\frac{MSA - MSAB}{bn}} \quad (13)$$

Nota: Si en algún caso el término de la raíz es un número negativo, entonces la reproducibilidad es cero.

IV. El porcentaje de reproducibilidad se calcula por medio de la ecuación 14.

$$\%R = \frac{R}{T} \times 100\% \quad (14)$$

Donde  $T$  es la tolerancia de la característica medida.

V. La interacción entre los operadores y las partes se calcula por medio de la ecuación 15 .

$$I = 5,51 \sqrt{\frac{MSAB - MSE}{n}} \quad (15)$$

Nota: Si en algún caso el término de la raíz es un número negativo, la interacción entre operadores y partes es cero.

VI. El porcentaje de la interacción entre los operadores y las partes se calcula por medio de la ecuación (16).

$$\%I = \frac{I}{T} \times 100\% \quad (16)$$

Donde  $T$  es la tolerancia de la característica medida.

VII. La relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad está dada por la ecuación 17.

$$r\&R = \sqrt{(r)^2 + (R)^2 + I^2} \quad (17)$$

VIII. El porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad está dada por la ecuación 18.

$$\% r \& R = \sqrt{(\%r)^2 + (\%R)^2 + (\%I)^2} \quad (18)$$

IX. Se interpretan los resultados aplicando los siguientes criterios:

Si  $\% r \& R < 10\%$  el sistema de medición es aceptable.

Si  $10\% < \% r \& R < 30\%$  el sistema de medición puede ser aceptable según su uso, aplicación, costo del instrumento de medición, costo de reparación.

Si  $\% r \& R > 30\%$  el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc.

Cuando la reproducibilidad es mucho mayor a la repetibilidad, esto indica que es necesario entrenar al operador tanto en el manejo del instrumento como en la toma de los datos.

Cuando la repetibilidad es mucho mayor a la reproducibilidad esto significa que el instrumento requiere de mantenimiento o que no es el adecuado para realizar dicha medición. (Arbeláez, Sañazar, & Vargas, 2007)

#### 2.2.5. Concepto de Base de Pavimento

**PAVIMENTO:** según (M.T.C., 2018, pág. 17) “Estructura construida sobre la subrasante de la vía, para resistir y distribuir los esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para.”

**SUBBASE:** Capa que forma parte de la estructura de un pavimento que se encuentra inmediatamente por debajo de la capa de Base.

El valor cementante en una base es preciso para facilitar una respaldo apropiado a las carpetas asfálticas delgadas. En caso contrario, cuando las bases

se construyen con materiales inertes y se de transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales. (M.T.C., 2018, pág. 17)

#### **2.2.6. Compactación in situ.**

Consiste en verificar la densidad y contenido de humedad en campo. Esto para obtener la mayor capacidad soportante posible, la mayor inalterabilidad volumétrica y la mayor resistencia a la deformación. Aun cuando la correlación densidad-resistencia se presenta con frecuencia, es necesario considerar la humedad y la porosidad in situ. De este modo se especifica una densidad en campo mayor o igual al 95% de la densidad máxima medida en el laboratorio, de acuerdo con la norma ASTM D 4429 / AASHTO T 310. (Andrea Ulloa Calderón, 2011, pág. 42)

Relación de humedad y densidad (Próctor Estándar y/o Próctor Modificado)  
Mediante esta prueba se puede determinar la compactación o densidad máxima de un suelo o agregado en relación con su contenido de humedad. Existen dos tipos de ensayo Próctor normalizados: Ensayo Próctor Estándar, de acuerdo con las normas ASTM D 698 / AASTHO T 99, método C y el Ensayo Próctor Modificado, de acuerdo con las normas ASTM D 1557 / AASTHO T 180, método D. La diferencia entre ambos ensayos radica en la distinta energía utilizada, debido al mayor peso del pisón y mayor altura de caída en el Próctor Modificado. (Andrea Ulloa Calderón, 2011, pág. 42)

#### **2.2.7. Ensayos de densidad de campo**

La determinación de la densidad aparente seca de los suelos agrícolas normalmente se realiza sin tomar en cuenta el estado de consistencia del suelo, ya que la densidad es variable en función del contenido de humedad del suelo

Los estudios sobre la variabilidad espacial han revelado que incluso en un suelo homogéneo, sus propiedades físicas pueden ser considerablemente cambiantes entre dos puntos vecinos en el mismo campo sin una causa aparente. Esta variabilidad puede ser alta en los campos grandes, por lo que para llevar a cabo experimentos en este tipo de áreas con cada punto de muestreo muy lejos del siguiente no es aconsejable. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 2)

La condición física del suelo es fundamental para definir su calidad/salud y es afectada por el uso. Por ello, es necesario el seguimiento de los cambios en la condición física de los suelos bajo producción, a través de indicadores sensibles y fáciles de determinar. Uno de ellos es la densidad aparente (DA),

Métodos más utilizados. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 2)

Para realizar la lectura y comprobación de densidad en el campo, se utilizan varios métodos, pero son tres los más utilizados principalmente por su grado de exactitud:

Método del Cono de Arena (ASTM D 1556).

Método del Globo de Hule (ASTM D 2167).

Método del Densímetro Nuclear (ASTM D 2922 Y D 3017).

El Método del Cono de Arena es el más conocido y utilizado por su practicidad, rapidez, y confiabilidad. Aunque no es el método más exacto de todos, sus resultados son bastante confiables si la ejecución es bien realizada por laboratoristas experimentados. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 3)

La densidad natural del suelo se determina dividiendo la masa dentro del volumen que la contiene, para el cálculo del volumen que ocupa el material en el terreno se utiliza este método.

El aparato que se utiliza es un recipiente de forma cilíndrica cuya parte inferior termina en un embudo donde se encuentra una válvula que permite controlar el paso de la arena de calibración que contiene el recipiente. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 3)

Por medio de este aparato y la extracción del suelo con un perímetro circular fijo, se determinan los pesos y volúmenes necesarios para el cálculo correspondiente de la densidad. Es importante que el laboratorista que ejecute este ensayo sea lo más preciso posible para evitar datos erróneos. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 3)

El principio general es obtener el peso del suelo húmedo ( $P_{hum}$ ), obtenido de una pequeña perforación hecha sobre la superficie del suelo y el espesor de la capa compactada. Así, se obtiene el volumen de dicho agujero, por lo que la densidad húmeda del suelo estará determinada como sigue:

$$PUH = \frac{Phum}{Vol. Extraido}$$

Para la determinación de la densidad seca basta con encontrar el contenido de humedad del material extraído ( $w$ ) y se determina como sigue:

$$PUS = \frac{PUH}{1 + w}$$

**El método del Globo de Hule**, es un método que ofrece bastante rapidez y practicidad. Para lograr resultados lo más exactos posibles se requieren de mucho

cuidado y precisión en la ejecución del ensayo principalmente en la extracción del suelo.

El objetivo de este ensayo es determinar la densidad del suelo por medio de la extracción del material, dejando un agujero cilíndrico para posteriormente llenarlo con el globo de látex lleno de agua y medir el volumen. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 4)

**El Método del Densímetro Nuclear**, según la investigación (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 4) es un método con un alto grado de complejidad de operación ya que se trabaja con elementos radiactivos los cuales si no son manejados de una forma adecuada pueden causar grandes daños a la salud del laboratorista.

La gran ventaja de este método es la precisión de la lectura que toma. De todos los métodos desarrollados este es el que arroja el dato más exacto de la densidad. El método está basado en la interacción de los rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva y los electrones de las órbitas exteriores de los átomos del suelo, la cual es captada por un detector gamma situado a corta distancia de la fuente emisora sobre, dentro o adyacente al material a medir. La lectura de la intensidad de la radiación es convertida a medida de densidad húmeda por medio de una curva de calibración apropiada del equipo. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 5)

Para este método existen tres formas básicas de realizarlo las cuales son:

Retro dispersión

Transmisión directa Colchón de aire

Otros métodos

Existen otros métodos no muy utilizados para la determinación de la densidad en el campo que se ajustan mejor a ciertas condiciones del suelo. En algunos casos por ejemplo debido al tamaño de agregado máximo se deben utilizar estos métodos, dentro de los cuales se mencionan los siguientes. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 5):

Método del Densímetro de Membrana.

Método del Cono Gigante.

Método mediante bloques.

#### **Método del Densímetro de Membrana.**

Este método es aplicable a suelos donde la mayor cantidad de agregado es grava media y gruesa. Se coloca un anillo metálico de diámetro aproximado de dos metros y se procede a excavar el material que encierra el perímetro del anillo con una profundidad de 30 cm. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 6)

#### **Método del Cono Gigante**

El Método del Cono Gigante es aplicable principalmente a suelos donde predominan las partículas de agregado mayores a 50 mm. O también en suelos como gravas uniformes, en donde la utilización de la arena no resulta conveniente puesto que esta ocuparía los vacíos que originalmente poseen las gravas. Como reemplazo de la arena Ottawa utilizada en el cono de arena, se utiliza comúnmente gravilla o bolitas de vidrio. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 6)

#### **Método mediante bloques**

El Método mediante bloques se utiliza para determinar la densidad de suelos cohesivos en estado natural, que no se deforman ni se desmoronan por ejemplo

no es aplicable a suelos muy arenosos donde no hay cohesión. El peso y el volumen se determinan de muestras en estado inalterado, estas muestras son extraídas cuidadosamente mediante una espátula dándole forma de bloque a la muestra, donde se podrá obtener el peso y el volumen del bloque. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 6)

#### **2.2.8. Determinación de la Densidad de Campo por el Método del Cono de Arena**

ASTM D 1556: Standard Test Method of Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand Cone Method

##### Consideraciones generales del método

Este ensayo se utiliza para determinar la densidad y el peso unitario en campo de los suelos usando un aparato de cono de arena. El método es aplicable para suelos sin una cantidad de rocas o agregado grueso de por lo menos 1½ pulgadas de diámetro. El suelo o el material de ensayo deben contener suficiente cohesión o atracción de partículas para mantener estable las paredes en un agujero pequeño con el fin de ser lo suficientemente firme para soportar presiones menores aplicadas por el proceso de excavación y también soportar la colocación del aparato del cono de arena sin deformarse o ladearse en lo más mínimo. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 7)

El método del cono de arena no es ejecutable para suelos orgánicos saturados o con un índice plástico elevado que producirá deformación o compresión durante la excavación del agujero del ensayo.

Cuando los materiales a ser ensayados contienen cantidades apreciables de partículas mayores de 1½ pulgadas (38 mm), o cuando el volumen del agujero es mayor de 0.1 pie<sup>3</sup>, las normas aplicables entonces son ASTM D4914-08: Standard

Test Methods for Density and Unit Weight of Soil and Rock in Place by the Sand Replacement Method in a Test Pit y ASTM D 5030-04: Standard Test Method for Density of Soil and Rock in Place by the Water Replacement Method in a Test Pit. Estos métodos cubren la determinación de la densidad en campo del suelo y rocas usando arena y agua correspondientemente para llenar un pozo revestido y determinar el volumen del pozo en prueba tomando en cuenta rocas mayores de 3 pulgadas.

El método por su modo de ejecución es considerado como un ensayo destructivo ya que en el procedimiento es necesario realizar una excavación para determinar el peso específico seco del campo. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 8)

#### **Descripción del ensayo.**

Se realiza un agujero excavado a mano en el suelo que será ensayado y todo el material extraído es guardado en un recipiente, luego de esto, el agujero es llenado con una arena fina que fluya fácilmente con una densidad conocida, la arena utilizada comúnmente se denomina: arena *Ottawa*. Y posteriormente el volumen es determinado, la densidad húmeda de campo del suelo es determinada por la división de la masa húmeda del material extraído entre el volumen del agujero. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 8)

El contenido de agua del material removido es determinado y la masa seca del material y la densidad de campo seca es calculada usando la masa húmeda del suelo, el contenido de agua y el volumen del agujero.

## **Significado y aplicaciones**

El método del cono de arena es comúnmente utilizado como un parámetro aceptable de densidad específica o como un porcentaje de máxima densidad, en suelos compactados. El método también puede ser utilizado para determinar la densidad en campo natural de depósitos de suelo, agregados, mezclas de suelos u otro material similar. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 9)

El uso de este método comúnmente se limita a suelos en una condición no saturada. No es recomendado para suelos que son débiles o de fácil deformación o con una condición de humedad de tal manera que el agua escurra en el agujero excavado. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 9)

La precisión del ensayo puede ser afectada por suelos que se deformen fácilmente o que se puedan producir cambios en el volumen del agujero excavado debido a vibraciones producidas por diversas situaciones como el caminar cerca del sitio de ensayo o maquinaria de construcción que pase cerca del sitio, es por ello que es recomendable parar cualquier actividad de construcción que produzca vibraciones en el suelo ya que pueden afectar grandemente los resultados. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 9)

## **Equipo**

El aparato de cono de arena consiste en un frasco de vidrio o plástico con una capacidad de volumen que al menos exceda la cantidad requerida para llenar el agujero a excavar, aproximadamente de  $3,785 \text{ cm}^3$  de capacidad. El frasco debe estar unido a un embudo que a su vez se une a una válvula con un orificio de aproximadamente  $\frac{1}{2}$  pulgada. (13mm) de diámetro, adjuntada a la vez a otro embudo metálico que ajusta el diámetro deseado según sea el dato del ensayo

que se desee, por ejemplo, para el análisis de una capa subbase se utiliza un embudo metálico de 4" y para el análisis de una capa base se utiliza de 6 pulgadas de diámetro. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 9)

**Figura 2: Aparato de cono de arena.**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012

### **Consideraciones generales del equipo**

La válvula del aparato debe de ser construida de tal forma que pueda realizar paradas para prevenir que siga rotando al momento de intentar detener el flujo de la arena. El embudo debe consistir de un metal lo suficientemente rígido para evitar deformaciones en el mismo, además las paredes del cono deben de encontrarse a 60° de la base para permitir un llenado de arena uniforme, el embudo final se le conoce comúnmente como “Picnómetro”. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 10)

Todo el aparato del cono de arena se estabiliza por medio de una base o plato metálico con una orilla biselada en el agujero del medio para adaptar el aparato con el plato. El plato debe de ser de preferencia cuadrado y con al menos 3” (75 mm) más largo que el embudo o cono metálico. Debe ser liso en la parte de abajo,

y debe contener el suficiente grosor para ser rígido. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 10)

**Figura 3: Plato base del aparato cono de arena.**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012

La arena a utilizar para el llenado del agujero debe ser limpia, seca, con densidad uniforme, graduada, no cementante, durable y que tenga un amplio rango de fluidez. La gradación debe ser realizada con un coeficiente de uniformidad ( $C_u = D_{60}/D_{10}$ ) menor a 2, con un tamaño máximo de partícula de 2 mm que lo determina el tamiz No. 10; y menos del 3 % del peso que pase el tamiz No. 60. La arena uniformemente graduada es necesaria para prevenir segregación durante el manipuleo, guardado y uso. Arena libre de finos y partículas finas es requerida para prevenir cambios de la densidad debido a la humedad de la atmósfera. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 11)

La arena que contiene partículas naturales redondeadas es deseable para el ensayo, arena con partículas de muchos ejes y ángulos, no permite el flujo libre de la misma lo cual dificulta en gran manera el procedimiento, condición que produce resultados inexactos. Comúnmente se utiliza un tipo de arena de

partículas redondeadas de aproximadamente 2 mm de diámetro, con una buena fluidez, denominada arena Ottawa, la cual pasa por el tamiz No. 20 (0.085 mm) y se retiene en el tamiz No. 30 (0.606 mm), la arena se debe lavar y posteriormente secar en horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ . (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 11)

Se utiliza una balanza para determinar el peso del material extraído, así como de los picnómetros, la balanza debe de ser de 35 lb de capacidad con una sensibilidad de 0.01 lb. El siguiente modelo es un ejemplo de la misma.

Durante el procedimiento del ensayo se hace necesario el uso del tamiz No.  $\frac{3}{4}$  (19 mm), el cual sirve para eliminar partículas muy grandes que pueden estropear el resultado, es aquí donde se debe analizar si realmente aplica este ensayo o es mejor utilizar alternos.

También se utilizan una serie de accesorios que sirven para limpiar, excavar, guardar material, etc. Los cuales se mencionan a continuación.

Martillo, cuchara, cincel, brocha.

### **Bandejas metálicas para guardar material del suelo**

Para la determinación del contenido de humedad en el suelo es necesaria la utilización de un aparato llamado “Speedy”. Este aparato consta de una cámara cilíndrica de presión adjunta con un manómetro, balanza, carburo de calcio, medidor del carburo de calcio, esferas de acero de 1 centímetro de diámetro, y su equipo de limpieza. El aparato se rige por las normas ASTM D 4944-04 y AASHTO T-217.

**Figura 4: Speedy 2000 Determinador de humedad.**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012

El Speedy es un aparato utilizado para medir contenido de humedad en campo, ya que llevar muestras del suelo a un laboratorio para este ensayo no es práctico, por el contrario es difícil. Para este ensayo se necesita que todas las partículas que se ensayan pasen por el tamiz No. 4 (4,75 milímetros).

El problema con este ensayo es que se pueden producir inexactitudes debido a que la muestra que se utiliza en el aparato es muy pequeña para representar la humedad en toda el área. Por lo tanto otros métodos son recomendados cuando se requieren datos muy exactos. (Guzman Abril A. A., 2013)

### **Calibración**

La calibración del equipo es un paso fundamental en el desarrollo de cualquier ensayo, cumple con el proceso de brindar un aparato el cual arroje datos

exactos a la capacidad del mismo, es por ello que se brindan los aspectos principales para la calibración del equipo de este ensayo, (Guzman Abril A. A., 2013)

### **Calibración del aparato de cono de arena**

La masa de arena contenida en el aparato del cono de arena y el plato base son dependientes de las acumulaciones de densidad de la arena. Por lo tanto, este procedimiento de calibración se debe realizar para cada aparato cuando se encuentren cambios en las acumulaciones de densidad de la arena. La calibración del aparato puede ser realizada por medio de 2 métodos principales:

Mediante la determinación de la masa de arena calibrada que puede ser contenida en ambos, el embudo y el plato base.

Mediante la determinación del volumen de la arena necesaria para llenar cada embudo y plato base; y aplicando este volumen constante siempre cuando nuevas acumulaciones en la densidad de la arena son calculadas. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 14)

#### **Método A:**

Se llena el aparato con arena que fue secada previamente y condicionada al mismo estado anticipado durante el uso en el ensayo. Posteriormente se determina la masa del aparato cuando está lleno de arena.

Se coloca el plato base en una superficie limpia, nivelada y plana. Después se invierte el aparato y se asienta el embudo en el centro de la hendidura del agujero en el centro del plato base. Se marca e identifica el aparato y el plato base en su posición para que de esa manera el mismo aparato y plato base encajen y puedan ser colocados en la misma posición durante el ensayo.

Se abre la válvula completamente hasta que el flujo de arena se detenga, asegurándose que el aparato, plato base o superficie plana no vibren antes que la válvula sea cerrada.

Se cierra la válvula de una manera cortante, se remueve el aparato y se determina la masa del aparato y el restante de arena. Se calcula la masa de arena usada para llenar el embudo y plato base como la diferencia entre la masa inicial y final.

Se repite el mismo procedimiento al menos 3 veces. La máxima variación entre cualquier determinación y el promedio no debe exceder en 1 %. Se usa el promedio de las 3 determinaciones para este valor en los cálculos del ensayo. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 15)

#### **Método B:**

Se determina la masa de arena requerida para llenar el embudo del aparato y el plato base y se repiten todos los pasos del método A.

Se calcula el volumen del embudo y el plato base dividiendo la acumulación de densidad de la arena entre la masa determinada en el paso 5 del método A. Se realizan un mínimo de 3 determinaciones y se calcula un valor promedio. La máxima variación de volumen entre cualquier determinación y el promedio no debe exceder de 1 %. Se usa este promedio de valores para realizar cálculos del ensayo. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 16)

#### **Procedimiento**

Se selecciona localidad y elevación que sea representativa del área a ensayar. Aproximadamente un área cuadrada de unos 50 cm de lado.

Se inspecciona el aparato del cono de arena de daños, rotaciones flojas de la válvula, y que se ajuste perfectamente con el plato base. Posteriormente se llena el frasco contenedor con arena Ottawa.

Se prepara la superficie de la localidad a ser ensayada de tal manera que quede nivelada y limpia. El plato base debe ser usado como una herramienta para aplanar la superficie y dejarlo en un nivel de plano liso.

Se asienta el plato base en la superficie plana, asegurándose de que existe contacto con la superficie del suelo alrededor de la orilla del agujero del plato base. Posteriormente se marca la orilla del agujero del plato en el suelo para chequear el movimiento durante el ensayo, y si es necesario, asegurar el plato contra el movimiento por medio de clavos colocados en el suelo adyacente al plato por el perímetro, sin afectar el suelo a ser ensayado. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 16)

En suelos donde la nivelación no es suficiente, es decir, no puede hacerse lo suficientemente plano, o donde espacios en el suelo permanecen, el volumen horizontalmente conectado con el embudo, plato y superficie del suelo debe ser determinado preliminar al ensayo. Se llena el espacio con arena del aparato, se determina la masa de arena usada para llenar el espacio, se vuelve a llenar el aparato y se determina una nueva masa inicial del aparato y la arena antes de proceder con el ensayo. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 16)

El volumen del agujero del ensayo dependerá en el tamaño máximo de partícula en el suelo a ser ensayado. Los volúmenes del agujero del ensayo no deben ser menores a los presentados en la siguiente tabla basada en el tamaño máximo de partícula. Los tamaños máximos de partícula se expresan en las

siguientes unidades pulgadas y milímetros, en tanto el valor del mínimo volumen de los agujeros se expresan en las siguientes unidades cm<sup>3</sup> y pie<sup>3</sup>. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 17)

**Tabla 2: Volúmenes de agujeros de ensayos mínimos basados en el tamaño máximo de partícula.**

Tamaño máximo de partícula		Volumen mínimo del agujero del ensayo		Cantidad de muestra para contenido de humedad
Pulg.	Mm	cm <sup>3</sup>	pie <sup>3</sup>	g
½	12,7	1415	0,05	250
1	25,4	2125	0,075	500
1 ½	38	2830	0,1	750

Fuente y elaboración: propia.

Se pesa el aparato de cono de arena por primera vez, sin dejar escapar nada de arena por la válvula, peso que se denomina “Picnómetro 1”.

Se debe limpiar el plato base del agujero, e invertir el aparato de cono de arena sobre el plato de modo que se ajuste la boca del embudo con la circunferencia del agujero del plato.

Es necesario tener cuidado con las vibraciones que se pueden producir debido al paso de personas alrededor o movimiento de equipo.

Se abre la válvula y se deja fluir la arena hasta llenar el embudo y la orilla del plato base, teniendo cuidado evitar vibraciones cuando la arena está fluyendo y se cierra la válvula hasta asegurarse que la arena dejen de correr.

Luego se determina el peso del aparato con la arena restante por medio de la balanza lo que se denomina “Picnómetro 2”. Se remueve la arena depositada y se guarda en una bandeja.

Se excava el agujero del ensayo a través del agujero del plato base, teniendo cuidado de evitar deformaciones en el suelo que puedan destruir el agujero. Los costados del agujero deben inclinarse levemente para adentro y el fondo debe ser relativamente plano o cóncavo. El agujero debe dejarse libre tanto como sea posible de imperfecciones y obstáculos. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 18)

Los suelos que carecen de cohesión tanto como arenas, o suelos muy granulares, requieren de mucho cuidado al momento de la excavación por lo tanto se requiere que se excave en forma cónica.

El suelo extraído del agujero se pasa por el tamiz No.  $\frac{3}{4}$  (19mm), y posteriormente se pesa tomando así el peso húmedo. El contenido que no pasa por este tamiz es regresado.

Se realiza el mismo procedimiento que en el paso 9, solo que esta vez se deja fluir la arena hasta llenar el agujero, el plato base y el embudo del aparato, y se cierra la válvula tomando así una nueva lectura de la masa del aparato con arena restante lo que se denomina “Picnómetro 3”. Se retira la arena tratando de recuperar lo máximo posible y se limpia la superficie con una brocha.

Para la determinación del contenido de humedad, se toma una muestra de 5 gramos del suelo húmedo que se extrajo y paso por el tamiz No.  $\frac{3}{4}$  y se introduce dentro del aparato “Speedy” junto con 5 gramos de carburo de calcio y se agita por varios minutos hasta que el manómetro para de incrementar el porcentaje de contenido de humedad, y el máximo será el dato a utilizar para determinar humedad con datos de tabla que proporciona cada equipo individual. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 18)

### Cálculos generales

Según la investigación realizado por (Guzman Abril A. A., 2013) Para determinar la densidad en campo por medio del método del cono de arena se realizan los siguientes cálculos, tomando en cuenta los criterios planteados en el procedimiento:

Determinación del peso de la arena en el embudo:

$$Pae = \text{Picnómetro 1} - \text{Picnómetro 2}$$

Determinación del peso de arena para llenar el embudo y el agujero:

$$Pae + ag = \text{Picnómetro 2} - \text{Picnómetro 3}$$

Determinación del peso de la arena en el agujero. Se resta el peso de la arena en el embudo más el agujero  $Pae + ag$ , con el peso de la arena en el embudo  $Pae$ :

$$Pa = (Pae + ag) - Pae = (\text{Pic 2} - \text{Pic 3}) - (\text{Pic 1} - \text{Pic 2})$$

Determinación del volumen del agujero. Se divide el peso de la arena en el agujero  $Pa$  dentro del peso específico de la arena calibrada Ottawa

$$\text{Volumen} = \frac{Pa}{\text{Peso Unitario Arena Calibrada Ottawa}}$$

Por último, se determina el porcentaje de compactación, por medio de las siguientes fórmulas:

$$PUH = \frac{\text{Peso Neto Humedo del material extraido}}{\text{Volumen del agujero}}$$

$$PUScampo = \frac{P.U.H.}{100 + \% \text{ de Humedad}} \times 100$$

$$\%C = \frac{P.U.S. campo}{P.U.S. laboratorio} \times 100$$

Es muy importante determinar el porcentaje de compactación del área de trabajo, ya que con el mismo se puede visualizar si la compactación fue la adecuada o no. Al final para la mayoría de laboratoristas, este es el dato de mayor importancia para ir controlando la densidad en campo. (Pag.21)

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Los siguientes términos han sido obtenidos del CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA:

**METROLOGÍA:** Es la ciencia que tiene por objeto el estudio de los sistemas de medición.

**CALIBRACIÓN:** “Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación que existe entre los valores indicados por un instrumento y los correspondientes valores conocidos de una magnitud física medida.” (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 59)

**MEDIR:** Es comparar una magnitud hecha según su relación con otra magnitud de la misma especie adoptada como una unidad de referencia.

**PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN:** Conjunto de Actividades bajo una secuencia lógica y detallada que permiten al operador efectuar una medición sin información adicional.

**PATRÓN:** “Materialización física de una magnitud (considerada invariable) destinada a realizar o reproducir la correspondiente unidad de medida para transmitirla por comparación a otros medios de medida.” (javier de la Torre Zermeño, 2003, pág. 208)

**TRAZABILIDAD:** Propiedad del resultado de una medición o de un valor de un patrón, en virtud de la cual ese resultado se puede relacionar con referencias estipuladas, generalmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones que tengan todas incertidumbres determinadas.

**EXACTITUD:** Grado de concordancia entre el resultado de una medida y el valor verdadero.

**ERROR:** Resultado de una medición menos un valor verdadero de la magnitud por medir.

**INCERTIDUMBRE:** Estimación numérica de los límites máximos probables de desviación que existen entre el resultado de una medición y el valor que se admite como verdadero.

**AJUSTE DE UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:** Operación destinada a llevar un instrumento de medición a un estado de funcionamiento conveniente para su utilización.

**ERROR MÁXIMO PERMITIDO:** Valor extremo del error de medición, con respecto a un valor de referencia conocido, permitido por especificaciones o reglamentaciones, para un sistema o instrumento de medición.

**CORRECCIÓN:** Valor agregado algebraicamente al resultado no corregido de una medición para compensar un error sistemático.

**PRECISIÓN:** Grado de concordancia entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

## **MATERIAL DE BASE**

Todo material granular que cumple además con las características físico-mecánicas y químicas que se indican en la norma NTE CE.010 PAVIMENTOS URBANOS, tablas 7 en adelante.

## **DENSIDAD DE CAMPO**

Es aquella que se obtienen haciendo un hueco en el terreno, de forma cilíndrica; se pesa el suelo extraído en estado húmedo y seco, y el volumen, que es el del hueco, se mide llenándolo de arena curzosa (de Ottawa o Guamo, Tolima), que debe lavarse y gradarse periódicamente. En su defecto, con aceite grueso o con una vejiga de agua, siendo este último un método poco exacto. (Guzman Abril A. A., 2013, pág. 7)

## **DENSIDAD NATURAL DE UN SUELO**

La densidad natural de un suelo corresponde al cociente entre su masa y el volumen total que la contiene.

## **ANÁLISIS ANOVA.**

Es una de las técnicas estadísticas más utilizadas para comparar grupos de medidas y normalmente se emplea para establecer semejanzas y diferencias entre tres o más grupos distintos. A través de ANOVA se establece un análisis para evaluar comparativamente unos resultados en distintas clasificaciones o grupos. De esta manera, es posible calcular si los valores medios son iguales en los distintos grupos estudiados. (Arbeláez, Sañazar, & Vargas, 2007)

## **2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

Las hipótesis de la presente investigación son:

### **2.4.1. Hipótesis general**

La precisión en la determinación de la densidad in-situ es significativo en un pavimento urbano.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

1. Existen factores que inciden en la determinación de precisión de la densidad natural in - situ de un material de base para pavimento.
2. La medición de la densidad de campo usando el método tradicional satisface según la precisión requerida.

## **2.5. VARIABLES**

### **2.5.1. Variables de Estudio**

Determinación de densidad

### **2.5.2. Variables Intervinientes**

Densidad en material de pavimento urbano.

Precisión.

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN**

La presente es una investigación de tipo descriptiva, longitudinal

Descriptiva: es un estudio descriptivo se selecciona una serie de cuestiones y se mide o se recolecta información sobre cada una de ellas , para así describir lo que se investiga.

Longitudinal: compara los datos obtenidos en diferentes oportunidades o momentos de una misma población con el propósito de evaluar los cambios

### **3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.2.1. Población**

La población tomada para la presente investigación son las muestras de bases de pavimento urbano en 3 especímenes, construidas en la ciudad del Cusco durante el ámbito temporal de la tesis.

#### **3.2.2. Muestra**

Se plantea 3 muestra de base de pavimento de material para 36 ensayos del mismo.

### **3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.3.1. Técnicas de recolección de información**

En la primera fase de la tesis, la principal técnica de recolección de datos fue la recopilación documental, tanto de las bases teóricas para la tesis como de los antecedentes de investigaciones similares.

Luego en la fase de ejecución de ensayos de campo y laboratorio, las principales técnicas de recolección han sido los protocolos de medición.

### **3.3.2. Técnicas de análisis e interpretación de la información**

En la presente tesis, entre otras, se han utilizado las técnicas de:

Análisis documental

Codificación temática

Análisis estadístico

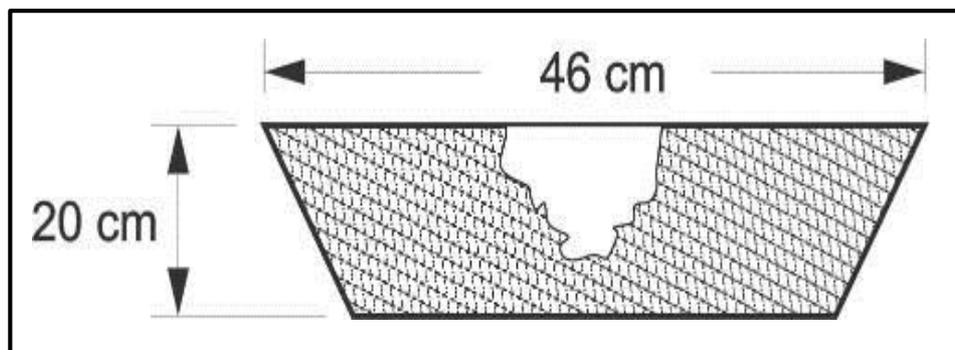
## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. EJECUCIÓN DEL ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y DE REPRODUCIBILIDAD

Con la finalidad de determinar la precisión que alcanza el método del cono de arena para la determinación de la densidad in-situ de un material, se procedió a construir tres bases de pavimento con material seleccionado de la cantera de Huambutio.

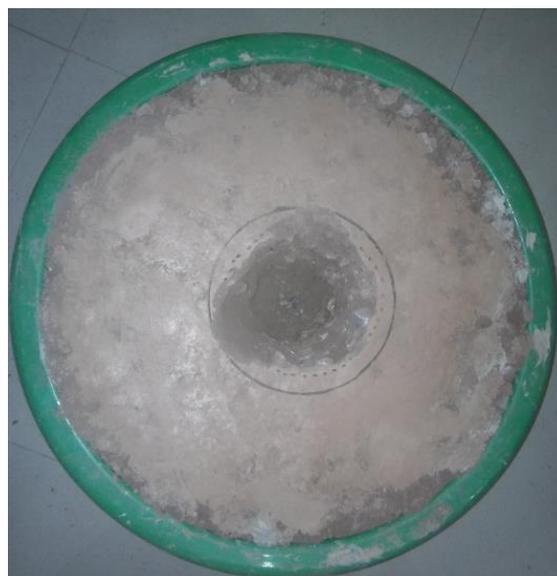
Las bases de prueba se aprecian en el siguiente croquis.

**Figura 5: Bases para la ejecución de las pruebas.**



Fuente: propia.

**Figura 6: Foto de los especímenes**



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2. CALIBRACIÓN DE LA ARENA

Con la finalidad de determinar la densidad de la arena, esta fue sometida al proceso de calibración, haciendo uso de un molde de Proctor, dado su volumen conocido. Los cálculos se detallan a continuación:

Peso del molde vacío: 5920 g

Peso del molde más arena: 8820 g

Volumen del molde (Proctor Modificado de 6''): 0.00214927

Densidad de la arena:  $(8820-5920)/0.00214927 = 1349 \text{ Kg/m}^3$ .

#### 4.3. CALIBRACIÓN DEL CONO

Con la finalidad de determinar la cantidad de arena que llena el cono del instrumento elegido, se procedió a su calibración, así:

Peso del cono + arena (antes) = 8206 g.

Peso del cono + arena (después) = 6914 g.

Peso de la arena que llena el cono:  $8206 \text{ g} - 6914 \text{ g} = 1292 \text{ g}$

#### 4.4. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Para la ejecución de los ensayos, se tuvo la participación de tres operarios, uno con mucha experiencia en ensayos de compactación de vías terrestres, la otra con mediana experiencia y uno tercero sin ninguna experiencia en el tema.

A continuación, se pidió que los tres operarios, en distintos días y por sorteo para que pudieran medir el volumen de los agujeros en las bases de prueba construidos para tal efecto. Los resultados para cada operario se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla 3: Resultados del operario 01.**

N° DE AGUJERO	PESO ANTES	PESO DESPUES	PESO CONO	PESO ARENA EN AGUJERO	OBSERVACION
1	8336	6062	1292	982	
3	6062	3046	1292	1724	
2	8194	5896	1292	1006	DESCARTE
2	5896	3620	1292	984	
1	7948	5668	1292	988	
2	5668	3402	1292	974	
3	8200	5180	1292	1728	
1	8182	5902	1292	988	
2	8176	5888	1292	996	
3	8138	5114	1292	1732	
2	8094	5812	1292	990	
3	8086	5062	1292	1732	
1	8068	5788	1292	988	

Fuente y elaboración: propia

Así también para el segundo operario:

**Tabla 4: Resultados del operario 02.**

N° DE AGUJERO	PESO ANTES	PESO DESPUES	PESO CONO	PESO ARENA EN AGUJERO	OBSERVACION
1	8066	5798	1292	976	
3	8064	5052	1292	1720	
1	8024	5752	1292	980	
2	8026	5746	1292	988	
3	8024	5010	1292	1722	
1	7994	5724	1292	978	
2	7992	5704	1292	996	
3	7990	4982	1292	1716	
2	7974	5692	1292	990	
3	7986	4950	1292	1744	
1	7936	5666	1292	978	
2	7936	5654	1292	990	

Fuente y elaboración: propia

Y, finalmente, para el tercer operario:

**Tabla 5: Resultados del operario 02.**

N° DE AGUJERO	PESO ANTES	PESO DESPUÉS	PESO CONO	PESO ARENA EN AGUJERO	OBSERVACION
1	7930	5656	1292	982	
3	7846	4836	1292	1718	
3	7758	4740	1292	1726	
2	7602	5316	1292	994	
1	7578	5296	1292	990	
3	7554	4536	1292	1726	
2	7460	5178	1292	990	
1	7436	5168	1292	976	
1	7414	5142	1292	980	
2	7380	5102	1292	986	
2	7352	5068	1292	992	
3	7326	4314	1292	1720	

Fuente: Elaboración: Propia

#### 4.5. EJECUCIÓN DEL ESTUDIO R&R.

Para la determinación de la repetitividad y reproducibilidad de los resultados que mide el cono de arena, con los resultados obtenidos por los tres operarios, en tres distintos agujeros y en cuatro repeticiones se obtuvieron los resultados detallados en la siguiente tabla:

**Tabla 6: Resumen de resultados del estudio R&R.**

Operador	Parte	Repetición	Medida en gramos de arena que llena el agujero
VIC	1	1	982
VIC	3	1	1724
VIC	2	1	984
VIC	1	2	988
VIC	2	2	974
VIC	3	2	1728
VIC	1	3	988
VIC	2	3	996
VIC	3	3	1732
VIC	2	4	990
VIC	3	4	1732
VIC	1	4	988
JUA	1	1	976
JUA	3	1	1720
JUA	1	2	980
JUA	2	1	988
JUA	3	2	1722
JUA	1	3	978
JUA	2	2	996
JUA	3	3	1716
JUA	2	3	990
JUA	3	4	1744
JUA	1	4	978
JUA	2	4	990
RUT	1	1	982
RUT	3	1	1718
RUT	3	2	1726
RUT	2	1	994
RUT	1	2	990
RUT	3	3	1726
RUT	2	2	990
RUT	1	3	976
RUT	1	4	980
RUT	2	3	986
RUT	2	4	992
RUT	3	4	1720

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO R&R.

A continuación se detallan los resultados del estudio de repetitividad y reproducibilidad utilizando la técnica de ANOVA cruzado, que es el tipo adecuado cuando se utilizan más de un operador.

#### 4.6.1. Componentes de la varianza

Los componentes de la varianza evalúan la cantidad de variación aportada por cada fuente del error de medición, más la contribución de la variabilidad entre las partes. La suma de los componentes individuales de la varianza es igual a la variación total.

#### 4.6.2. Variación del estudio

En un estudio R&R del sistema de medición, la variación del estudio (Var. del estudio) es la cantidad de variación causada por el sistema de medición y por las diferencias entre las partes. Se calcula como seis veces las desviaciones estándar de cada fuente de variación.

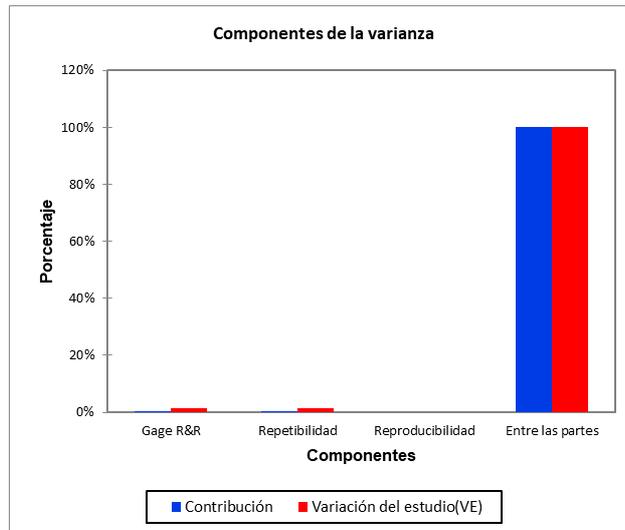
A continuación, se especifican ambas variaciones:

**Tabla 7: Componentes de la varianza del estudio R&R.**

Fuente	Gage R&R	Repetibilidad	Reproducibilidad ad	Entre las partes
Contribución	0.02%	0.02%	0.00%	99.98%
Variación del estudio(VE)	1.51%	1.51%	0.00%	99.99%

Fuente: Elaboración Propia

Conforme se observa, la variación del estudio (VE) alcanza un valor de 1.51%, cifra que es atribuible en su totalidad al componente de Repetibilidad. Esto se puede apreciar en forma gráfica a continuación:

**Figura 7: Componentes de la varianza del estudio R&R.**

Fuente: propia.

**4.6.3. Fuentes de la Varianza**

Los valores de la varianza en términos de medición se pueden apreciar en la siguiente tabla.

**Tabla 8: Componentes de la varianza del estudio R&R.**

Fuente	Componentes de la varianza	Contribución
Gage R&R	41.72	0.02%
Repetibilidad	41.72	0.02%
Reproducibilidad	0.00	0.00%
Operadores	0.00	0.00%
Operadores * Partes	0.00	0.00%
Entre las partes	182542.11	99.98%
Total	182583.83	100.00%

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.4. Desviación Típica.

Desv.Est. (DE) es la desviación estándar para cada fuente de variación. La desviación estándar es igual a la raíz cuadrada del componente de la varianza para esa fuente. La desviación estándar es una medida conveniente de la variación, porque tiene las mismas unidades que las mediciones de las partes y la tolerancia. Los valores de la desviación típica se pueden apreciar en la siguiente tabla.

**Tabla 9: Desviación típica del estudio R&R.**

Fuente	Desviación típica	Variación del estudio(VE)	Variación del estudio(VE) %
Gage R&R	6.459	38.755	1.51%
Repetibilidad	6.459	38.755	1.51%
Reproducibilidad	0.000	0.000	0.00%
Operadores	0.000	0.000	0.00%
Operadores * Partes	0.000	0.000	0.00%
Entre las partes	427.249	2563.497	99.99%
Total	427.298	2563.790	100.00%

Fuente y elaboración: propias.

#### 4.6.5. Indicadores de estado

En los diseños de Taguchi, una medida de robustez utilizada para identificar los factores de control que reducen la variabilidad de un producto o proceso al minimizar los efectos de los factores que no se pueden controlar (factores de ruido). Los factores de control son aquellos parámetros de diseño y proceso que pueden ser controlados. Los factores de ruido no se pueden controlar durante la producción o el uso de un producto, pero sí se pueden controlar durante la experimentación. En un experimento diseñado de Taguchi, los factores de ruido se manipulan para

hacer que haya variabilidad y, con base en los resultados, identificar la configuración óptima de los factores de control que haga que el proceso o producto sea robusto o resistente ante la variación provocada por los factores de ruido. Valores más altos en la relación de señal a ruido (S/N) identifican configuraciones de factores de control que minimizan los efectos de los factores de ruido.

**Tabla 10: Indicadores de estado del estudio R&R.**

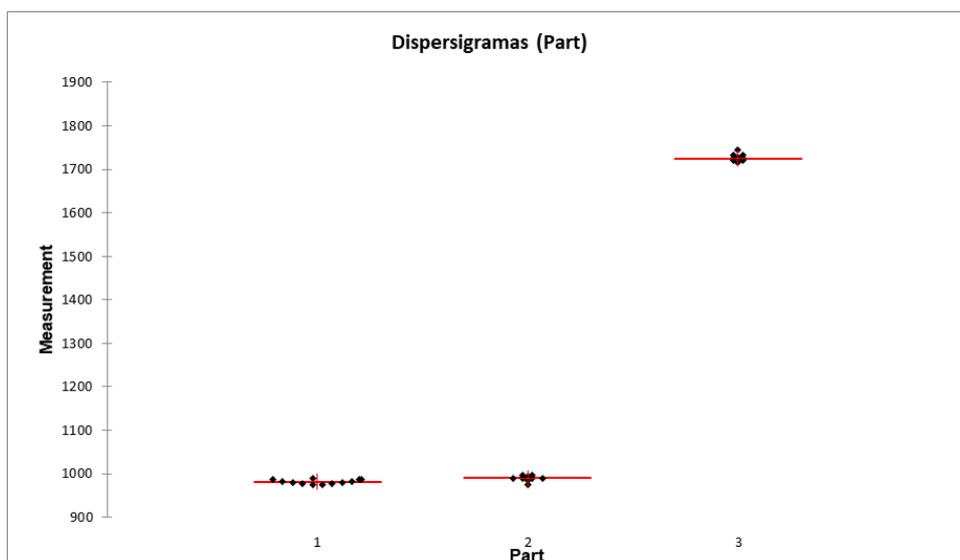
	Valor	Estado
Razón señal/ruido (SNR)	93.545	adecuado (>+5)
Razón de discriminación (DR)	8751.730	

Fuente y elaboración: propias.

#### 4.6.6. Estadísticas de las Mediciones por Operario y por Partes

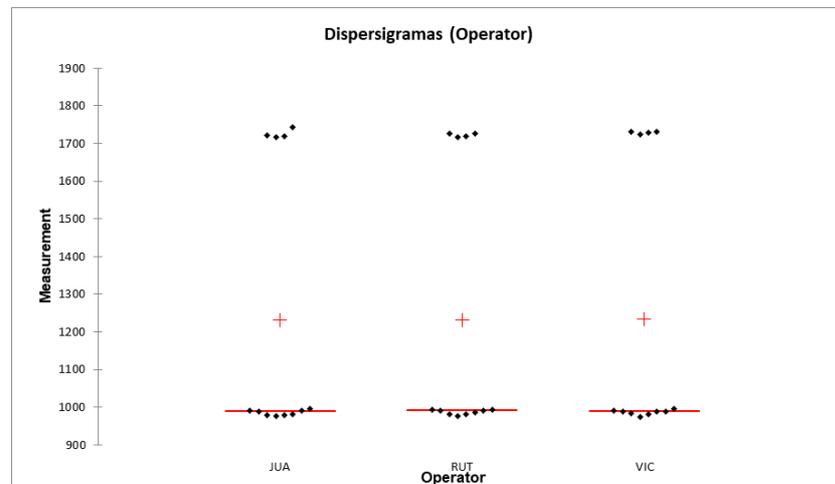
Con la finalidad de apreciar la variabilidad de las mediciones realizadas con el cono de arena por distintos operarios, se han trazado los dispersigramas que se muestran a continuación.

**Figura 8: Dispersigrama de la medición de las partes.**



Fuente: propia.

**Figura 9: Dispersigrama de la medición de los operadores.**



Fuente: propia.

#### 4.7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En principio, la norma actual del Ministerio de Transportes y Comunicaciones menciona que sería muy costoso producir especímenes de propiedades físicas uniformes, sin embargo, la presente tesis ha logrado producir especímenes de ensayo que mantienen la propiedad geométrica de su volumen constante, esto gracias a varias capas de pintura automotriz rociadas sobre el agujero del suelo de prueba. De manera que cuando la norma afirma que “cualquier variación que se observe en los datos es sólo una probabilidad que se debe a la variación del espécimen o al operador, o una variación de la prueba de laboratorio” es una afirmación que no parece tener sustento a la luz de los experimentos llevados a cabo por la presente investigación, pues nótese que la variación de la precisión atribuible a los operarios (Reproducibilidad) es prácticamente nula en la presente investigación. Lo que sí parece ser acertado es que la norma mencione una variabilidad atribuible a la prueba de laboratorio (Repetibilidad) en sí, puesto que esta, aún cuando tiene un valor bajo (1.51%) si denota que el método introduce un error en la medición.

Respecto del estudio de Redus, en el cual reporta una precisión de 1% para el cono de arena, cuando éste mide el volumen del agujero y de 2.5% cuando éste mide la densidad, se ha encontrado durante el presente estudio que aquella precisión en realidad es de 1.51%. Hay que mencionar que el cono de arena mide el volumen del agujero, más no la densidad en sí, puesto que para ello requiere de la utilización de una balanza, equipo que al final de cuentas también introduce su propio error a la medición.

Por otro lado, respecto del estudio conducido por Noorany, hay que indicar para la operación general de determinar la densidad in-situ mediante el cono de arena, éste le atribuye una precisión menor al 5%, sin embargo durante el presente estudio se ha demostrado que la precisión en la medición solamente del volumen del agujero, el cono de arena llega a una precisión de 1.51%, es decir una precisión mucho más alta que la reportada por Noorany en el año 2000.

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, y sobre la base de las conclusiones preliminares presentadas en cada capítulo, se llega a las siguientes conclusiones generales:

### **5.1. CONCLUSIONES**

1. La precisión en la determinación de la densidad in situ de material de base de un pavimento urbano con el método del cono de arena es 1.51%, encontrándose dentro del rango para la medida del volumen del agujero
2. Los factores que inciden en la determinación de la precisión de la densidad son los operarios, el instrumento, el procedimiento y los tipos de material, a la luz de los cálculos, sólo el tipo de material o agujero estudiado ha influido en la precisión de las mediciones, no así, por ejemplo, la habilidad de los operarios dado que su influencia es prácticamente despreciable
3. El método tradicional en la medición de la densidad satisface en variabilidad introducida por los operarios durante su ejecución.

## 5.2. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a los autores de las normas peruanas de pavimentos y carreteras que puedan revisar las técnicas modernas de determinación de la precisión de instrumentos como lo son los estudios de repetitividad y reproducibilidad.
2. Así mismo, a los residentes de obra, supervisores de obra y proyectistas de obras de carreteras y pavimentaciones para que puedan incluir dentro de sus cálculos las tolerancias y precisiones halladas durante la presente investigación.
3. A los laboratorios geotécnicos de la ciudad del Cusco para que puedan realizar estudios de este tipo en sus equipos, cuando aquellos no cuenten con calibración o hayan perdido la misma por causa del uso.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andrea Ulloa Calderón. (29 de setiembre de 2011). *Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico*. Lanamme UCR.
- Arbeláez, M. B., Sañazar, O. A., & Vargas, J. A. (2007). Método Anova utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. 533-537. Obtenido de *Scientia Et Technica*, XIII (37).
- Barrio, j. F. (1999). *Como Mejorar los Procesos en su Empresa*. FC. Obtenido de [https://books.google.com.pe/books?id=Sy4Z\\_v1yFO0C&pg=PA249&dq=estudio+de+repetibilidad+y+reproducibilidad&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiovMHohPiAhXKtIkKHY1PDUwQ6AEIJzAA#v=onepage&q=estudio%20de%20repetibilidad%20y%20reproducibilidad&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=Sy4Z_v1yFO0C&pg=PA249&dq=estudio+de+repetibilidad+y+reproducibilidad&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiovMHohPiAhXKtIkKHY1PDUwQ6AEIJzAA#v=onepage&q=estudio%20de%20repetibilidad%20y%20reproducibilidad&f=false)
- estudio de repetibilidad*. (s.f.). Obtenido de <http://lestloko.blogspot.com/2011/12/el-estudio-de-r.html>
- Gardney, N., & Brown, J. (2000). *STP*. Colombia.
- Guzman Abril, A. A. (2013). Manual Operativo Del Aparato De Globo De Hule Astm D 2167, Análisis Comparativo Y Descriptivo Con El Método Del Cono De Arena Astm D 1556 Para La Determinación De La Densidad De Campo. (*TESIS de Graduacion* ). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3569\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3569_C.pdf)
- Guzman Abril, A. A. (junio de 2013). Manual Operativo Del Aparato De Globo De Hule Astm D 2167, Análisis Compartivo Y Descriptivo Con El Método Del Cono De Arena Astm D 1556 Para La Determinación De La Densidad De Campo. ( *TESIS de graduacion* ).

Universidad De San Carlos De Guatemala, GUATEMALA. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3569\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3569_C.pdf)

javier de la Torre Zermeño, F. (2003). *El mundo de la fisca*. Mexico: El progreso.

M.T.C. (12 de ENERO de 2018). *Glosario De Términos*. Obtenido de [http://transparencia.mtc.gob.pe/idm\\_docs/normas\\_legales/1\\_0\\_4032.pdf](http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_4032.pdf)

Mejía Soto, E. (2011). *Deficinion de conceptos de medicion*. Obtenido de Contabilidad Ambiental. Crítica a la Contabilidad Financiera Ambiental, Edición electrónica gratuita. Texto completo en [www.eumed.net/libros/2011a/919/](http://www.eumed.net/libros/2011a/919/) : <http://www.eumed.net/libros-gratis/2011a/919/Conceptos%20generales%20de%20medicion.htm>

Minedu. (Abril de 2014). *Magnitudes de la Educación - ESCALE - Unidad de Estadística Educativa*. Obtenido de <http://escale.minedu.gob.pe/magnitudes>

MTC E,117. (2000). *Ensayo para determinar la densidad de los suelos en el campo por el metodo del cono de arena* .

Nooranny, G. C. (2000). *Variabilidad en las pruebas de densidad de campo para la ASTM STP*.

Redus, J. (s.f.). *estudio de determinacion de densidad in situ para bases y suelos*.

repeti. (s.f.). *Qué es un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) del sistema de medición*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/gage-r-r-analyses/what-is-a-gage-r-r-study/>

REYES, H. H. (Setiembre de 2007). *Estudio De Repetibilidad Y De Reproducibilidad R&R*.

Sotelo, M., Mazari, M., Garibay, J., & Nazarian, S. (2014). Variability of Moisture Content Measurement Devices on Subgrade Soils. *Geo-Congress 2014 Technical Papers, GSP 234* © ASCE 2014, 1425-1432.

## ANEXO I : Panel fotográfico de la investigación.

**Fotografía 1: Se aprecia el lavado de arena**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 2: La arena ya lavada**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 3: Arena listo para poner al horno**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 4: Colocado de arena en el horno para el secado de 24 horas a una temperatura 110 °c**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 5: Preparando material de base**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 6: Preparando material para la muestra**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 7: Compactando con el pison**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 8: Preparando material para la otra muestra**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 9: Compactando**



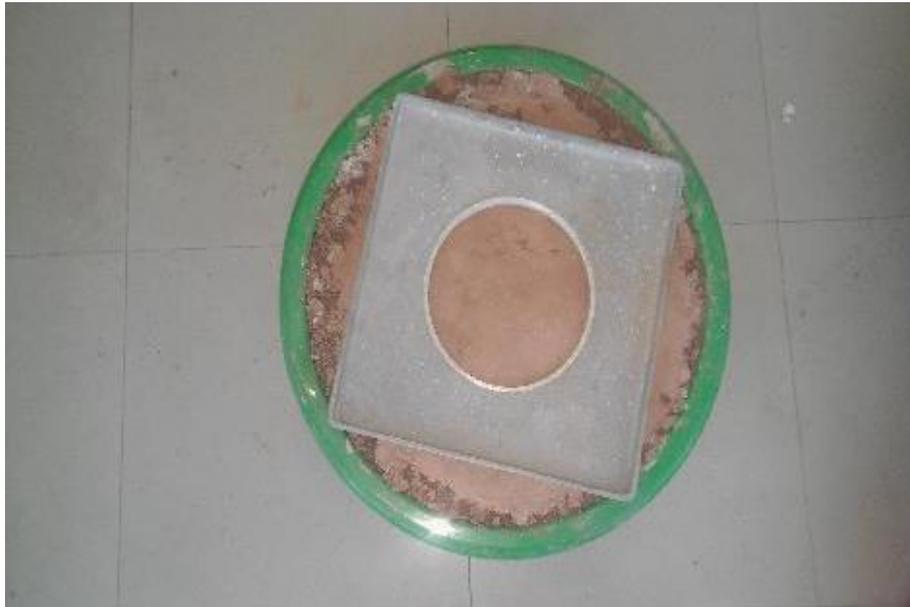
Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 10: Tenemos las muestras ya secas**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 11: Colocando para la perforación junto con el plato base**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 12: Se ha perforado ya los hoyos en cada muestra**



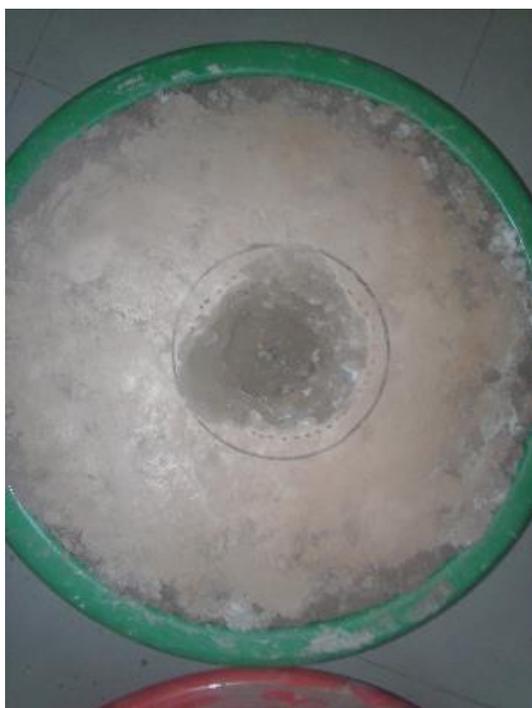
Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 13: Muestra 02**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 14: Muestra 01**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 15: Peso del proctor modificado**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 16: Tomando el peso del aparato del Cono de arena**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 17: Invertiendo el cono de arena para calibrar**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 18: Se suelta el material**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 19: El proctor modificado ya con la arena**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 20: Eliminando la arena sobrante**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 21: Toma de peso del proctor + arena**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 22: Rellenado de aparato de cono de arena con arena tamizado con la malla # 10**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 23: Tamizando**

Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 24: Se toma el peso**

Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 25: Registrando los datos**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 26: Enumerando las muestras**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 27: Realizando el proceso**

Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 28: Continuando con el proceso**

Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 29: Continuando con el proceso**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 30: Toma de datos del operario 01**

Volumen del producto = 1000000 m<sup>3</sup>  
 Densidad de la arena = 1.27 g/cm<sup>3</sup>  
 Densidad de arena = 1.27 g/cm<sup>3</sup> → 1.27 t/m<sup>3</sup>

Calibración del Cono:  
 Pesa Cono + Arena = 8.7020  
 Pesa Cono + Arena = 8.7114  
 Pesa de arena para calibración de Cono  
 8.200 -  
 8.7114  
 1.27 t/m<sup>3</sup>

Nº Agrupación (A)	Nº de Anillos (B)	Nº de Usos (C)	Nº de Usos (D)	Nº de Usos (E)	Nº de Usos (F)	Nº de Usos (G)
1	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
2	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
3	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
4	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
5	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
6	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
7	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
8	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
9	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200
10	2.200	2.200	1.200	1.200	1.200	1.200

Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 31: Realizando el ensayo el segundo operario**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 32: Realizando el el trabajo el tercer operario**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 33: Prosiguiendo con el ensayo**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 34: Registro de Datos**



Fuente: Elaboración Propia

**Fotografía 35: Los resultados del Operario 03**

Agujero (1)	PESO ANTES (2)	PESO DESPUES (3)	PESO COMO (4)	PESO AJUSTADO (2) - (3) - (4)
↓	7930	5656	1292	982
3	7846	4836	1292	1718
3	7758	4740	1292	1726
2	7602	5316	1292	994
1	7578	5296	1292	990
3	7554	4836	1292	1726
2	7480	5178	1292	990
1	7436	5168	1292	976
↓	7414	5142	1292	980
2	7380	5102	1292	986
2	7352	5068	1292	992
3	7326	4314	1292	1720

Fuente: Elaboración Propia