

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.-Generalidades.-

Dada las características de la ingeniería para la ejecución de obras se requiere grandes movimientos de tierra, que permiten en cada una de ellas realizar un trabajo de compactación. El avance tecnológico es cada vez más rápido y sorprendente, si hablamos del ámbito de nuestra profesión los equipos y/o instrumentos que nos permiten llevar a cabo cada una de las obras ya sea en su diseño, construcción y mantenimiento no son la excepción. Entonces sabiendo que esto es una realidad y que como tal debemos afrontarla.

Con el transcurso del tiempo, la tecnología ha evolucionado de una manera significativa en todas las áreas. Esto exige que el profesional se mantenga al día con los avances tecnológicos.

En el área de la Ingeniería Civil día a día se generan cambios no solo en los procedimientos de construcción, sino también en las políticas de control de calidad. Se manifiesta en el área de la construcción, ya que como es de saber las carreteras en la actualidad representan un factor importante en el desarrollo económico de una población. Esto conlleva que al momento de realizar la construcción de carreteras se conozcan las características propias de los materiales a utilizar (Propiedades físicas o mecánicas), sabiendo que el control de calidad para la realización de estas, se basa tanto en normas nacionales; como internacionales es necesario tener un control estricto para la realización de las mismas. Esto se logra a través de la realización de pruebas, tanto de campo (*in situ*), como las realizadas en gabinete.

En nuestro medio uno de los ensayos más comunes en la construcción de carreteras es el llamado Densidad de campo, el cual es utilizado para determinar el porcentaje (%) de compactación del suelo en las diferentes capas de la carretera. Para dicho ensayo existen diferentes métodos, el más utilizado es el denominado método del cono de arena o método de la arena, sin embargo en obras muy extensas dicho método es demasiado lento y trabajoso, debido a que su procedimiento se ve afectado por factores climatológicos y humanos. Afortunadamente la tecnología avanza de una manera extraordinaria, ya que

en la actualidad existen métodos más avanzados los cuales son denominados métodos nucleares que permiten llevar a cabo el trabajo de una manera más rápida y ventajosa.

1.2.- Justificación.-

Habiendo identificado que la densidad es un elemento o parámetro muy importante dentro la Mecánica de Suelos en su aplicación en el diseño y construcción de carreteras por lo que se hace necesario un análisis exhaustivo ya que juega un papel importante en la compactación de las capas de un pavimento, sobre todo si es un pavimento flexible, es decir el éxito de una buena compactación depende en gran medida de una densidad adecuada.

Por otro lado teniendo en cuenta que para la obtención o medición de la densidad existen varios métodos. Así mismo considerando que en nuestra región o departamento de Tarija los medios o métodos más empleados para la medición u obtención de la Densidad son el del “Cono de Arena” y el del “Densímetro Nuclear”, siendo este último un método que está desplazando al primero, se ve la necesidad de efectuar un análisis de estos dos métodos. Este análisis implicará una comparación de ambos, previo estudio de cada uno de ellos.

Como este estudio es comparativo, para llevar a efecto este objetivo es necesario realizar una correlación que permita observar en qué medida se puede afirmar que ambos métodos expresan o arrojan resultados similares ó en su defecto cómo varían los resultados de un método respecto del otro. Los resultados de este estudio, claro está luego de su conclusión, nos ayudará o permitirá observar cual de los dos métodos analizados es más confiable, y de esta manera saber elegir con fundamento técnico qué método es el mejor para la aplicación en obras.

Luego de realizar este estudio se podrá tener un instrumento técnico que nos permitirá resolver problemas de elección del método a emplear sabiendo cual es el más adecuado para la obra que se quiera diseñar o ejecutar. Es decir sabiendo elegir el método se logrará minimizar el tiempo, pero sobre todo se tendrá una calidad requerida en las obras.

También una vez concluido este estudio se tendrá como ventajas que se contará con criterios técnicos necesarios para saber qué medios ó métodos emplear en la obtención de la densidad, es decir no se hará una elección a ciegas. Por otro lado también nos ayudará saber

en qué medida se puede confiar en cada uno de los dos métodos analizados conociendo cada uno de ellos y la correspondiente correlación de ambos.

1.3.- Objetivos.-

1.3.1.- Objetivo General.-

Realizar un análisis comparativo a través de una correlación de densidades entre los métodos de “Cono de Arena” y “Densímetro Nuclear”, de tal manera que nos permita determinar la analogía que existe entre ambos métodos.

1.3.2.- Objetivos Específicos.-

Los objetivos específicos del presente estudio son:

- Efectuar un análisis del parámetro “densidad” en mecánica de suelos.
- Analizar los métodos más empleados en la determinación de la Densidad In Situ.
- Realizar ensayos aplicando el método de Cono de Arena y Densímetro Nuclear.
- Efectuar un procesamiento de los datos obtenidos del método de Cono de Arena y Densímetro Nuclear.
- Obtener una correlación de los resultados por ambos métodos.
- Efectuar un Análisis Comparativo de los resultados obtenidos a través de ambos métodos.

1.4.- Alcance.-

El alcance del presente estudio tiene lugar en el tramo carretero Puente Temporal-San Jacinto Norte-Exposur que es parte del proyecto denominado: Mejoramiento Camino Portillo-Temporal-San Jacinto Norte y Sud-Tabladita-San Luis Oeste.

Se optó por este tramo por dos motivos fundamentales: primero, por la cercanía a la ciudad y segundo, porque en este tramo se efectuó el control de compactación y por consiguiente también, densidades, es decir en este tramo los técnicos del Servicio Departamental de Caminos realizaron esta tarea, por lo cual se aprovechó estas actividades para efectuar de manera paralela la prueba del cono de arena.

En dicho tramo se trabajó sobre una Sub-rasante mejorada con una clasificación de GW-GC según SUCS. y de A-2-6(8) según AASHTO, es decir estamos hablando de una grava bien graduada con arcilla y una Sub-base que se trata de un suelo GW-GM según SUCS y A-2-4(8) por AASHTO, se trata de una grava bien graduada con arcilla limosa ; entonces estoy hablando que el análisis se lo realizó en un suelo previamente compactado, dicho de otro modo se aplicó el estudio a suelos compactados que son parte de un pavimento flexible y por consiguiente son compactados. Cabe señalar también que se optó por el tramo mencionado porque realizar mediciones con el Densímetro resulta una tarea riesgosa por el material radiactivo que este emana, motivo por el cual sólo personal del SEDECA puede operar el equipo, ya ellos están capacitados para tal tarea. Por otro lado no se pudo realizar el trabajo en otros tipos de suelos, como los naturales porque por normas y reglas del SEDECA no se presta el equipo a particulares y mucho menos para sacar afuera.

También es importante explicar o aclarar que el Densímetro Nuclear que se empleó para el análisis es de propiedad del S.E.D.E.C.A. y que para el otro método se utilizó el equipo de la universidad, es decir se recurrió al laboratorio de la carrera de ingeniería civil que cuenta con los instrumentos que se utilizan para la determinación de la densidad in situ a través del método del cono de arena.

Es importante decir que la correlación y comparación de los resultados obtenidos servirán para observar en qué medida estos varían uno del otro, es decir que en base a criterios técnicos se decidirá o recomendará uno u otro método para su respectivo empleo.

1.5.- Medios y Metodologías.-

Los medios y la metodología para la realización del presente análisis serán los conocidos y aplicables en nuestro medio y son los que a continuación se detallan:

1.5.1.- Medios.-

Los medios a utilizar para lograr los objetivos planteados son esencialmente los equipos propiamente dichos es decir para el método Cono de Arena se utilizará los siguientes medios:

- Aparato de densidades

- Base porta cono
- Arena normalizada
- Cápsulas selladas
- Balanza de masa 12 Kg.
- Envase (recipiente con tapa)
- Accesorios (picota, pala, cucharón, brocha, cuchara, cincel, combo o martillo, flexómetro, etc.)

Para el método del Densímetro Nuclear se utilizará el equipo propiamente dicho como ser:

- Varilla de perforación.
- Extractor
- Placa para raspado.

1.5.2.- Metodología.-

La metodología a utilizar será la propiamente aplicada en las obras que se están construyendo en el departamento de Tarija. Es decir en el caso del método de Cono de Arena se aplicará el procedimiento tradicional, en el caso del Densímetro Nuclear la metodología a aplicar será la de transmisión directa.

CAPÍTULO II

MECÁNICA DE SUELOS

2.1. Introducción.-

La finalidad de todo estudio referido al mejoramiento de las propiedades de un determinado suelo es justamente con el objeto de minimizar los diferentes problemas que se presentan en la conformación de los mismos y obtener una economía adecuada en el diseño de los pavimentos y de esta forma decidirse por la utilización de los suelos con características arenosas, de estos a su vez requiere tener un comportamiento practico-teórico de los principales tipos de suelos y sus propiedades.

Generalmente se ha realizado un cuadro de todos los suelos los mismos que se encuentran como gravas, arenas, limos ó arcillas. Todos los trabajos de clasificación de suelos están basados en este cuadro.

Los suelos provienen de la interpretación de las rocas In Situ, o bien por su depósito una vez que han sido transportados por el agua o viento.

Se dará una descripción breve de los suelos más comunes según sus principales elementos.

2.1.1. Formación de los suelos.-

La corteza terrestre está compuesta principalmente por rocas cuya formación geológica ha tomado varios millones de años. Además, durante el mismo periodo la superficie rocosa ha sufrido una desintegración y una descomposición continua mediante procesos de meteorización.

Debido a la permanente exposición a los agentes atmosféricos tales como inundaciones, actividad glacial y fuertes vientos, gran parte de los residuos de roca fragmentada por la meteorización ha sido arrastrada, sometida a abrasión y más fragmentación y eventualmente depositada, por ejemplo, a lo largo del curso de los ríos, lagos, océanos y glaciares. Con los cambios climáticos y las fluctuaciones de los niveles medios del mar y de la superficie terrestre, este ciclo de erosión, transporte y formación de depósitos de los

materiales producidos por la meteorización ha sido interrumpido, renovado y repetido innumerables veces durante decenas de miles de años.

En lo que respecta a la formación de los suelos residuales, existen dos conceptos que juegan un papel muy importante. Son estos el perfil de la meteorización y el conjunto de estructuras heredadas. El primero es la secuencia de materiales con diferentes propiedades, que se ha formado en el lugar donde se le encuentra y que sobre yace a la roca no meteorizada. Se forma tanto por ataque mecánico como por descomposición química y puede variar considerablemente de un punto a otro, sobre todo por variaciones locales en el tipo y estructura de la roca, topografía, condiciones de erosión, régimen de aguas subterráneas y clima.

Las estructuras heredadas consisten en diaclasas, exfoliaciones, juntas, grietas, fallas y otros defectos estructurales que muestran el suelo como herencia de los que tenía la roca original. Su influencia es tal que frecuentemente las propiedades mecánicas de una muestra intacta del material no pueden considerarse en absoluto representativas de las propiedades del conjunto.

Sin embargo, no debe creerse, que las reglas anteriores sean inmutables; la naturaleza suele actuar con una complejidad que desafía cualquier regulación.

Como resultado de lo anterior, gran parte de la superficie actual de la tierra, el lecho rocoso relativamente inalterado, está cubierto por una acumulación de materiales sin cementación o muy poco cementados, a menudo de naturaleza y espesor altamente variable; este es el material que los ingenieros llaman suelo.

2.1.2. Definición de suelo.-

La definición de suelo en ingeniería se presenta como cualquier material no consolidado compuesto de distintas partículas sólidas con gases o líquidos incluidos. El tamaño máximo de las partículas que pueden calificarse como suelo no es fijo, pero lo determina la función de que ellas están implicadas. En las excavaciones para cimientos y trincheras, que se ejecutan a mano, y en la construcción de rellenos por capas, el tamaño máximo es de 30 cm de diámetro (40 Kg), que es el tamaño máximo que un hombre puede levantar. Cuando la

excavación se ejecuta mecánicamente el límite que a veces se fija, es $\frac{1}{2} \text{ m}^3$. El suelo contiene una amplia variedad de materiales tales como la grava, la arena y las mezclas arcillosas de los depositadas por glaciares, las arenas aluviales y los limos y las arcillas de los depósitos aluviales de los ríos, las arcillas marinas blandas y las arenas de las playas de la costa, las rocas muy meteorizadas de los trópicos, y hasta las escorias. Los suelos pueden ser mezclas bien definidos de unos cuantos minerales específicos o mezclas heterogéneas de cualquier cosa.

Por tanto, los problemas de ingeniería en suelo o roca, rara vez pueden resolverse confiando ciegamente en datos empíricos recogidos en proyectos anteriores o en los más seductores análisis de computadoras. Cada situación es única y requiere una cuidadosa investigación y un completo análisis científico, así como el criterio ingenieril basado en una vasta experiencia.

Y aún más, la ingeniería del suelo y de la roca requiere imaginación, intuición, iniciativa y coraje. Imaginación para ver representadas en tres dimensiones las fuerzas y reacciones de los complejos materiales; intuición para inferir lo que no puede deducirse del conocimiento científico o de experiencias anteriores; iniciativa para inventar nuevas soluciones para los viejos y nuevos problemas; afrontando los riesgos siempre presentes de lo desconocido. Esto es un desafío constante que la verdadera ingeniería sea una tarea grata y seductora.

2.1.3. Naturaleza de los suelos granulares.-

De acuerdo con la definición que se hace en ingeniería, casi cualquier cosa de la corteza terrestre está incluida en la definición de suelo y de roca. Los más importantes sólidos caen dentro de estas tres clases: 1) minerales, 2) productos de síntesis orgánica y descomposición, y 3) materiales artificiales. Desde luego, los constituyentes más importantes del suelo y de la roca son minerales: compuestos químicos definidos en estado natural de estructura cristalina.

Los minerales predominantes, aunque hay cientos de minerales catalogados en los manuales de mineralogía, o número relativamente pequeño constituye la mayor parte de las

rocas. Estos minerales y sus propiedades principales, las que tienen relación con la ingeniería civil, están agrupados en el cuadro 2:

Tabla 1.- Principales minerales de rocas y suelos

| Grupo Mineral | Variiedad | Dureza | Color | Exfoliación | Peso Espej. relativo |
|-------------------------|--|--------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Silice | Cuarzo | 7 | Incoloro-blanco | Ninguna | 2.66 |
| | Pedernal | 7 | Claro | Ninguna | 2.66 |
| Feldespato | Ortoclase, microlina Plagioclase | 6 | Blanco-rosado | Angulo recto | 2.56 |
| | | 6 | Blanco-gris | Angulo recto superficie, estriada | 2.6-2.75 |
| Mica | Muscovita Biotita | 2-2.5 | Plateado | Escamoda fina | 2.75-3 |
| | | 2.5-3 | Oscuro | Escamoda fina | |
| Ferromagne siano | Piroxeno: augita | 5-6 | Negro | Angulo Recto | 3.1-3.6 |
| | Anfibola: hornablenda Olivino | 5-6 | Negro | Ángulo oblicuo | 2.9-3.8 |
| | | 6-5.7 | Verdoso | | 3.3 |
| Óxidos de hierro | Limonita, magnetita | 5-6 | Rojo, Amarillo negro | | 5.4 |
| Calcita Dolomita | Cristalina a terrosa Cristalina a terrosa | 3 | | 3 caras del paralelogramo | 2.7 |
| | | 4 | Blanco-gris | | 2.8 |
| Minerales Arcillosos | Caolinita, illita Montmorilonita | 1 | Blanco | Terrosa | 2.2-2.6 |
| Celulosa | | | | Fibrosa | 1.5-2 |

Fuente: Mecánica de Suelos de Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez.

2.1.4. Naturaleza de los suelos arcillosos.-

Hay muchas formas de minerales arcillosos, con algunas semejanzas y grandes diferencias en descomposición, estructura y comportamiento. Todos son de grano extremadamente fino, con grandes áreas superficiales por unidad de masa. Todos tienen, probablemente, una estructura cristalina definida, que incluye gran número de átomos agrupados en complejos modelos tridimensionales, todos eléctricamente activos.

La arcilla cuando es pura, se compone exclusivamente de silicato de alúmina hidratado y procede de la descomposición de los feldespatos. Por lo general, acompañan al silicato varias impurezas. La arcilla se puede considerar como una mezcla de hidrosilicato de alúmina con otros minerales finamente divididos. Se han encontrado mezclas naturales de arcilla y arena con proporciones variadas, desde los lechos de arcilla casi pura hasta los de arena con proporciones variadas; es difícil establecer una clasificación.

La arcilla compactada y húmeda es impermeable, es decir, que el agua no pasa a través de ella como lo haría a través de una arena porosa; pero cuando la arcilla está expuesta al agua, la absorbe gradualmente hasta saturarse en una masa blanda.

2.2. Propiedades de los Suelos.-

En muchos campos, tal como el de la ingeniería, hay que tener en cuenta tantas propiedades importantes, que cualquier tabla de clasificación de suelos resultaría muy burda. En su lugar, una descripción exacta de las propiedades significativas del suelo puede dar la información necesaria sin las instrucciones de una clasificación determinada. Las propiedades de los suelos se relacionan a continuación, son importantes en la mayoría de los problemas de suelos, y por lo tanto, forman la base de una completa descripción del suelo; también son un requisito suplementario de la Clasificación Unificada.

Para una descripción precisa, muchas de estas propiedades deben ser determinadas por ensayos de laboratorio. Sin embargo, un ingeniero de suelos experimentado, puede estimar la mayor parte de ellas observando y examinando cuidadosamente en el campo pequeñas muestras de suelo.

2.2.1. Cohesión.-

Cohesión es la atracción intermolecular que existe entre cada una de las partículas de un suelo de grano fino, mientras más pequeñas sean ellas, mayor será dicha atracción.

2.2.2. Plasticidad.-

Otra relevante característica que acusa el suelos es la plasticidad, que es la facultad que tienen ellos de alterar su forma si se le aplica una fuerza, sin cambiar sensiblemente de volumen y conservar después la nueva forma adquirida.

La plasticidad se debe al contenido de partículas más finas de la forma laminar, éstas influyen en la compresibilidad del suelo a la vez que en su permeabilidad. Al aplicar presión a una masa de partículas laminares, el volumen ocupado disminuye considerablemente, lo que produce una compresibilidad alta del suelo en cuestión, mientras su permeabilidad es baja.

2.2.3. Resistencia.-

La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo está determinada por la resistencia al deslizamiento entre las partículas que procuran desplazarse unas respecto de otras. Esta resistencia es máxima cuando un espécimen alcanza el límite de resistencia al esfuerzo cortante, estando sometido a una presión normal efectiva. Una vez superado este límite de resistencia hasta que llega un valor constante, aún cuando las deformaciones continúen en aumento, este nuevo límite se denomina resistencia residual.

Ordinariamente la resistencia se define en términos de la resistencia a compresión sin confinar, pero se puede estimar por la presión que se necesita para comprimir entre los dedos una muestra inalterada. Si el suelo es frágil (que falla bruscamente con pequeña deformación), elástico (como la goma), friable (que se desmorona fácilmente) o susceptible (que pierde resistencia al rearmarse), estos términos deben incluirse en la descripción.

Tabla 2.- Resistencia del Suelo.-

| Término Usado | Resistencia a Compresión Sin confinar según Terzaghi y Peck. (kg/ cm²) | Ensayo de campo según Cooling, Skempton y Glossop |
|----------------------|--|--|
| Muy Blando | 0-0.25 | Se escurre entre los dedos al cerrar la mano |
| Blando | 0.25-0.5 | Se amasa fácilmente con los dedos |
| Firme | 0.5-1.0 | Se amasa con fuerte presión de los dedos |
| Resistente | 1.0-1.5 | Se deprime con fuerte presión de los dedos |
| Muy resistente | 1.5-2.0 | Se deprime ligeramente con la presión de los dedos |
| Duro | 2.0 o más | Se hunde ligeramente con la punta del lápiz |

Fuente: Karl Terzaghi.

2.2.4. Permeabilidad.-

Se dice que un material es permeable cuando contiene vacíos continuos. Como tales vacíos existen en todos los suelos, incluyendo las arcillas más compactadas, y en todos los materiales de construcción no metálicos, comprendidos el granito sano y la pasta de cemento, dichos materiales son permeables. La circulación de agua a través de su masa

obedece también aproximadamente a leyes idénticas, de modo que la diferencia entre una arena limpia y un granito es, en este concepto, solo una diferencia de magnitud.

Las primeras experiencias interesantes con referencia a la permeabilidad, fueron realizadas por Darcy, cuyo resultado fundamental determinó que el caudal por unidad de superficie es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la altura de conducción:

$$V=k*i$$

V= velocidad de filtración

K= coeficiente de permeabilidad

I= gradiente hidráulico

Tabla 3.- Coeficiente de permeabilidad

| | | |
|--|----|----------|
| Grava | 10 | < k < 10 |
| Arena | 10 | < k < 10 |
| Limo y arena arcillosa | 10 | < k < 10 |
| Arcilla | 10 | < k < 10 |
| Rocas aparentemente no fisurada | 10 | < k < 10 |
| Nota: Para poder fácilmente centrar el orden de magnitud de estos coeficientes diremos que 10 ⁻⁶ cm/s representa una velocidad de 30 cm/año | | |

Fuente: Karl Terzaghi.

2.3. Densidad: Definición.-

La densidad es una propiedad física de la materia que se define como la proporción de la masa de un objeto a su volumen.

Esta relación entre masa y volumen de una sustancia es lo que define la propiedad física de la densidad:

$$\text{Densidad} = \text{Masa/Volumen}$$

La **densidad** es una propiedad intensiva de la materia definida como la relación de la **masa** de un objeto dividida por su volumen. La masa es la cantidad de materia contenida en un objeto y comúnmente se la mide en unidades de gramos (g). El volumen es la cantidad de espacio ocupado por la cantidad de la materia y es comúnmente expresado en

centímetros cúbicos (cm^3) o en mililitros (ml) (un cm^3 es igual a 1 ml). Por consiguiente, las unidades comunes usadas para expresar la densidad son gramos por mililitros (g/ml) y gramos por centímetros cúbicos (g/cm^3).

La densidad es un concepto fácil de confundir. Por ejemplo, muchas cosas que comúnmente creemos que son 'livianas' o 'pesadas' no tienen masas diferentes, pero sí tienen densidades diferentes. Mire la tabla aquí mostrada para ver ejemplos de las densidades de sustancias comunes.

Tabla 4.- Densidad de algunas sustancias

| Densidad de Algunas Sustancias Comunes | | |
|---|------------------------------------|--|
| Substancia | Densidad(g/cm^3) | |
| Madera (Roble) | 0.6 - 0.9 |  |
| Ladrillos | 1.84 |  |
| Acero | 7.80 |  |
| Plata | 10.50 |  |

Fuente: <http://www.rincondelvago.com>.

2.4. Compactación de Suelos.-

2.4.1. Introducción.-

Desde tiempos prehistóricos los constructores han reconocido el valor de la compactación del suelo para producir masas fuertes, de asentamientos y resistentes al agua.

Por más de 2000 años la tierra ha sido apisonada con maderos o rodillos pesados, por las pisadas del ganado o compactada por cilindros o rodillos, pero el costo de este trabajo bruto era mayor, en muchos casos, que el valor de la compactación.

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. Se distingue de la consolidación de los suelos en que, en este último proceso el peso específico del material crece gradualmente bajo la acción natural de sobre cargas impuestas que provocan expulsión de agua por un proceso de fusión; ambos procesos involucran disminución de volumen, por lo que en el fondo son equivalentes.

La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumentan su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como carriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. Algunas veces se hace necesario compactar al terreno natural, como en el caso de cimentaciones sobre arenas sueltas.

Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de los materiales con los que se trabaja en cada caso; con base en un experimento sencillo que los materiales puramente friccionantes, como la arena, se compactan eficientemente por métodos vibratorios, en tanto que en los suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso. En la práctica estas características se reflejan en los equipos disponibles para el trabajo, tales como plataformas vibratorias, rodillos lisos, neumáticos o “pata de cabra”. En las últimas épocas los equipos de campo han tenido gran desarrollo y hoy existen en gran variedad de sistemas o pesos, de manera que el ingeniero tiene la posibilidad de elegir entre muchos implementos adecuados a cada caso particular.

La necesidad de compactar apareció no hace aun muchos años debido a la urgencia de utilizar las obras inmediatamente, sin tiempo para que el tráfico o los agentes atmosféricos produjesen los asientos definitivos. Por tanto, los sistemas de compactación se han ido desarrollando paralelamente a la mecanización de las obras, ya que la aplicación de la energía necesaria exige una máquina adecuada en potencia y movilidad, para cada caso.

El problema se presenta porque la energía de compactación necesaria en cada caso no es solamente diferente, sino que también lo es el modo como dicha energía debe ser transmitida al terreno. La energía debe ser transmitida al terreno. Esta es la razón de que existan actualmente en el mercado diferentes tipos de máquinas compactadoras, y como consecuencia, la dificultad inherente de elegir en cada uno el modelo más idóneo.

No quiere decir esto, un terraplén con una máquina de un tipo u otro quede mejor o peor compactado. Con cualquier maquina, por poco específica que esta sea, podemos obtener una compactación satisfactoria. Lo que ocurrirá es que gastará más energía de compactación y como consecuencia lógica más tiempo, más dinero, etc., si no elegimos la máquina adecuada. Por lo tanto el problema más importante en la compactación es elegir la máquina adecuada para cada trabajo. Para dicha elección tenemos algunas ideas generales, consecuencia de ensayos prácticos más o menos guiados por teorías, que nos permiten de entrada y a la vista de las principales características del material a compactar, decidir el tipo de máquinas más idóneo. Los factores principales que influyen en la capacidad de compactación de los suelos, son la composición granular y el contenido de humedad.

Dentro de la composición granular, lo más importante es el tamaño del grano, mucho más —incluso— que la composición del mismo. El contenido de humedad es el otro factor importante en la compactación. Se determina el valor más favorable mediante el ensayo Proctor, que nos da la relación entre el contenido de humedad y la densidad del terraplén.

Así vemos que la densidad seca máxima crece con la energía de compactación. La humedad óptima depende de la energía utilizada para compactar.

El agua al actuar como lubricante de las partículas facilita una mejor imbricación entre ellas, pero si hay exceso de la misma, parte de la energía de compactación se pierde en expulsar el agua, por lo que aparece la existencia de un porcentaje óptimo, que es necesario determinar en cada caso. Ahora bien, como la corrección de humedad de un material es difícil y costosa, conviene evitarla, siendo preferible utilizar energías de compactación elevadas que permitan conseguir densidades secas superiores en un campo de humedades más amplio. Hay de todas formas suelos que presentan más o menos dificultad de compactar. Entre los primeros están los cohesivos en general, los de granulometría

uniforme, no cohesivos o débilmente cohesivos, con un coeficiente de desigualdad pequeño, rocas ligeras y rocas pesadas.

Entre los suelos fáciles, tenemos las arenas bien graduadas no cohesivas o poco cohesivas a partir de un valor mediano de coeficiente de desigualdad, mezclas de arena y gravillas bien graduadas, no cohesivas o poco cohesivas con iguales coeficientes y, en general, todos los suelos no cohesivos o escasamente cohesivos aún con relativamente pequeñas desigualdades de grano.

Compactar es la operación previa, para aumentar la resistencia superficial de un terreno sobre el cual deba construirse una carretera y otra obra. Aplicando una cantidad de energía la cual es necesaria para producir una disminución apreciable del volumen de hueco del material utilizado.

El suelo, como cualquier elemento natural, posee un equilibrio entre los diversos factores que lo influyen. Un cambio de este equilibrio puede provocar una alteración física, química o biológica. La compactación es la principal causa de alteración del suelo.

Hay dos situaciones con elevado riesgo de compactación: áreas con fuerte tránsito de vehículos y personas, y áreas cercanas a lugares en construcción. Hay suelos con una tendencia más o menos acentuada a la compactación, en función de la composición, estructura y contenido de humedad. Las constructoras a menudo trabajan con maquinarias muy pesadas, sin delimitar la zona en la que se encuentran y se plantarán árboles. Se desconocen cuál es la superficie que abarca el aparato radical, así como, se ignoran los efectos derivados de la compactación y dificultad que se encuentran para intentar resolverlo.

2.4.2. Dependencia de los factores que influyen en la compactación.-

Aparte del contenido inicial de agua y de la energía específica de compactación, que son los factores más importantes entre los que influyen en la compactación de los suelos, hay otros que, en algunos casos, pueden ser de significación y cuya importancia práctica no debe ser subestimada.

La curva y_d-w es diferente si la prueba se efectúa partiendo de un suelo relativamente seco y se va agregando agua para obtener los diferentes puntos o si se parte de un suelo húmedo que se va secando por evaporación en el laboratorio, según la prueba progresa.

El contenido de agua original del suelo en la naturaleza también es un factor que influye, aunque en menor grado, en la porción de la parte “seca” de la curva de compactación, sobre todo cuando se procede a la compactación inmediatamente después de haber incorporado al suelo el agua adicional requerida.

Es común en la práctica de ciertos laboratorios el usar la misma muestra de suelo para la obtención de puntos sucesivos de la curva de compactación: ello implica la continuada “re compactación” del mismo suelo. Esta práctica se ha revelado como totalmente inconveniente toda vez que la investigación experimental ha demostrado, sin género de duda, que procediendo con un suelo recompactado los pesos específicos obtenidos son mayores que los mismos obtenidos con una muestra virgen, por lo que los suelos “re compactados” la prueba pueden llegar a dejar de ser representativa.

2.4.3. Características de la compactación de suelos.-

La compactación de los suelos se produce por la reorientación de las partículas o por la distorsión de las partículas y sus capas absorbidas. En un suelo no cohesivo la compactación ocurre mayormente por la reorientación de los granos para formar una estructura más densa. La presión estática no es muy efectiva en este proceso porque los granos se acuñan unos contra otros y resisten el movimiento.

Si los granos se pueden liberar momentáneamente, las presiones, aun las ligeras, son efectivas para forzarlos a formar una distribución más compacta. El agua que fluye también reduce el rozamiento entre las partículas y hace más fácil la compactación, sin embargo el agua en los poros también impide que las partículas tomen una distribución más compacta. Por esta razón la corriente de agua sólo se usa para ayudar a la compactación, cuando el suelo es de granos tan gruesos que el agua abandona los poros o huecos rápidamente

En los suelos cohesivos la compactación se produce por la reorientación y por la distorsión de los granos y sus capas absorbidas. Esto se logra por una fuerza que sea lo

suficientemente grande para vencer la resistencia de cohesión por las fuerzas entre las partículas.

Para lograr una compactación eficiente en los suelos no cohesivos se requiere una fuerza moderada aplicada en una amplia área, o choque y vibración. La compactación eficiente en los suelos cohesivos requiere presiones más altas para los suelos secos que para los húmedos, pero el tamaño del área cargada no es crítico. La eficiencia se mejora aumentando la presión durante la compactación a medida que el peso específico y la resistencia aumenta.

2.4.4. Objetivos de la compactación.-

Las obras hechas con tierra, ya sea un relleno para una carretera, un terraplén para una presa, un soporte de una edificación o la sub-rasante de un pavimento, debe llenar ciertos requisitos:

- Debe tener suficiente resistencia para soportar con seguridad su propio peso y el de la estructura o las cargas de las ruedas.
- No debe asentarse o deformarse tanto, por efecto de la carga, que se dañe el suelo o la estructura que soporta.
- No debe ni retraerse ni expandirse excesivamente.
- Debe conservar siempre su resistencia e incompresibilidad.
- Debe tener la permeabilidad apropiada o las características de drenaje para su función.

2.4.5. Proceso de compactación en campo.-

La compactación se define como un proceso mecánico mediante el cual se logra la densificación del suelo al reducirse los espacios vacíos por la expulsión de parte del aire contenido en ellos a través de la aplicación de una determinada carga. No todo el aire puede ser expulsado durante este proceso por lo que el suelo se considera parcialmente saturado.

Este proceso, para obtener un mejor resultado, implica el uso de las distintas máquinas que se usan para tal efecto.

2.5. Propósitos y métodos para la compactación de suelos.-

La estabilidad de masas de suelos en su estado natural. Si se excavan tales masas de suelos y se re depositan sin tomar un cuidado especial, la porosidad, permeabilidad y compresibilidad de los mismos aumenta, mientras que su capacidad para resistir la erosión interna por efecto de venas de agua disminuye grandemente. Por ello, hasta en la antigüedad, se acostumbraba compactar los terraplenes que debían actuar como diques o malecones. No se hacían, sin embargo, esfuerzos especiales para compactar los terraplenes viales, pues las calzadas eran suficientemente flexibles como para no ser donadas por un asentamiento.

Hasta hace poco, los terraplenes para líneas ferroviarias eran también contruidos echando tierra suelta, que luego se dejaba asentar bajo su propio peso durante varios años antes de colocar un balasto de alta calidad. El asentamiento de los terraplenes sin compactación no trajo inconvenientes serios hasta que, después de iniciado el siglo veinte, hizo su aparición el automóvil y, con su rápido desarrollo, creó una demanda creciente de caminos pavimentados. Poco tiempo después se hizo evidente que los caminos de hormigón contruidos sobre terraplenes no compactados se rompían con cierta facilidad, y que los pavimentos flexibles de tipo superior tenían la tendencia a desnivelarse en exceso. La necesidad de evitar estos inconvenientes fomento el desarrollo de métodos de compactación que fuesen a la vez eficientes y económicos.

Por su parte, un aumento simultáneo en la construcción de diques de tierra proveyó un incentivo adicional, que coadyuvó también a la corrección de dichos métodos de compactación. Las investigaciones que se realizaron demostraron que ningún método de compactación es igualmente adecuado para todos los tipos de suelos. Además, el grado de compactación que alcanza un suelo dado, sometido a un procedimiento de compactación también dado, depende en gran parte del contenido de humedad del suelo.

La compactación máxima se obtiene para un cierto contenido de humedad conocido como contenido óptimo de humedad, mientras que el procedimiento utilizado para mantener, durante la compactación, la humedad del terraplén cerca de la óptima, se conoce como control de humedad. En la actualidad, aun se tiene un conocimiento muy imperfecto

acerca de las relaciones que existen entre el contenido de humedad en el momento en que se construye el terraplén, el grado de compactación y la forma cómo cambian las características físicas del mismo durante su periodo de servicio.

Los cambios de resistencia, rigidez y permeabilidad que el terraplén sufre con el tiempo y con las variaciones en su contenido de humedad, merecen mucha más atención de la recibida hasta el presente. De aquí que en lo que resta de este artículo casi no se profundiza en las propiedades de los suelos compactados y solo se describen los procedimientos constructivos. En lo que sigue, los métodos corrientes de compactación de terraplenes artificiales se dividen en tres grupos: los adecuados para suelos no cohesivos, los adecuados para suelos arenosos o limosos con cohesión moderada y los adecuados para arcillas. Finalmente, se tratan los métodos para compactar masas naturales de suelos en su lugar de origen.

2.6. Compactación de suelos no cohesivos.-

Los métodos para compactar arena y grava, colocados en orden de decreciente eficiencia son: vibración, mojado y rodamiento. En la práctica, se han utilizado también combinaciones de estos métodos. Las vibraciones pueden producirse de una manera primitiva apisonando con pisonos a mano, o con pisonos neumáticos, o bien dejando caer un peso grande desde cierta altura; un metro, por ejemplo.

Empero, la compactación alcanzada con estos procedimientos es muy variable, pues depende en gran parte de la frecuencia de las vibraciones. Los mejores resultados se obtienen con máquinas que vibran a una frecuencia cercana a la de resonancia del conjunto suelo-vibrador. Cuando f_1 es aproximadamente igual a f_0 , la disminución de volumen o asentamiento es 20 a 40 veces mayor que la que produce una fuerza estática equivalente a la pulsátil. Por medio de rodillos de 5 a 15 t, equipados con vibradores que operan a frecuencias comprendidas entre 1100 y 1500 pulsos por minuto, se ha obtenido la compactación efectiva de arena gruesa, grava y de enrocado de piedra partida con partículas de tamaños comparables (Bertram, 1963). El material se desparrama en capas de 30 a 40 cm de espesor, habiéndose obtenido en algunas obras una compactación adecuada de capas

de espesor mayor, aun cuando en estas capas es difícil evitar la segregación durante el desparramo del material.

El tamaño máximo de las partículas está limitado únicamente por el espesor de las capas. Entre 2 a 4 pasadas de tales rodillos tirados a una velocidad que no exceda de alrededor de 3 km. por hora suele resultar adecuada para alcanzar un alto grado de compactación. No es necesario un control en el contenido de humedad. Tal tipo de materiales han sido también compactados por medio de rodillos neumáticos tirados por tractores Diesel montados sobre cubiertas pesadas. Durante el proceso de compactación se puede agregar agua. Mucha de la compactación que se obtiene en estas condiciones deriva de la producida por el tractor más bien que por el rodillo.

Se necesitan normalmente entre 6 y 8 pasadas del equipo sobre un mismo lugar para obtener un grado satisfactorio de compactación, siempre y cuando el material sea depositado en capas de un espesor no mayor de 30 cm. Cuando se trata de compactar áreas limitadas, pueden resultar adecuados los compactadores manuales mecánicos o los operados a motor. El peso de estos compactadores varia entre varios cientos de kilogramos a varias toneladas y la fuerza pulsante que entregan al terreno, a una frecuencia aproximada a la de resonancia del compactador y el suelo se transfiere a través de una chapa plana o de un rodillo. El espesor de las capas que pueden compactarse efectivamente varía entre 10 y 20 cm.

La compactación con agua se fundamenta en el hecho de que la presión de filtración del agua que escurre hacia abajo rompe los grupos de granos inestables y la inundación temporaria elimina, por lo menos brevemente, las fuerzas capilares. Es mucho menos efectivo que la compactación por vibración. Para compactar terraplenes de caminos se han utilizado dos métodos de molado. En uno de ellos, se amontona la arena en caballetes a ambos lados del camino y luego se arrastra el suelo hacia el centro con chorros de agua, con una presión de 4 a 5 kg/cm², formándose de este modo un depósito que tiene algo de las características de un clique construido por refutado. En el segundo método, la superficie del camino se inunda de agua, la que filtra hacia abajo por la arena ya colocada y escapa por el pie del terraplén.

Ambos métodos requieren aproximadamente 1,5 metros cúbicos de agua por metro cubico de arena, Comparando la porosidad de los terraplenes antes y después del tratamiento, se ha comprobado que el grado de compactación que se obtiene con cualquiera de estos métodos es relativamente bajo. Por ello, esta práctica debe ser desalentada. Los rodillos no vibrantes son relativamente inefectivos para compactar suelos no cohesivos, obteniéndose los mejores resultados cuando la arena está prácticamente saturada. No obstante, en arena limpia, el agua se escurre rápidamente y puede no resultar practicable mantener el material en un estado de saturación.

2.7. Curva de compactación.-

Para las condiciones del ensayo, la densidad seca que corresponde a la cima de la curva se conoce como máxima densidad seca o densidad seca para el 100% de compactación, y el correspondiente contenido de humedad se designa como el contenido óptimo de humedad.

Ninguna de estas cantidades es: una propiedad del suelo en sí mismo. Si, por ejemplo, todas las condiciones se mantienen inalteradas menos el peso del rodillo y se utilice uno más liviano, el valor de la máxima densidad seca, como lo indica la curva: a) es menor y el contenido óptimo de humedad mayor que para un rodillo más pesado. Un incremento en el número de pasadas de un rodillo liviano puede aumentar la máxima densidad seca pero, aún cuando se pudiese alcanzar un valor comparable al de la curva, b) es casi seguro que el contenido óptimo de humedad que corresponde al nuevo valor resultará mayor que el obtenido para un rodillo más pesado. Cambios similares en las relaciones humedad - densidad para un suelo dado acompañan la variación en espesor de las capas y el tipo o peso del equipo de compactación.

Por tanto, el término 100 % de compactación o contenido óptimo de humedad para un suelo dado tiene significación específica solo en relación con un determinado procedimiento de compactación. No obstante, para cualquier material potencial de préstamo es esencial conocer, antes de iniciar la construcción, si para el procedimiento de compactación que se piensa especificar el contenido de humedad en el terreno es excesivo o deficiente con respecto al valor óptimo que corresponde a dicho procedimiento. Más aún, durante la colocación de un terraplén, el ingeniero debe tener los medios para determinar si

la compactación especificada se está alcanzando adecuadamente, aún cuando las características del material de préstamo cambien de tiempo en tiempo. Estos requerimientos han conducido al desarrollo de los ensayos de compactación de laboratorio.

El propósito de todo ensayo de compactación de laboratorio es determinar una Curva Humedad-Densidad comparable a la que le corresponde al mismo material cuando se compacta en el terreno por medio del equipo y procedimiento que se pretende utilizar. Los métodos más corrientes para este propósito se han derivado de uno desarrollado por el Departamento de Caminos de California en los primeros años de la década de 1930 cuando el equipo de compactación que se utilizaba era de un peso relativamente bajo.

De acuerdo con este procedimiento, conocido como el ensayo Proctor normal (Proctor 1933, ASTM D-698-58T), se seca y pulveriza una muestra de suelo, la que se separa en dos fracciones pasándola por el tamiz N° 4. Unos 3 kg. de la fracción que pasa se humedecen con una pequeña cantidad de agua y se mezclan cuidadosamente para producir una parte húmeda que se apisona en tres capas iguales dentro de un recipiente cilíndrico de dimensiones especificadas. Cada capa se compacta con 25 golpes de un pistón normalizado que se deja caer desde una altura de 30 cm. Una vez llenado el cilindro, se enrasa el suelo con su borde superior y se determina: el peso total del suelo y su contenido de humedad. Con estos datos se puede calcular el peso del suelo seco contenido en la unidad de volumen, es decir, la densidad seca.

De una forma similar se determine la densidad seca para mezclas compactadas con humedad creciente hasta que aquella disminuya con el aumento de la humedad.

Se dibuja entonces una curva que muestra la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad. El contenido óptimo de humedad, según el ensayo normalizado de Proctor, es el valor de la humedad que produce la máxima densidad seca. Debido a la influencia que el método de compactación ejerce sobre la curva de humedad-densidad, no se puede esperar de ningún ensayo normalizado, incluido el ensayo de Proctor, que conduzca a resultados de validez general. Solo se puede obtener información concluyente con respecto al contenido óptimo de humedad realizando ensayos a escala natural en el terreno con el equipo de compactación que se va a utilizar en la obra. Por algún tiempo se

han estado realizando esfuerzos para desarrollar en el laboratorio métodos de ensayo que imiten los tipos más corrientes de equipos de compactación en una forma más real que la que resulta del ensayo Proctor normal.

Estos esfuerzos han conducido a varias modificaciones del procedimiento original. Para el equipo pesado de uso actual, en particular en la construcción de diques de tierra o de playas de estacionamiento y accesos a las pistas para aviones pesados, el ensayo Proctor modificado (ASTM D-1557-58T) suele resultar más apropiado. Varios tipos de compactadores por amasado (Johnson y Sallberg, 1962) conducen a curvas humedad-densidad más realista, pero hasta ahora estos ensayos no tienen una aceptación amplia.

Si el contenido de humedad del suelo en el terreno es mayor que el óptimo, debe permitirse que se seque en el lugar de su almacenamiento, o bien proceder a su desparramo para este efecto. Si dicho contenido es menor, el agua debe agregarse en el propio préstamo o por aspersión antes de iniciar su compactación.

Con un cuidado razonable resulta generalmente posible mantener el contenido de humedad dentro del 2 ó 3 del valor óptimo. Sin embargo, para suelos uniformes no plásticos ligeramente cohesivos se necesita un acercamiento mayor al contenido óptimo de humedad. El peso unitario y el contenido de humedad del suelo se controlan en el terreno por muestreo y ensayo rutinario. Para determinar el peso unitario se excava en el suelo compactado un hoyo que tenga por lo menos un volumen de 150 cm³. y el material excavado se guarda cuidadosamente y se pesa antes que pierda humedad por evaporación.

El volumen del material excavado se puede medir por medio de varios métodos. Uno de los procedimientos más antiguos y más usados consiste en medir el volumen llenando el hoyo con arena seca en estado suelto después que el peso unitario de la arena en este estado se ha establecido previamente. La arena se vuelca desde un recipiente que es pesado antes y después de llenar el hoyo. La tendencia actual, en particular para presas de sierra, es exigir la humectación en préstamo, pues, en general, es esta la única manera de obtener una distribución uniforme de humedad en el material que asegure un producto compactado con características también uniformes.

Raramente la humectación por aspersión en el terraplén arroja resultados similares. De acuerdo con el segundo procedimiento, se coloca un globo de goma debajo de una cubierta horizontal y se lo fuerza por medio de inyección de agua a acomodarse a la forma que tiene el hoyo. El volumen del hoyo se determina midiendo el volumen de agua inyectada. Se puede obtener rápidamente un valor aproximado del contenido de humedad determinando la pérdida de peso por secado de la muestra colocada en una bandeja que se calienta con la interposición de una chapa.

De cualquier modo, después de haber adquirido una experiencia moderada en un trabajo dado, un inspector puede normalmente estimar el contenido de humedad con bastante exactitud a través de la apariencia y la textura del material. Si el material que va a ser usado para un terraplén es bastante variable en características, o si el trabajo está situado en una región sujeta a frecuentes lluvias, la exigencia de ajustarse a determinados requerimientos en el contenido de humedad puede aumentar considerablemente el costo de la construcción del terraplén.

El contenido de humedad al cual se compacta un suelo tiene cierto efecto sobre las propiedades físicas del material obtenido, incluyendo la permeabilidad. La experiencia indica que el aumento en contenido inicial de humedad a partir de un valor algo menor que el óptimo hasta alcanzar un valor algo mayor puede causar una gran disminución en el coeficiente de permeabilidad. La disminución parece incrementarse a medida que lo hace el contenido de arcilla del suelo.

Tratándose del material del núcleo del clique Mud Mountain, que contenía hasta 3% de arcilla con un alto contenido de montmorinolita, se observó que un aumento de humedad que variaba del 2 ó por debajo del óptimo al 2% por encima, disminuía el coeficiente de permeabilidad en unas 10.000 veces. Una influencia de esta magnitud es probablemente una rara excepción, pero aun así causan efectos de menor importancia merecen ser considerados.

Como ya vimos en el desarrollo de estos acápite que se explicó la curva de compactación es un instrumento para obtener la densidad máxima y la humedad óptima.

2.8. Compactación de suelos arcillosos.-

Si el contenido natural de humedad de una arcilla en el préstamo no está próximo al óptimo, puede resultar muy difícil llevarlo a dicho valor óptimo sobre todo si el contenido natural de humedad es demasiado alto. Por ello, el contratista puede verse obligado a utilizar la arcilla con un contenido de humedad no muy diferente del que tiene en la naturaleza.

Las excavadoras extraen el material de los préstamos en pedazos o terrones. Ahora bien, un terrón o trozo individual de arcilla no puede compactarse con ninguno de los procedimientos mencionados previamente, pues tanto las vibraciones como las presiones de corta duración solo producen un cambio insignificante en su contenido de humedad.

Los rodillos pata de cabra son, sin embargo, efectivos para reducir el tamaño de los espacios abiertos existentes entre los terrones. Se obtienen los mejores resultados cuando el contenido de humedad es ligeramente superior al límite plástico. Si es mucho mayor, la arcilla tiene tendencia a pegarse al rodillo, o bien este a hundirse en el terreno. Si es mucho menor, los terrones no se deforman y los espacios quedan abiertos.

2.9. Control de compactación.-

La calidad durante un proceso de compactación en campo se mide a partir de un parámetro conocido como grado de compactación, el cual presenta un cierto porcentaje. Su evaluación involucra la determinación previa del peso específico y de la humedad óptima correspondiente a la capa de material ya compactado. Este método es para conocer el grado de compactación, es un método destructivo ya que se basa en determinar el peso específico seco de campo a partir del material extraído de una muestra, la cual se realiza sobre la capa de material ya compactado.

➤ Métodos de control de compactación.-

1. Métodos destructivos:

- Método del Cono y la Arena:

La arena a utilizar en este método tiene que ser pasante del tamiz N° 16 y retenida en el tamiz N° 30. Esta se coloca en el hoyo previamente abierto y se va acomodando con relación de vacíos mínima pudiendo calcularse así el volumen de la muestra. Para ello se coloca encima del orificio una placa con abertura central de 4 ó 6 pulgadas de diámetro y luego un cono doble unido con una válvula y un frasco en uno de sus extremos conteniendo en la arena, esta se deja caer sobre el hoyo midiendo la empleada para llenarlo.

-Método del aceite:

Por este método, la densidad del terreno se determina obteniendo el peso seco de una muestra de suelo y el volumen que ocupaba en el terreno. En este ensayo ó método, dicho volumen se determina midiendo el volumen del aceite que cabe en el hoyo o hueco.

2. Métodos no destructivos.-

Estos permiten la obtención del peso unitario y la humedad del suelo directamente en campo mediante la utilización de radiaciones gamma provenientes de un elemento radioactivo que se encuentra dentro del aparato de medición. Este equipo se conoce como densímetro nuclear y existen tres tipos: 1) Troxles o Densímetro Nuclear, 2) Campbell Pacific Nuclear, 3) Humboldt.

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DE DENSIDAD IN SITU

3.1. Introducción.-

Este importante ensayo se usa con el fin de conocer y controlar la compactación de terraplenes y las diferentes capas para la construcción de carreteras, también se usa para determinar la densidad “*in situ*” y porcentajes de contracción o hinchamiento de los materiales. Los pesos unitarios pueden expresarse en las siguientes unidades: gr/cm^3 , kg/m^3 , lb/pie^3 .

Deben distinguirse dos tipos de peso unitario:

- a) Peso unitario húmedo o densidad húmeda. (P.U.H): Es el peso del material húmedo, en el situ, por unidad de volumen.
- b) Peso unitario seco o densidad seca (P.U.S): Es el peso del material seco por unidad de volumen, en el sitio. Este es el que se trata de determinar en la prueba de densidad de campo y el que se compara con el valor máximo obtenido en la prueba de proctor modificado para obtener el % de compactación.

Dicho ensayo permite obtener la densidad del terreno y así verificar los resultados obtenidos de la compactación de suelos, en las que existen especificaciones en cuanto a la humedad y la densidad. También se puede determinar la densidad de campo por diferentes métodos, mostrando aproximadamente resultados similares, variando únicamente la forma de determinar el volumen. Teniendo en cuenta que el éxito de una buena compactación en la construcción de carreteras, dependerá de la buena ejecución de las siguientes operaciones:

- a) La compactación adecuada y cuidadosamente del material.
- b) Ejecución y determinación correcta de la densidad máxima y húmeda óptima del material (proctor).

- c) Control, en cada capa, de la densidad alcanzada en el terreno por medio de repetidas pruebas de laboratorio, a fin de comprobar si el material utilizado ha sido perfectamente compactado.

La calidad durante un proceso de compactación en campo se mide a partir de un parámetro conocido como grado de compactación, el cual presenta un cierto porcentaje. Su evaluación involucra la determinación previa del peso específico y de la humedad óptima correspondiente a la capa de material ya compactado. Este método es para conocer el grado de compactación, es un método destructivo ya que se basa en determinar el peso específico seco de campo a partir del material extraído de una muestra, la cual se realiza sobre la capa de material ya compactado.

El método del cono de arena fue utilizado primeramente por el cuerpo de ingenieros de USA. y acogido por las normas A.S.T.M. y A.A.S.T.H.O.

Un suelo natural o compactado requiere la determinación de la densidad in situ. En la mayoría de los proyectos, esta verificación se logra con el cono de arena o por el densímetro nuclear.

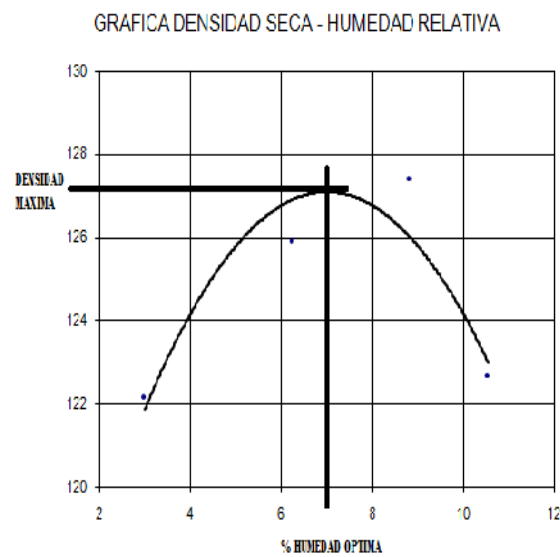
3.2. Influencia de la humedad en la densidad del suelo.-

La influencia que tiene la humedad o contenido de agua respecto de la densidad del suelo es que esta juega un rol muy importante ya que de ella depende el C.H.O. ó contenido de humedad óptimo en cuyo valor se encuentra la densidad máxima, como se puede observar en la figura 1.

La relación entre humedad y densidad para un suelo compactado juega un papel muy importante en las propiedades del mismo, especialmente en cuanto a su resistencia y deformabilidad. Así se tienen los ensayos Proctor T-99 (estándar) y T-180 (modificado) que permiten determinar la humedad óptima, es decir la humedad a la que el suelo alcanza su densidad máxima y por lo tanto presenta sus mejores propiedades mecánicas. El valor de esta humedad óptima depende de la energía de compactación brindada al suelo, y en caso de incrementarse ésta, la humedad óptima será menor y la densidad seca mayor.

Sin embargo los valores resultado de la aplicación de los métodos pueden variar, esto se debe a que en el caso del Cono de Arena la lectura no es directa, sino que se debe tomar las muestras y luego proceder a calcular la misma en el laboratorio transcurso en el cual puede alterarse las condiciones iniciales de toma de muestra; en cambio en el método del densímetro la medida es directa.

Figura 1.- Curva Densidad vs. Humedad



3.3. Método de determinación.-

Los métodos de determinación más conocidos son los métodos del Cono de Arena y del Densímetro Nuclear.

Los métodos de determinación más conocidos son los métodos del Cono de Arena, el Densímetro Nuclear.

Este método es el más utilizado en la actualidad, a partir de este se pueden tomar como referencia o comparación cuando se utilicen diferentes métodos. Sin embargo en nuestra región en estos últimos cinco años, recién se está introduciendo su uso en la construcción de obras civiles, especialmente en las obras viales, es decir estamos hablando del control de compactación que se efectúa en la construcción de carreteras.

Figura 2.- Realización del Método de la Arena



(a)



(b)

El método de la densidad/humedad nuclear opera bajo el principio “suelos densos absorben más radiación que suelos sueltos”. El medidor nuclear se coloca directamente sobre el suelo a analizar. Los rayos gamma de una fuente radiactiva penetran en el suelo, y según sea el número de vacíos de aire que existan, un número de rayos se reflejan y vuelven a retornar a la superficie.

Estos rayos que se reflejan son registrados en el contador, luego la lectura del contador se compara con los datos en el densímetro nuclear, el cual indica la densidad del suelo en kg/m^3 . Esta densidad se compara con la densidad máxima de una prueba de proctor previamente realizada y se obtiene la densidad relativa del proctor.

El método nuclear ha adquirido popularidad debido a su exactitud y rapidez, los resultados de la prueba se obtienen aproximadamente en 15 segundos, y es de considerar que es una prueba no destructiva.

La calidad durante un proceso de compactación en campo se mide a partir de un parámetro conocido como grado de compactación, el cual presenta un cierto porcentaje. Su evaluación involucra la determinación previa del peso específico y de la humedad

óptima correspondiente a la capa de material ya compactado. Este método es para conocer dicho grado de compactación.

Figura 3.- **Densímetro nuclear Modelo Troxler Serie 34-40**



(a)



(b)

3.4. Método del cono de arena.-

3.4.1. Introducción.-

Es un método destructivo ya que se basa en determinar el peso específico seco de campo a partir del material extraído de una muestra, la cual se realiza sobre la capa de material ya compactado. El método de la arena fue utilizado primeramente por el cuerpo de ingenieros de USA y acogido por las normas A.S.T.M. y A.A.S.T.H.O.

3.4.2. Equipos que se utilizan.-

Aparato de densidad:

Consiste en una válvula cilíndrica de 12,5mm (4") para la capa sub-rasante y 18.75 (6") para la capa sub-base, de abertura con un extremo terminado en forma de embudo y con su otro extremo ajustado a la boca de un recipiente de vidrio o plástico de aproximadamente $3,785\text{cm}^3$ de capacidad. La válvula debe tener topes que permitan fijarla en su posición completamente cerrada o completamente abierta.

Figura 4. Aparato de densidad de campo.



Arena de ensayo:

Especificaciones Técnicas:

Comúnmente llamada Arena de Ottawa, en nuestro caso se utilizó arena de la localidad del Saire, está compuesta por partículas sanas, redondeadas, no cementadas y comprendidas entre 1 y 2mm. de diámetro, pasa por el tamiz N° 30(0.60mm). Debe estar lavada y seca en estufa a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$. Para elegir la arena deben efectuarse previamente cinco determinaciones de su densidad aparente empleando la misma muestra representativa. Para su aceptación los resultados de dichas determinaciones deben tener una variación menor que el 1% entre sí. Para el análisis aplicado en el estudio se utilizó una arena con una densidad de $1.35\text{gr}/\text{cm}^3$.

Figura 5. Arena calibrada de Ottawa (de la localidad “el Saire”)



Tamiz No. 3/4", 16" y 30

Certificado ATM U.S.A. de 8" de diámetro de bronce con malla de acero inoxidable (según norma ASTM E-11)

Figura 6. **Tamiz Metálico**



Placa base de metal con agujero circular al centro.-

Bandeja de metal, con un agujero en el centro sobre la cual se encontrará el picnómetro (Cono de metal y frasco con arena).

Figura 7. **Placa base metálica.**



Figura 8. **Aparato acompañado de Placa base.**



Balanza:

Digital de 12 Kg. De capacidad, de 0.1gr. de precisión.

También se usó una balanza eléctrica de 6 Kg. De capacidad y 0.01gr de precisión.

Figura 9. **Balanza digital**

**Equipo para la determinación de la humedad**

Para obtener o determinar el contenido de humedad se empleó el método estándar (el más recomendable), es decir se utilizó el método del horno que consiste en secar una porción de una muestra de suelo por un periodo de 24 hrs.

Figura 10. **Equipo para el contenido de humedad.**

**3.4.3. Herramientas y accesorios.-**

Las herramientas y accesorios que se utilizan, para la realización de este ensayo se detallan a continuación:

Pico, cincel, martillo, clavos, brochas, taras metálicas (en la cual se coloca la

muestra extraída y la arena de Ottawa), cuchara metálica para cavar la perforación de ensayo, cinta métrica, libreta de apuntes, etc.

Figura 11. **Herramientas y accesorios utilizados para la realización del método de la arena**



3.4.4. Procedimiento.-

1. En un área cuadrada de aproximadamente unos 50cm ó 60cm, se elimina todo el material suelto (basura u otro material), con la ayuda de una brocha, luego se aplana ligeramente el terreno a analizar para acomodar la placa base en posición firme y nivelada, para lo cual se utilizan varios clavos, los cuales sujetan dicha placa.

Figura 12. **Colocación de la placa base**



2. Con la ayuda de la balanza se pesa el picnómetro (Válvula y recipiente plástico), a lo cual llamaremos peso 1.

Figura 13. **Peso del aparato.**



3. Colocada la placa base, se marca bien su posición y se coloca el picnómetro lleno de arena; se abre la válvula hasta que no pase mas arena, se retira y se pesa de nuevo el picnómetro, teniendo así el peso 2.

Figura 14. **Colocación del aparato sobre la placa base**



4. Con el uso del cincel y el martillo se procede a realizar la excavación de igual diámetro que la placa base y una profundidad de aproximadamente 15cms (4 a 6plg), teniendo en cuenta que la excavación debe ser uniforme teniendo el mismo diámetro y profundidad en toda su envergadura.

Figura 15. **Excavación del agujero**



5. Se extrae el material con la ayuda de la cuchara metálica y se deposita en la tara metálica luego de pasarlo por el tamiz No. 3/4, en donde se separará el material que pasa con el que no, el cual posteriormente se regresará al agujero. Luego de separar el material, el que se encuentra en la tara es pesado, teniendo así el “peso neto húmedo del material excavado”.

Figura 16. **Material que pasa el tamiz No. 3/4"**



6. Con la cinta métrica se va comprobando la profundidad de la excavación. Una vez realizada la excavación se coloca el picnómetro y se abre la válvula dejando fluir la arena hasta que pare totalmente, para tener el valor de la arena remanente, para luego pesarlo nuevamente. Este será nuestro peso 3.

Figura 17. **Aparato sobre agujero**



7. Luego de recoger la mayor cantidad de arena de Ottawa (sin impurezas), se utiliza el equipo para determinar la humedad, para ello se recoge el material (suelo) dentro de una bolsa de nylon para luego proceder a pesar y dejar secar en el horno por 24 horas, de manera que luego de pesar el material seco se pueda determinar la humedad del suelo dividiendo el peso del agua; que es el resultado de la diferencia de los dos pesos (húmedo-seco), el peso del suelo seco multiplicando por 100, para tener la humedad en porcentaje.

Figura 18. **Determinación del % de humedad**



8. Determinar el peso de la arena en el cono "Pc", restando el peso inicial del picnómetro con arena "peso 1 y peso 2", que es el peso después de haberse colocado y abierto la válvula antes de excavar el agujero. De esta diferencia resulta el peso de la arena en el cono del picnómetro, de la siguiente manera:

$$Pc = \text{Peso1} - \text{Peso2}$$

9. Determinar el peso de la arena en el cono "Pc+ag", restando el segundo peso "peso 2 y peso 3", éste es el efectuado después de vaciar el picnómetro con el agujero ya realizado, es decir:

$$Pc + ag = \text{Peso2} - \text{Peso3}$$

10. Determinar el peso de la arena en el agujero "Pa", restando el peso de la arena en el cono + agujero "Pc+ag" y el peso de la arena en el cono "Pc" es decir:

$$Pa = (Pc + ag) - Pc$$

$$Pa = (\text{Peso2} - \text{Peso3}) - (\text{Peso1} - \text{Peso2})$$

11. Determinar el volumen del agujero, dividiendo el peso de la arena en el agujero "Pa" entre el peso unitario de la arena calibrada de Ottawa, de la siguiente manera:

$$= (\quad) / (\quad - \quad - \quad)$$

12. Determinar el porcentaje de compactación (%C)

$$h = (\quad - \quad - \quad) /$$

$$\frac{\quad}{\%} * 100$$

$$\% = \frac{\quad}{\quad} * 100$$

NOTA: Se debe tomar en cuenta que al momento de la caída de la arena de Ottawa, debe ser de modo que intervenga solamente la fuerza de gravedad, y no otro factor externo que afecte a la caída de la misma. Así mismo, tomar en consideración que al momento del realizar el ensayo este se debe efectuar con un solo picnómetro, ya que de lo contrario se variará la cantidad inicial de arena que se registró en la determinación de los pesos obtenidos.

Como una guía, las normas ASTM sugieren los siguientes criterios para seleccionar el volumen del agujero y tamaño de la muestra para contenido de humedad, con el fin de

obtener resultados razonables en el ensayo.

Tabla 5. **Criterios para seleccionar el volumen del agujero**

| CRITERIOS PARA SELECCIONAR EL VOLUMEN | | |
|--|--|---|
| TAMAÑO MÁXIMO EN EL SUELO SEGÚN | VOLUMEN DEL AGUJERO PARA EL ENSAYO (cm³) | TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA CONTENIDO DE HUMEDAD (g) |
| No. 4 (4.75mm) | 700 | 100 |
| 1/2plg (12.5mm) | 1400 | 250 |
| 1plg (25.0mm) | 2,100 | 500 |
| 2plg(50.0mm) | 2,800 | 1,000 |

Fuente: Tesis-Ventajas y desventajas de la utilización del método de la arena y el densímetro nuclear en la determinación de la densidad de campo, Guatemala.

3.4.5. Ventajas y Desventajas del ensayo.-

En la siguiente tabla se puede observar de manera más completa el análisis de las ventajas y desventajas de este método:

Tabla 6. **Ventajas y desventajas método de la arena**

| MÉTODO DE CONO DE ARENA | |
|---|---|
| Equipo menos costoso. | Mayor intervención del factor humano. |
| Su utilización es más versátil y factible. | Mayor lentitud para su desarrollo. |
| Su procedimiento y medición es de fácil aprendizaje y simple de utilizar. | El equipo requiere de una calibración constante. |
| No se requiere de un técnico especialista, el cual posea una licencia de uso. | Es un método destructivo. |
| No se ve afectado sin importar cuánto tiempo tiene de estar compactado el material. | No se puede desarrollar si interviene la lluvia. |
| | La equivocación en pesados cálculos conduce a resultados absurdos. |
| | Si existe un exceso de humedad, la arena de Ottawa se esponja, adquiriendo una densidad |

| | |
|--|--|
| | impredecible. |
| | La suciedad de la arena de Ottawa, lleva a obtener resultados incorrectos. |

Fuente: Tesis-Ventajas y desventajas de la utilización del método de la arena y el densímetro nuclear en la determinación de la densidad de campo, Guatemala.

3.5. Método del densímetro nuclear.-

3.5.1. Introducción.-

Con el paso de los años la tecnología ha avanzado en forma significativa en todas las áreas por lo que el hombre ha tenido exigencias mayores a la hora de realizar su trabajo, teniendo que incorporar la tecnología a sus labores ocupacionales.

Estos últimos años el área de la construcción, se ha desarrollado de forma considerable, basta con solo ver los grandes edificios y autopistas que se han construido en estos últimos 25 años.

Es por estas razones que a la hora de construir hay que considerar distintos aspectos como materiales, resistencia de estos, calidad etc.

Pero lo más importante es saber el estado de la superficie sobre la cual se quiere construir de acuerdo al uso que se le va a dar y la forma más confiable es a través de un **densímetro nuclear**.

Es un aparato muy confiable de medición pero es altamente radiactivo por lo que su manipulación es muy riesgosa.

Los medidores nucleares de densidad son ahora usados con frecuencia para determinar el peso específico compactado del suelo. Los densímetros nucleares operan en agujeros taladrados o desde la superficie del terreno. El instrumento mide el peso de suelo húmedo por volumen unitario y también el peso del agua presente en un volumen unitario de suelo. El peso específico seco de suelo compactado se determina restando el peso del agua del peso específico húmedo del suelo.

3.5.2. Características.-

El densímetro nuclear es un equipo electrónico de medición capaz de determinar rápidamente y con precisión el porcentaje de humedad y la densidad de suelos o agregados y asfalto, directamente en el sitio, sin tener que recurrir al laboratorio, lo que conllevaría a mayor tiempo de espera, que en la mayoría de los casos no se cuenta, por la celeridad de las obras.

La determinación de la densidad total o densidad húmeda a través de este método, está basada 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.

Como el número de electrones presente por unidad de volumen de suelo es proporcional a la densidad de éste, es posible correlacionar el número relativo de rayos gamma dispersos con el número de rayos detectados por unidad de tiempo, el cual es inversamente proporcional a la densidad húmeda del material. 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.

Para la elaboración de este informe se utilizó un densímetro nuclear el cual cumple con las siguientes características:

Tabla 7. Características Generales y especificaciones del densímetro troxler 3440

| | |
|---------------------------------------|--|
| Nombre: | Densímetro Nuclear |
| Modelo: | Troxler, Troxler Electronic Laboratories Inc. |
| Serie No.: | 34-40 |
| Color: | Amarillo con gris |
| Medidas de densidad y humedad: | kg/m ³ ó g/cm ³ y porcentaje |
| Valor aproximado: | 18000 \$ |
| Peso aproximado: | 13,2 kilogramos ≈ 29 libras |
| Funcionamiento: | Baterías recargables NICAD o baterías |

| | |
|---|---|
| | alcalinas de relevo. |
| Tiempo de Calibración: | 240 segundos \approx 4 minutos |
| Almacenamiento de datos | Hasta 450 registros de ensayos pueden ser almacenados y transferidos a una computadora o impresora. El software "Roadreader DMS" se incluye con el densímetro nuclear, para el análisis y reporte vía computadora personal. |
| Indexado automatizado | Elimina la fuente de error humano en la programación de la profundidad del ensayo. Determina automáticamente la profundidad de la medición. |
| Funciones especiales (30) | Por ejemplo: Auto verificación y programas de servicio; selección de precisión. |
| Especificaciones: | |
| Especificaciones de calibración | |
| Exactitud para estándares de densidad (%) | +/- 0.2 |
| Exactitud para estándares de humedad (%) | +/- 2.0 |
| Rango de calibración Densidad | 70 a 170 pcf (1000 a 2700 kg/m ³) |
| Humedad | 0 a 40 pcf (0 a 640 kg.m ³) |
| Especificaciones radiológicas | |
| Fuente gamma | 8 mCi +/- 10 % Cs-137 |
| Fuente de neutrones | 60 μ Ci +/- 10 % Cf-252 o 40 mCi +/- 10 % Am-241: Be |
| Cubierta de fuente | Encapsulado en acero inoxidable |
| Aislamiento de fuente | Tungsteno, plomo y cadmio |
| Dosis en superficie | 20.5 mrem / h máximo, neutrones y partículas gamma |

| | |
|---|---------------------------|
| Material de barra de penetración | Acero inoxidable |
| Baúl de transporte | DOT 7A, Tipo A |
| Especificaciones de comunicación | Puerto serial tipo RS-232 |

Especificaciones eléctricas

| | |
|-------------------------------------|--|
| Exactitud de tiempo y estabilidad | +/- 0.005 %, +/- 0.0002 % /°C |
| Estabilidad de la fuente de energía | +/- 0.01 % / °C |
| Almacenaje de energía | 30 Watt-horas |
| Tiempo de recarga de batería | 14 a 16 horas (corte automático) |
| Cargador. | 110 / 220 VAC, 50-60 Hz, o 12-14VDC |
| Pantalla de despliegue de datos. | 4 x 16, alfa numérica de cristal Líquido. |

Especificaciones mecánicas

| | |
|---------------------------------|---|
| Baúl de transporte | Plástico para alto impacto; 29.5 de largo, 14 de ancho, 17 de alto |
| Prueba de vibración | 0.1 in (2.5 mm) a 12.5 Hz |
| Prueba de caída | 300 mm con esfera de acero de 25 mm de diámetro |
| Temperatura de operación | Ambiente: 14 a 158°F (-10 a 70°C) |
| Superficie de almacenamiento | 350°F (175°C) Temperatura -70 a 185°F (-55 a 85°C) |
| Tamaño del dispositivo | 14.8 x 9.1 x 7.2 in. |

Fuente: Manual del Usuario del densímetro nuclear. Troxler Electronic Laboratories y su filial Troxler International, Ltd.

Figura 19. **Densímetro Nuclear**

(a)



(b)



(c)



(d).

El densímetro nuclear Troxler modelo 34-40 es capaz de determinar rápidamente y con precisión la humedad y la densidad de suelos, bases, agregados (áridos), hormigón y asfalto (hormigón asfáltico), sin tener que recurrir a métodos de intervención física, como puede ser el caso con la extracción de testigos.

Teniendo en cuenta que para la obtención del porcentaje de compactación (%) y el contenido de humedad (%) en el suelo, únicamente se ingresa la densidad seca óptima obtenida del ensayo de proctor realizado previamente en laboratorio.

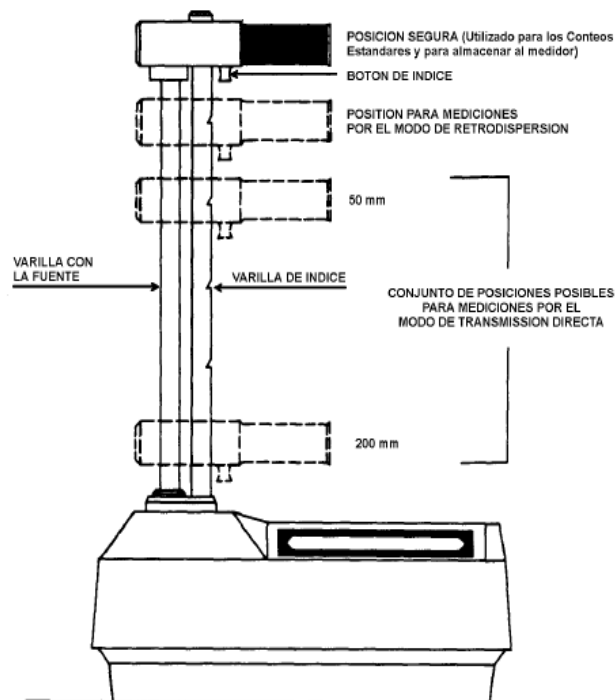
El medidor Troxler modelo 3440 está diseñado para medir el contenido de humedad,

densidad y compactación de suelos, agregados de piedra, bases tratadas con cemento, asfalto y superficies asfálticas. Así como también de otros materiales con rangos de aproximadamente similares de densidad y/o contenido de humedad.

Para la construcción del medidor de densidad-humedad modelo 3440, se han utilizado los últimos diseños de ingeniería y técnicas manufactureras, así como más de 30 años de experiencia en la industria del medidor industrial. El resultado de este esfuerzo es lo último en medidores de humedad-densidad.

El Troxler Modelo 3440 utiliza dos modos de operación (medición en superficie y Transmisión Directa), es capaz de almacenar hasta 450 lecturas. El medidor también proporciona hasta 30 funciones especiales y una precisión seleccionable por el operador para todas las fases de ensayo de materiales de construcción. La pantalla (LCD) y el tablero son de fácil uso, asegurando resultados rápidos y precisos de sus medidas.

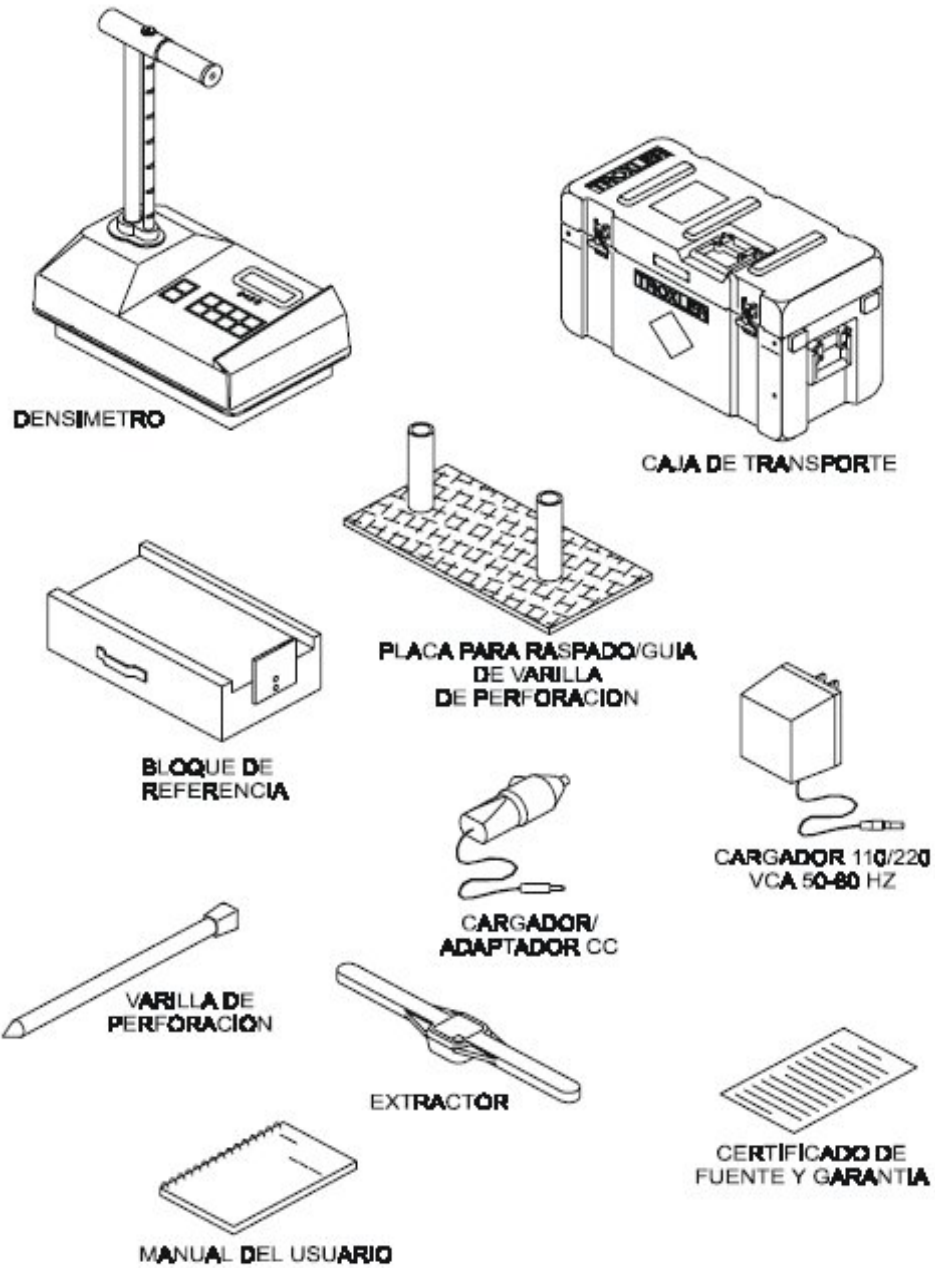
Figura 20. **Perfil del Densímetro Nuclear**



Fuente: Manual del Usuario del densímetro nuclear. Troxler Electronic Laboratories y su filial Troxler International, Ltd.

3.5.3. Partes y Accesorios.-

Figura 21. Partes y accesorios.



Fuente: Manual del Usuario del densímetro nuclear, Troxler Electronic Laboratories y su filial Troxler International, Ltd.

1. **Densímetro** es un instrumento portátil que contiene todos los módulos electrónicos, bloques (conjuntos) de baterías recargables, detectores y fuentes radiactivas.

2. **Bloque de referencia** proporciona un material que sirve de referencia constante para efectuar los ajustes en la sonda, los cuales son necesarios para compensar la desintegración progresiva de la fuente.
3. **Placa para alisado/guía de la varilla de perforación** se utiliza para preparar el terreno de emplazamiento, o la porción de tierra sobre la cual se va a colocar el equipo, y para guiar la varilla al hacer la perforación.
4. **Varilla de perforación** se utiliza para preparar un orificio cuando se va a efectuar una medición de transmisión directa.
5. **Dos cargadores/adaptadores** se suministran: uno para CC (12 VCC) y otro para CA (115/230 VCA 50/60 Hz.).
6. **Caja para la batería de repuesto** está incluida para uso con baterías alcalinas.
7. **Caja de transporte** es un contenedor diseñado para el transporte de la sonda y sus partes asociadas.
8. **Extractor** es una herramienta para sacar la varilla de perforación del material probado.

3.5.4. Procedimiento.-

1. Se selecciona un lugar de ensayo donde el medidor quede ubicado a más de 150 mm. de distancia de cualquier proyección vertical.
2. El lugar a ensayar, deberá ser removido de todo material suelto y disgregado. El área horizontal será la necesaria para acomodar el medidor, aplanándola hasta dejarla lisa de modo de obtener el máximo contacto entre el medidor y el área a ensayar. El máximo hueco por debajo del medidor no podrá exceder los 3 mm., en

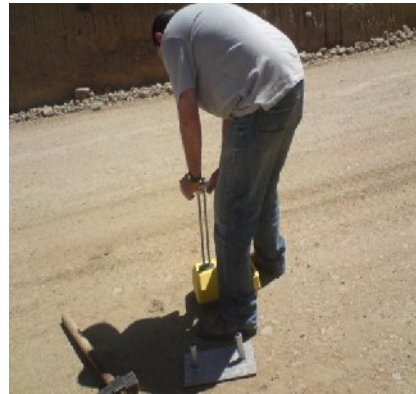
caso contrario, se rellenará con arena fina para emparejar la superficie.

3. Finalmente, se asienta y estabiliza el medidor para tomar una o más lecturas de 15 segundos cada una.

Figura 22. **Medición con el Densímetro Nuclear**



(a)



(b)

3.5.5. Tipos de mediciones.-

Existen varias formas para hacer las determinaciones con el densímetro nuclear, dentro de las cuales se encuentran: transmisión directa, retro-dispersión, colchón de aire, humedad y capa delgada, teniendo la certeza que entregan resultados satisfactorios en espesores aproximados de 50 a 300 mm. Estos métodos son útiles como técnicas rápidas no destructivas siempre y cuando el material bajo ensayo sea homogéneo.

3.5.5.1. Transmisión directa.-

Este tipo de medición es la más riesgosa debido a que la fuente radiactiva sale del aparato. En este modo de operación la fuente gamma se posiciona a una profundidad específica, dentro de la capa del material a evaluar, mediante su inserción a través de un orificio de acceso hecho con la varilla de perforación. Las emisiones gamma son transmitidas a través del material, hacia los detectores, dentro del densímetro. En este tipo de operación minimiza la incertidumbre ocasionada por las superficies rugosas y la

composición química del material evaluado, determinando una elevada exactitud en las mediciones. La transmisión directa es utilizada para la evaluación en capas con espesores de medio a grueso, de suelos, agregados, capas asfálticas losas de concreto hidráulico.

3.5.5.2. Retro-transmisión.-

Es un modo rápido y no destructivo. La fuente de emisiones gamma y los detectores permanecen dentro del densímetro, colocado sobre la superficie del material analizar. Las emisiones gamma penetran en el material evaluado, las emisiones que son recibidas por los detectores son cuantificadas. La retro- dispersión es usada principalmente en capas delgadas, sean asfálticas o losas de concreto hidráulico.

3.5.5.3. Colchón de aire.-

Se diferencia de los métodos anteriores en que el equipo medidor se coloca sobre unos soportes o espaciadores que producen un espacio vacío (colchón de aire) entre la base del medidor y el área de la superficie de terreno a ensayar. Se requiere además tomar una o más lecturas en la posición de retro-dispersión para chequear las mediciones.

3.5.5.4. Humedad.-

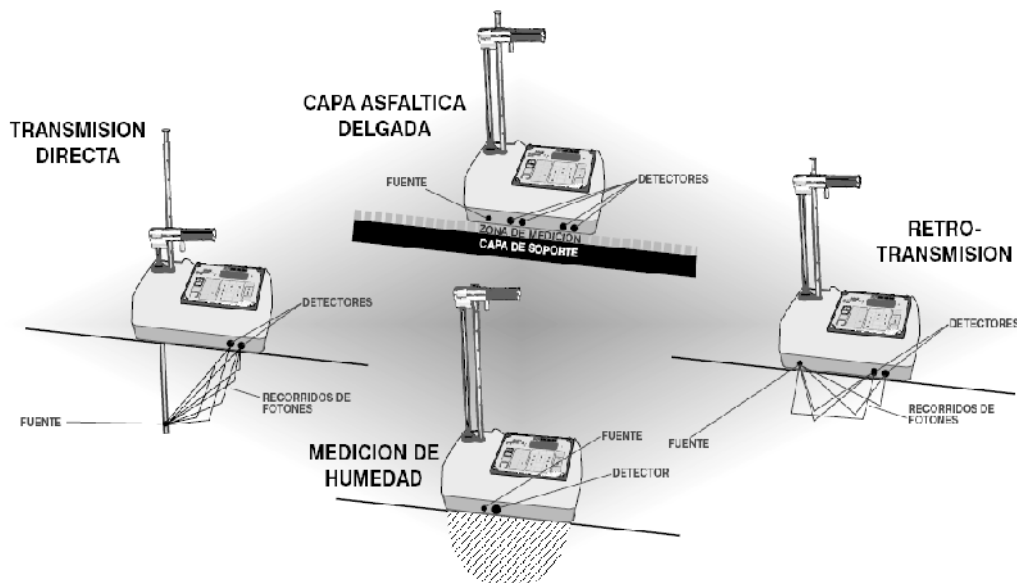
La medición de humedad es un ensayo no destructivo; la fuente de neutrones y el detector permanecen dentro del densímetro, sobre la superficie del material a analizar.

Emisiones de neutrones, a alta velocidad, son introducidas en la capa evaluada y son detenidas parcialmente por sus colisiones contra los átomos de hidrógeno dentro del material. El detector de Helio en el densímetro cuenta la cantidad de neutrones termalizados (con velocidad disminuida); que correlaciona directamente con la cantidad de humedad en el material evaluado.

3.5.5.5. Capa Delgada.-

Este proceso de medición patentado por TROXLER ELECTRONIC INC., permite determinar la densidad de las capas asfálticas y las losas de concreto en espesores de 2.54 a 10.16 cm (1 a 4 pulgadas), sin la influencia de las capas de soporte.

Figura 23. Tipos de mediciones utilizando densímetro nuclear



Fuente: Manual del Usuario del densímetro nuclear. Troxler Electronic Laboratories y su filial Troxler International, Ltd.

3.5.6. Tipos de fuentes radioactivas.-

Americio 241: Usado para medir la HUMEDAD

Periodo de semidesintegración: 432 años

Radiotoxicidad: Muy alta

Cesio 137: Usado para medir la DENSIDAD

Período de semidesintegración: 30 años

Radiotoxicidad: Alta

Dentro del densímetro las fuentes van selladas y encapsuladas (soldadas) en acero inoxidable, para evitar toda fuga del material radiactivo. Las emisiones de fotones y

neutrones no tienen protección.

Características generales de los densímetros nucleares con fuente de cesio 137 y americio 241.-

| | |
|---------------------------------|--|
| Riesgo: | Alto |
| Usos: | Medidores de compactación, densidad y humedad |
| Precauciones: | Toda manipulación deberá ser realizada evitando el contacto directo. |
| Tasa de dosis a 1 metro: | 3,6 mRem/hora |
| Principales marcas: | Cpn, Portaprobe y Troxler Electronic |

¿Cómo puede afectar el americio?

Dentro del cuerpo, el americio se concentra en los huesos, donde permanece durante mucho tiempo. La radiación emitida por el americio puede alterar el material genético de las células de los huesos y esto puede producir cáncer de los huesos.

¿Cómo puede afectar el cesio?

La exposición a cantidades grandes de cesio radioactivo puede dañar células del cuerpo a causa de la radiación emitida.

3.5.7. Calibración del equipo.-

Curvas de calibración

Estas se establecen determinando la razón de conteo nuclear de cada uno de varios materiales de densidades conocidas, trazando la razón de conteo contra densidad y ajustando una curva a través de los puntos resultantes. El método usado para establecer la curva, es el mismo que se usa para determinar la densidad de campo. La densidad de los materiales usados para establecer la curva (como por ejemplo bloques de granito, aluminio, magnesio, caliza, etc.), deben ser uniformes y variar dentro de un rango de densidades que incluya la del suelo a medir.

Las curvas de calibración deberán chequearse si el equipo está recién adquirido o si

los resultados de los ensayos de rutina se estiman que sean inexactos. Si se utiliza el método del cono de arena para chequear la curva de calibración, se compara el promedio de por lo menos 5 mediciones con el instrumento nuclear y una con el cono de arena en exactamente la misma posición en terreno.

Si la densidad de cada uno de los ensayos de comparación determinados por el cono de arena varía menos de 0,08grs/cc de la densidad determinada por el instrumento nuclear y si el promedio de los ensayos del cono de arena difiere menos de 0,032grs/cc del promedio de las mediciones nucleares, no es necesario hacer ajustes a la curva de calibración.

Por el contrario, si el promedio de las determinaciones de densidad por el cono de arena esta a más de 0,032grs/cc por sobre o bajo del promedio de las mediciones nucleares, los ensayos siguientes deben ser ajustados en el monto de la diferencia de los promedios, trazando así una curva de calibración corregida, que será paralela a la original.

➤ **Precisión (P).-**

La precisión del sistema está determinada por la gradiente de la curva de calibración y la desviación estándar de los rayos gamma detectados en cuentas por minuto (CPM), mediante la siguiente expresión:

$$= \frac{S}{m}$$

Donde:

S = desviación normal (CPM)

m = gradiente (CPM/kgs/m³)

➤ **Normalización.-**

Se determina la pendiente de la curva de calibración en el punto 1760kgs/m³ en CPM por kgs. por m³. Luego se determina la desviación normal de 10 lecturas

repetitivas de 1 minuto, cada una tomadas en un mismo punto, en un material que tenga una densidad de $1760 \pm 80\text{kgs/m}^3$. Si el valor resultante (P) es menor que 20kgs/m^3 , el equipo se considerará en estado óptimo.

Cada día de uso y cuando las medidas de los ensayos sean dudosas, se chequeará la operación del equipo con un patrón de referencia provisto con cada medidor.

Luego de emplear un tiempo de estabilización para el equipo de acuerdo a las instrucciones del fabricante, se realizan por lo menos 4 lecturas repetitivas de 1 minuto cada una sobre el patrón de referencia. Los límites de aceptación están dados por la expresión:

$$N_s = N_o \pm 1.96 N_c$$

Donde:

N_s = cuenta medida al chequear la operación sobre el patrón de referencia

N_o = cuenta establecida previamente en el patrón de referencia (promedio de 10 lecturas)

1. Si la media de las lecturas repetitivas esta fuera de los límites de aceptación, se repite el chequeo.
2. Si el segundo chequeo cumple con los límites de aceptación, el equipo se considerará en condiciones satisfactorias.
3. Si el segundo chequeo no cumple con los límites establecidos, deberá chequearse la curva de calibración.
4. Si el chequeo de la curva de calibración muestra que no hay cambios significativos en ella, el equipo se considerará en condiciones satisfactorias.

5. Si el chequeo de la curva de calibración muestra que hay diferencias significativas, se procederá a reparar y se procederá a reparar y re calibrar el instrumento.

➤ **Operadores y operación correcta con densímetro nuclear.-**

El operador, es la persona que está debidamente autorizada por la autoridad competente para poder manejar el equipo, en este caso para la república de Bolivia, es el Ministerio de Energía y Minas.

Debido al gran efecto en la salud que conlleva la utilización del densímetro nuclear se han establecido varios artículos los cuales tienen por objetivos poner como primer plano la salud del operario. Dentro de los cuales se encuentran:

1. Toda persona que a causa u ocasión de su trabajo este expuesta a radiaciones deberá contar con un dosímetro personal (Presilla del cinturón, lado derecho), destinado a detectar y registrar las radiaciones ionizantes, los cuales serán proporcionados por la empresa.
2. Será obligación del empleador remitir trimestralmente al Instituto de Salud Pública para el registro de las dosis recibidas en este período en el historial de dichos dosímetros.
3. Cuando los operadores no estén utilizando los dosímetros, deberán guardarlo en el primer cajón del escritorio y con llave, asegurándose de que no esté expuesto a la radiación.
4. En ningún caso el operador debe usar un dosímetro asignado a otra persona o prestar el suyo.

5. En el caso que un operador pierda su dosímetro, deberá comunicarlo a su superior de inmediato.
6. Los dosímetros deben ser utilizados por los operadores exclusivamente durante el desarrollo de las actividades que lo requieran, quedando prohibido exponer deliberadamente estos a radiaciones.

➤ **Operación correcta con densímetro nuclear en terreno.-**

1. Antes de proceder a la operación, con el equipo radiactivo, se demarcará el área de trabajo con conos, letreros y el símbolo relacionado con el riesgo de la radiactividad.
2. Solo el operador “autorizado” manipulará el equipo, permaneciendo en las proximidades sólo el personal autorizado y restringiendo el ingreso de personal ajeno a la operación.
3. Primero se perforará y marcará el suelo y el perímetro de la placa de raspado para que, posteriormente, el operador baje el vástago procediendo a medir.
4. Nunca debe bajarse el vástago sin que el equipo esté completamente apoyado en el suelo y ubicado en la perforación.
5. No se trabajará en zonas de vehículos o maquinarias en movimiento, coordinando los trabajos con la supervisión a fin de determinar, previamente, los accesos, rutas de circulación, zonas de medición y horarios.
6. Verificar que las vías de circulación en el área de operación estén expeditas.
7. Una vez finalizada la tarea se procederá a guardar y mantener en su caja de

transporte, el equipo, retirar la señalización en el terreno.

3.5.8. Almacenamiento y transporte.-

Para el respectivo cuidado y manejo del densímetro nuclear se deben seguir ciertas normas y reglas las cuales ayudarán a que el equipo se encuentre siempre en perfecto estado. Para ello se enumeran ciertas recomendaciones las cuales deberán ser acatadas minuciosamente:

➤ Almacenamiento.-

1. La bodega en que se almacene el equipo estará construido con un material sólido que asegure el control de la radiación al exterior.
2. En caso que la bodega se ubique en una obra provisoria y, por tanto, los materiales requeridos para la construcción del recinto no se ajusten a lo señalado anteriormente, se deberá construir un recinto en hormigón y/o albañilería, previsto de un marco con una tapa metálica de protección con un sistema de cierre con porta candado, que lo asegure de terceras personas. Esta bodega puede estar ubicada al interior de otra construcción que puede ser de material liviano, pero deberá contar con un acceso independiente y exclusivo.
3. Debe estar a lo menos cinco metros de los lugares de trabajo, permanecer cerrada, limpia, despejada y libre de humedad.
4. Debe estar señalizada e identificada con letreros alusivos (En la puerta de acceso y los cuatro costados de la bodega) que indiquen “Precaución Material Radioactivo solo personal autorizado”, incluyendo el nombre y teléfono de la persona encargada de seguridad radiológica.
5. Para el caso de equipos portátiles de uso en obras viales, cuando estos no sean ocupados, se guardarán dentro de este tipo de bodega y al interior de una

caja metálica de fierro, la cual será destinada única y exclusivamente a contener estos equipos. Esta caja, estará provista de candados de seguridad y será en lo posible anclada al piso o pared de la bodega.

6. Los medidores se guardarán en todo evento, dentro de su contenedor original.
7. Deberá mantenerse un registro que indique en todo momento donde se encuentran los equipos y la persona responsable del mismo.
8. Deberán contar con un plan de emergencia que contemple como mínimo, acciones en casos de accidentes, perdidas y/o robos.
9. Debe controlarse el ingreso, solo para el personal autorizado.
10. La bodega de almacenamiento será de uso exclusivo para el densímetro, no deberá contener otros equipos, materiales o herramientas.
11. La bodega de almacenamiento debe cumplir con todas las disposiciones legales establecidas y estar debidamente autorizadas por el Ministerio de Energía y Minas de Bolivia.

➤ **Transporte**

1. El transporte de los densímetros nucleares debe ser realizado por personas autorizadas.
2. Se debe acompañar en todo momento de traslado, copia de las correspondientes autorizaciones.
3. Antes de cargar el densímetro nuclear, el responsable del transporte deberá, verificar las condiciones en que se encuentra e informar inmediatamente alguna

anomalía si la hubiere, así como si cuenta con la autorización correspondiente del Servicio de Salud para su uso y transporte.

4. El densímetro nuclear no debe ser transportado en la cabina.
5. Antes de iniciar la marcha el conductor deberá preocuparse que el equipo está debidamente sujeto para evitar cualquier daño o hurto.
6. Nunca se debe dejar el vehículo de transporte con el densímetro en su interior si una persona que lo custodie.
7. Dentro de la caja colocar una hoja con el procedimiento de emergencia en caso de robo o pérdida del equipo. (Nombre de la empresa, teléfonos de emergencia, dirección).
8. Llevar una bitácora de registro con los datos de las salidas e ingresos desde el lugar de almacenamiento del equipo, día, hora, lugar de trabajo y faena, además de indicar el nombre del operador responsable.

3.5.9 Procedimiento de emergencia.-

Cuando un densímetro nuclear sufra por cualquier motivo algún deterioro, el encargado deberá:

1. Cercar el área donde esté el equipo dañado a lo menos cinco metros.
2. Comunicar inmediatamente a Prevención de Riesgos.
3. El departamento de Prevención de Riesgos, hará un informe y comunicará a la autoridad competente, con el fin de que éste envíe una persona a evaluar si es que existe radiación.
4. La autoridad competente (Ministerio de Energía y Minas de Bolivia) indicará los pasos a seguir, las que deberán ser cumplidas rigurosamente.
5. Una vez recibidas las recomendaciones por parte de la autoridad competente (Ministerio de Energía y Minas de Bolivia), el departamento de Prevención de

Riesgos deberá:

- i. Solicitar autorización al Servicio de Salud, para almacenar en forma provisoria el equipo dañado.
- ii. Contactar a la Comisión de Energía Nuclear, para la disposición final del equipo, solicitando:
 - a. Identificación del vehículo que lo transportará.
 - b. Nombre del Conductor del vehículo.
 - c. Permiso para el transporte.
 - d. Nombre del encargado.
 - e. Permiso para la disposición final.

3.5.10. Causas básicas de los accidentes/incidentes con densímetro nuclear.-

***Factores que contribuyen a los accidentes.-**

- Entrenamiento inapropiado en la operación.
- Manual de protección inadecuado o no existe.
- Seguir procedimientos inadecuados con el equipo.
- Defectos del equipo.
- Falta en el uso de medidores de radiación.
- Errores humanos.
- Violaciones voluntarias.

***Falta de entrenamiento.-**

- Los operadores no están calificados para el uso seguro de material radioactivo.
- Los trabajadores relacionados no están informados de la presencia de material radiactivo.
- Los operadores y los trabajadores relacionados no comprenden los procedimientos de emergencia.
- Falta de actualización del entrenamiento y de entrenamiento para nuevos empleados.

***Programa de seguridad.-**

- Falta de compromiso de la gerencia en el programa de seguridad.
- Énfasis en la seguridad, no hay actitud de “prioridad a la seguridad”.
- Falta de recursos para implementar el programa.

***Falla del equipo a utilizar o por no usar un medidor de radiación.-**

- Son usados tipos incorrectos de medidores de radiación.
- Los medidores de radiación no tienen actualizada la calibración o no son calibrados correctamente.
- Entrenamiento inadecuado de los individuos en el uso de los medidores de radiación.

El Prevencionista de Riesgos debe:

- a. Velar por el cumplimiento del procedimiento.
- b. Designar el sitio de almacenamiento de los densímetros.
- c. Aplica el procedimiento de emergencia.

***Procedimiento de seguridad.-**

- Falta de una actitud de “prioridad a la seguridad”.
- Inadecuada supervisión por parte del operador para garantizar que se siguen los procedimientos.
- Falta de entrenamiento necesario en el uso seguro de material radioactivo.

***Límites permisibles de radiación.-**

Tabla 8. Límites permisibles de radiación

| DOSIS MÁXIMA PERMISIBLE PARA PERSONAS OCUPACIONALMENTE EXPUESTAS* | | |
|--|------------------|--------------------|
| 5,000 | mrem | 1 Año |
| 400 | mrem | 1 Mes |
| 100 | mrem | 1 Semana |
| 20 | mrem | 1 Día |
| Fuente: Ventajas | Fuente: Ventajas | Fuente: Ventajas y |

Fuente: Ventajas y Desventajas de la utilización del método de cono de arena y densímetro nuclear en la determinación de la densidad in situ, Guatemala.

*El milirem (la abreviación es mRem) es la unidad utilizada para medir el efecto de la radiación en el cuerpo humano.

3.6. Ventajas y Desventajas del ensayo.-

En la siguiente tabla se puede observar de manera más completa el análisis de las ventajas y desventajas de este método:

Tabla 9. **Ventajas y desventajas utilizando densímetro nuclear**

| DENSÍMETRO NUCLEAR | |
|--|---|
| VENTAJA | DESVENTAJA |
| Equipo sumamente versátil. | Costo del equipo sumamente elevado. |
| Resultados rápidos y de mayor exactitud. | No es factible utilizarlo en obras de pequeña magnitud. |
| Método no destructivo. | Costo de calibración del equipo. |
| Apoyo en la economía de la empresa. | Perjudica la salud del operario. |
| No se ve afectado por el viento al momento de su ensayo. | No se puede desarrollar si interviene la lluvia. |
| Selección del espesor de | No sustentable ambientalmente. |

| | |
|--|---|
| Almacenamiento de datos / compatibilidad con computadora personal. | Se distorsiona la información si el ensayo se realiza en zonas estrechas, angostas o encerradas, debido al rebote de los rayos gamma. |
| | Resultados dependen de muchos factores de error. |
| | Se ve influenciado por vibraciones |

Fuente: Ventajas y Desventajas de la utilización del método de cono de arena y densímetro nuclear en la determinación de la densidad in situ, Guatemala.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1. Ubicación.-

La ubicación del desarrollo del presente estudio se ubica en un Tramo carretero del departamento de Tarija; se sitúa en el Proyecto denominado: Mejoramiento Camino Matadero (Portillo) -Temporal-San Jacinto Norte-San Jacinto Sud-Tablada-San Luis-San Jacinto Oeste, este proyecto consta de 5 Tramos los cuáles son: Tramo 1.-San Luis-Cruce Matadero-Puente Temporal; Tramo 2.- Matadero-Cruce Matadero; Tramo 3.- Puente Temporal-San Jacinto Norte-Exposur; Tramo 4.- San Jacinto Norte-San Jacinto Sud-Exposur y Tramo 5.- San Jacinto Norte-San Blas . El lugar de la aplicación del presente trabajo se efectúa en el tramo número 3, es decir estamos hablando del Tramo Puente Temporal-San Jacinto Norte-Exposur. Es decir que su desarrollo se sitúa en la provincia Cercado, en el departamento de Tarija propiamente dicho:

Figura 24. Ubicación Geográfica del Estudio

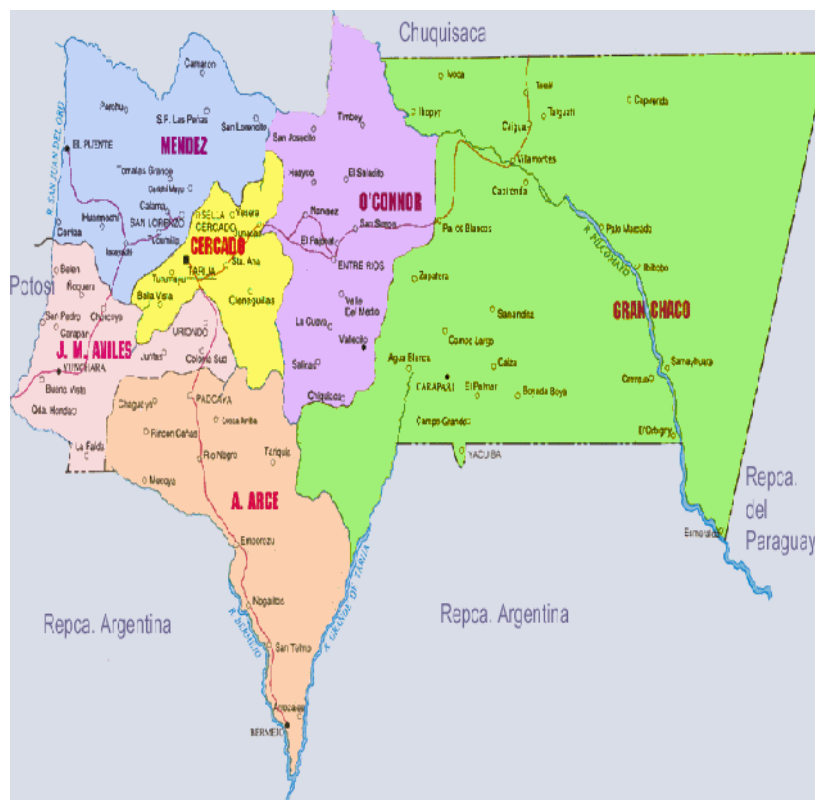
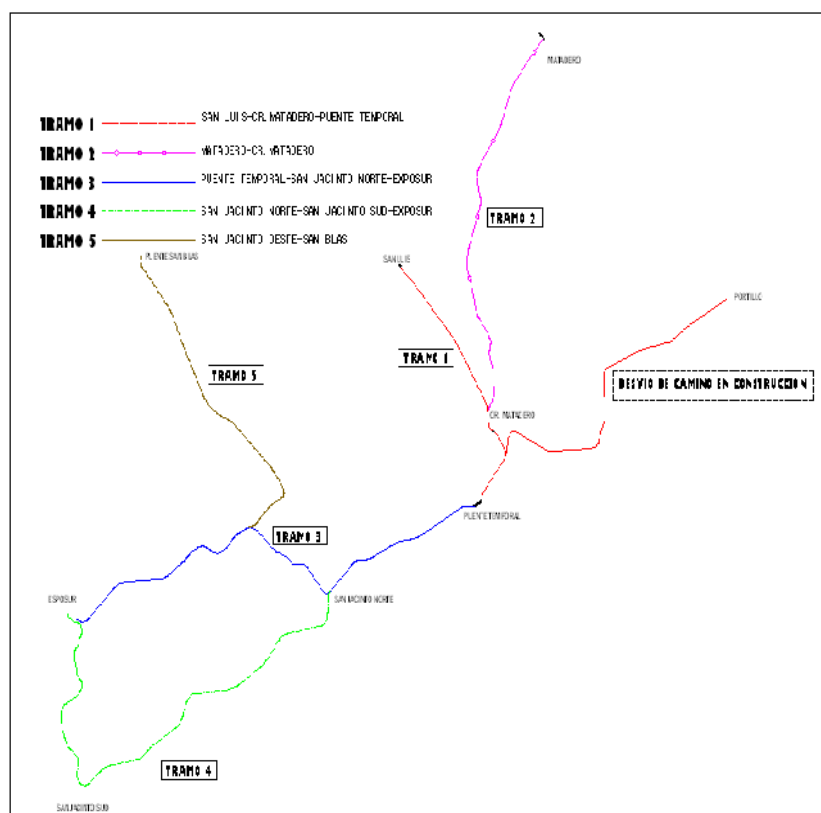


Figura 25. Fotografía del Tramo



Para mayor facilidad se muestra un croquis de ubicación:

Figura 26.
MAPAS REFERENCIALES
Croquis de los Tramos



En la siguiente imagen satelital se observa el lugar de aplicación del estudio, tal como se ve en la figura 27, donde el área marcada de azul es el Tramo analizado y la parte de amarillo es el sector estudiado.

Figura 27. Imagen Satelital del tramo estudiado.



4.2. Características del área de Estudio según el tipo de Suelo.-

Tramo: Puente Temporal-San Jacinto Norte-Exposur.-

Las características de este sitio o área de estudio es que es un tramo alternativo para el tránsito al lago San Jacinto, en cuanto a las características del suelo es que el mismo se trata de una sub-rasante mejorada ó en términos vulgares un “ripiado” y una sub-base de dicho tramo es decir estamos hablando de dos capas de un pavimento flexible, por lo que se trata de un suelo o mezcla bien graduada.

La clasificación del suelo correspondiente a las dos capas del pavimento en construcción es la que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10. Clasificación del suelo aplicado en el estudio.

| Capa | % Pasa Tamiz N° 200 | Límite Líquido | Límite Plástico | Índice Plástico | Clasificación AASTHO | Clasificación SUCS |
|-------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| Sub-rasante | 24.23 | 27.85 | 18.38 | 9.47 | A-2-6(8) | GW-GC |
| Sub-Base | 13.56 | 24.28 | 17.05 | 7.23 | A-2-4(8) | GW-GM |
| - | - | - | - | - | - | - |

Fuente: Propia.

4.3. Compactación mediante Proctor Modificado T-180.-

Se determina la densidad máxima seca de un suelo después de haber aplicado una misma intensidad de compactación para varios contenidos diferentes de humedad.

Para obtener la humedad óptima y la densidad máxima, existen diferentes métodos, los cuales se pueden resumir en dos grupos:

- a) Dinámicos: son aquellos, en los que la energía de compactación se aplica por medio de golpes de pisón (mazo o martillo) dinámicamente (Proctor).
- b) Estáticos: son aquellos métodos en que la energía de compactación es aplicada por medio de presión (prensas hidráulicas).

En nuestro medio, los más usados, son los dinámicos, y para el proceso de obtención la densidad máxima y la humedad óptima el utilizado fue el METODO AASTHO STANDARD T-180 también llamado Proctor modificado.

Este método es utilizado en el laboratorio para determinar la relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco de los suelos compactados en un molde de 101.6 ó 152.4mm (4" ó 6") de diámetro con un martillo de 44.5kN (10lbf) que se deja caer desde una altura de 457mm (18") y produce un esfuerzo de compactación de 2700kNm/m^3 (56000lbpie/pie^3).

El procedimiento utilizado corresponderá con el indicado en la especificación para el material que se ensaya. Si el procedimiento no está especificado, la elección deberá basarse en la gradación del material.

Para su realización hay 4 métodos alternativos:

1. Método A:

Molde de 101.6mm (4") de diámetro con material que pasa el tamiz 4.75mm (No. 4). Compactar en 5 capas de 25 golpes cada una.

2. Método B:

Molde de 152.4mm (6") de diámetro con material que pasa el tamiz 4.75mm (No. 4). Compactar en 5 capas de 56 golpes cada una.

3. Método C:

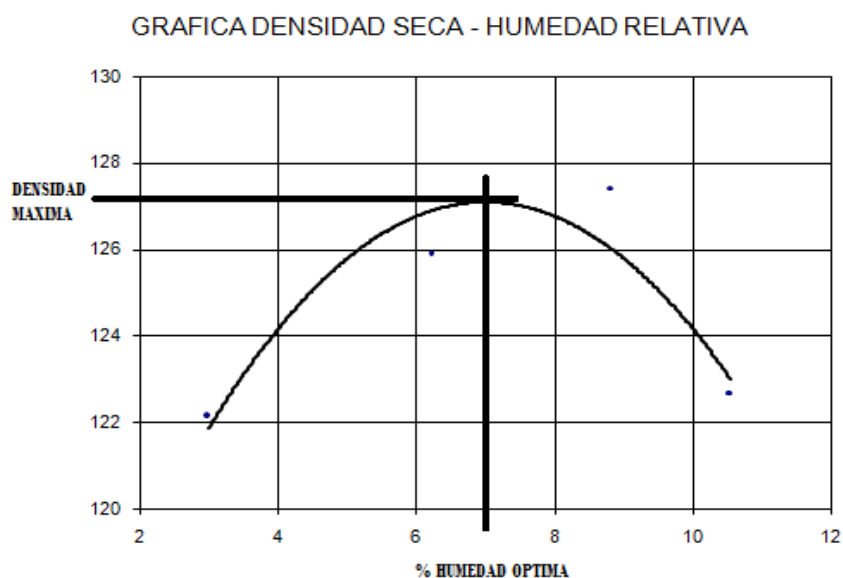
Molde de 101.6mm (4") de diámetro con material que pasa el tamiz 19mm (No. 3/4). Compactar en 5 capas de 25 golpes cada una.

4. Método D:

Molde de 152.4mm (6") de diámetro con material que pasa el tamiz 19mm (No. 3/4). Compactar en 5 capas de 56 golpes cada una.

La compactación debe hacerse en forma uniforme, haciendo caer libremente el martillo y distribuyendo los golpes sobre toda el área.

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua. Además del efecto que tiene el agua en la compactación también intervienen otros factores como el tipo de suelo y el esfuerzo de compactación (energía por volumen unitario).

Figura 28. **Curva de compactación.**

Fuente: Ventajas y Desventajas de la utilización del método de cono de arena y densímetro nuclear en la determinación de la densidad in situ, Guatemala.

Equipo necesario

1. Balanza de 12 Kg. de capacidad y aproximación de 0.01g.
2. Taras metálicas para determinación de la humedad.
3. Molde de compactar, de 4" y 6".
4. Pisón de compactar de 4,54 Kg. de peso y 45.72 cm. de caída.
5. Estufa u horno capaz de mantener una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ o de $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$.
6. Tamices: tamiz N° 4, N° 10 y tamiz de $\frac{3}{4}$ ".
7. Espátula, cucharón de mezclar, cuchara, y otras herramientas para mezclar.
8. Rodillo.

9. Brocha.

10. Regla enrasadora de acero biselada de aproximadamente de 12”.

Figura 29. **Molde y accesorios utilizados para el ensayo Proctor modificado**



Figura 30. **Molde y martillo para la compactación.**



Procedimiento

1. Colocar una muestra de suelo con un contenido de agua seleccionado, en cinco capas, en un molde de las dimensiones dadas.
2. Compactar cada capa de 56 golpes de un martillo de 44.5kN (10lbf), que se deja caer desde una distancia de 457mm (18") dándole al suelo un esfuerzo de compactación total alrededor de $2,700\text{kNm/m}^3$ ($56,000\text{lbpie/pie}^3$).
3. Determinar la densidad máxima seca resultante.
4. El procedimiento se repite para un número suficiente de contenidos de agua para establecer una relación entre el contenido de agua para el suelo y la densidad seca.
5. Al graficar estos datos resulta una relación curvilínea conocida como la curva de compactación.
6. Los valores del contenido óptimo de agua y la densidad máxima seca se determinan de la curva de compactación.

4.3.1. Contenido de humedad.-

Según la norma AASHTO M147-65, todos los materiales deberán tener un contenido de humedad igual o ligeramente menor al óptimo necesario para asegurarse que los requisitos de densidad de diseño son obtenidos cuando los materiales sean compactados.

Según el Instituto del Asfalto, en su manual MS-1, numeral 5.13, especifica que se debe compactar a una humedad de 1.5% más o menos del óptimo para alcanzar una densidad mínima del 100% de la máxima densidad obtenida en ensayo (ASTM D-1557, método D y AASHTO T-180, método D).

Por otro lado, según la Asociación del Cemento Portland (PCA) en su publicación ISO29.028, describe que se debe compactar a un mínimo del 100% de la densidad máxima obtenida en ensayo (AASHTO T-99). Para proyectos de tráfico pesado la densidad especificada no deberá ser menor del 105% de la densidad máxima obtenida en ensayo AASHTO T-99 o del 98% al 100% de la densidad máxima obtenida en el ensayo AASHTO T-180.

El contenido de humedad o más comúnmente la humedad de la muestra de un suelo, es la relación entre el peso de agua contenida en la muestra y el peso de la muestra después de ser secada al horno, expresada como un %.

Este es, sin duda alguna, el ensayo que se efectúa más a menudo en los laboratorios de suelos, pues es necesario para poder efectuar otras pruebas, tales como: el proctor, el CBR, los límites de Atterberg, las densidades de campo, entre otros.

Equipo necesario

1. Balanza con aproximación 0.01g.
2. Horno (105°C a 110°C.)
3. Espátula.
4. Taras para las muestras.

Procedimiento

1. Se pesa la muestra y el recipiente con la ayuda de la balanza. Este peso se registra en la hoja de datos como peso húmedo (Ph).
2. Se coloca el recipiente con la muestra en el horno de manera que esta seque.
3. Cuando ya ha secado la muestra se saca del horno y se deja enfriar hasta que regrese a su temperatura ambiente. Se debe evitar que la muestra absorba la humedad.
4. Se pesa el recipiente con la muestra con una aproximación de 0.01g, y el dato se registra en la hoja de datos como peso seco (Pss.).

5. Si el peso del recipiente no ha sido obtenido anteriormente, se debe limpiar este y obtener su peso. Es recomendable obtener su peso con anterioridad al ensayo para evitar errores. A este peso se le conoce como “Peso de la Tara”.

6. Se calcula el contenido de humedad, de la muestra, usando la siguiente fórmula:

$$(\%) = \frac{Pa}{Pss} * 100$$

Donde:

(%) w=Humedad (en porcentaje)

Pa=Peso del agua presente en el suelo.

Pss=Peso del suelo seco.

Figura 31. **Equipo utilizado para el ensayo de contenido de humedad.**



En las siguientes figuras se muestran las curvas de compactación de las dos capas aplicadas sub-base y base del tramo en cuestión:

Figura. 32. Curva compactación T-180 de la capa Sub-rasante mejorada.

| Muestra: Unica | Volumen: 2112,5 cm ³ | | |
|---|---------------------------------|----------|----------|
| Nº de capas | 5 | 5 | 5 |
| Nº de golpes por capa | 56 | 56 | 56 |
| Peso suelo húmedo + molde | 10716,89 | 10998,36 | 10623,56 |
| Peso del molde | 6510,2 | 6510,2 | 6510,2 |
| Peso suelo húmedo | 4206,69 | 4488,16 | 4113,36 |
| Volumén de la muestra | 2112,5 | 2112,5 | 2112,5 |
| Densidad suelo húmedo (gr/cm ³) | 1,99 | 2,12 | 1,95 |
| Cápsula Nº | 1 | 2 | 3 |
| Peso suelo húmedo + capsula | 81,9 | 95,5 | 72,09 |
| Peso suelo seco + cápsula | 79,00 | 91,43 | 67,46 |
| Peso del agua | 2,9 | 4,07 | 4,63 |
| Peso de la cápsula | 21,21 | 21,08 | 21,34 |
| Peso suelo seco | 57,79 | 70,35 | 46,12 |
| Contenido de humedad (%h) | 5,02 | 5,79 | 10,04 |
| Densidad suelo seco (gr/cm ³) | 1,90 | 2,01 | 1,77 |

$y = -0,04031x^2 + 0,58177x - 0,00810$
 $R^2 = 1,00000$

| | |
|------------------------------------|------|
| Densidad máxima gr/cm ³ | 2,11 |
| Humedad óptima % | 7,22 |

Fuente: Propia.

Figura. 33. Curva compactación T-180 de la capa Sub-base

| Muestra: Unica | Volumen: 2112,5 cm ³ | | |
|---|---------------------------------|----------|----------|
| Nº de capas | 5 | 5 | 5 |
| Nº de golpes por capa | 56 | 56 | 56 |
| Peso suelo húmedo + molde | 10569,23 | 11369,56 | 10563,25 |
| Peso del molde | 6510,2 | 6510,2 | 6510,2 |
| Peso suelo húmedo | 4059,03 | 4859,36 | 4053,05 |
| Volumén de la muestra | 2112,5 | 2112,5 | 2112,5 |
| Densidad suelo húmedo (gr/cm ³) | 1,92 | 2,30 | 1,92 |
| Cápsula Nº | 1 | 2 | 3 |
| Peso suelo húmedo + capsula | 81,01 | 95,36 | 71,2 |
| Peso suelo seco + cápsula | 79,00 | 91,43 | 67,46 |
| Peso del agua | 2,01 | 3,93 | 3,74 |
| Peso de la cápsula | 21,21 | 21,08 | 21,34 |
| Peso suelo seco | 67,79 | 70,35 | 46,12 |
| Contenido de humedad (%h) | 3,48 | 5,59 | 8,11 |
| Densidad suelo seco (gr/cm ³) | 1,86 | 2,18 | 1,77 |

$$y = -0,06752x^2 + 0,76464x + 0,01415$$

$$R^2 = 1,00000$$

| | |
|------------------------------------|------|
| Densidad máxima gr/cm ³ | 2,18 |
| Humedad óptima % | 5,66 |

Fuente: Propia.

4.4. Clasificación del suelo objeto de estudio.-

Como ya se mencionó en el alcance del proyecto el presente estudio se aplicó sobre dos capas de pavimento flexible; a continuación se muestra una tabla donde podemos observar el tipo de suelo de ambas capas, estamos hablando de la capa base y sub-base, cabe añadir que los cálculos detallados se muestran en anexos:

Tabla 11. Clasificación del suelo aplicado

| Capa | % Pasa Tamiz N° 200 | Límite Líquido | Límite Plástico | Índice Plástico | Clasificación AASTHO | Clasificación SUCS |
|-------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| Sub-rasante | 24.23 | 27.85 | 18.38 | 9.47 | A-2-6(8) | GW-GC |
| Sub-Base | 13.56 | 24.28 | 17.05 | 7.23 | A-2-4(8) | GW-GM |
| - | - | - | - | - | - | - |

Fuente: Propia.

Cabe mencionar que las planillas de clasificación del tipo de suelo se muestran en Anexos.

4.5. Ensayos por el Método Cono de Arena.-

4.5.1. Obtención de Datos.-

Es de tomar en cuenta que actualmente no existen especificaciones de parte de las instituciones anteriores respecto al número de ensayos de densidad de campo a efectuar, ni respecto a la distancia mínima entre cada densidad realizada. Solo como una guía, el manual de diseño DM 7.2 del Departamento de la Marina de los Estados Unidos recomienda:

1. Una prueba para cada 500 yardas cubicas de material colocado para la construcción de terraplenes.
2. Una prueba para cada 500 a 1000 yardas cubicas de material para canal y otro relativo a rellenos.

3. Una prueba para cada 100 a 200 yardas cubicas de relleno de zanjas o alrededor de estructuras, dependiendo de la calidad del material.
4. Al menos una prueba para cada turno de trabajo de los laboratoristas.
5. Una prueba si hay una sospecha definitiva de un cambio en la calidad del control de la humedad.

Sin embargo para la realización de este ensayo se efectúo cada 30 metros en rectas y 10 metros en curvas.

4.5.2. Procesamiento de los Datos.-

Para el proceso de cálculo de la densidad in situ; vale decir el grado de compactación y la humedad del suelo en su estado natural se siguió el siguiente proceso:

Datos de laboratorio:

- Densidad de la Arena, resultado de la calibración.
- Peso de arena seca en el embudo (después de la calibración).
- Densidad Máxima y Humedad Óptima procedentes de la compactación.

Datos de Campo:

- Peso del suelo húmedo retirado del hoyo, luego se extrajo unos 100 gramos para el cálculo del contenido o porcentaje de humedad.
- Se calculó el porcentaje de humedad, en %.
- Peso de la arena que queda después del ensayo.

Las fórmulas que se aplicaron fueron las siguientes:

-Porcentaje de humedad:

$$(\%) = \frac{\text{Peso de arena seca}}{\text{Peso de arena húmeda}} * 100$$

-Peso del suelo seco retirado del hoyo:

$$= \frac{\text{Peso de arena húmeda} - \text{Peso de arena seca}}{\text{Peso de arena húmeda}} * 100$$

-Volumen del hoyo:

$$h = \text{_____}$$

-Densidad del suelo:

$$= \text{_____}$$

-Grado de compactación:

$$(\%) = \frac{\text{_____}}{\text{á .}} * 100$$

4.5.3. Resultados.-

Para fines de comprensión aquí sólo se muestra una planilla de resultados del cálculo de la densidad in situ por el método del Cono de Arena (las demás planillas se muestran en anexos):

Figura. 34. Planilla de cálculo de densidad in situ por el método del cono de arena de capa sub-rasante mejorada.

| CALIBRACION DEL APARATO | |
|---|----------|
| A) Peso del aparato más agua | 7384,00 |
| B) Peso del aparato | 1621,00 |
| C) Peso del agua $C=A-B$ | 5763,00 |
| D) Densidad del agua a Temperatura de Ensayo | 1,00 |
| E) Volumen del frasco $E=C/D$ | 5777,21 |
| F) Peso aparato más arena | 9446,00 |
| G) Peso de arena $G=F-B$ | 7825,00 |
| H) Densidad de la arena $H=G/E$ | 1,35 |
| I) Peso del aparato más arena (después de llenar el embudo) | 7991,00 |
| J) Peso de arena seca en el embudo $J=F-I$ | 1455,00 |
| DETERMINACION DEL PESO SECO Y HUMEDAD | |
| 1) Peso de tara más suelo húmedo | 391,25 |
| 2) Peso de tara más suelo seco | 371,20 |
| 3) Peso del agua $W=1-2$ | 20,05 |
| 4) Peso de tara | 136,40 |
| 5) Peso del suelo seco $2-4$ | 234,80 |
| K) Porcentaje de humedad $K=(3/5)*100$ | 8,54 |
| M) Peso del suelo húmedo retirado del hoyo + tara | 7777,00 |
| N) Peso de tara | 280,00 |
| O) Peso de suelo húmedo retirado del hoyo $O= M-N$ | 7497,00 |
| P) Peso de suelo seco retirado del hoyo $P=(O/(100+K))*100$ | 6907,18 |
| DETERMINACION DEL VOLUMEN DEL HOYO | |
| Q) Peso de arena calibrada más aparato | 10397,00 |
| R) Peso de arena que queda después del ensayo | 4449,98 |
| S) Peso de arena necesaria para llenar el hoyo y el embudo $S= Q-R$ | 5947,02 |
| T) Peso de la arena seca en el embudo $T=J$ | 1455,00 |
| U) Peso de arena para llenar el hoyo $U= S-T$ | 4492,02 |
| V) Volúmen del hoyo $V= U/H$ | 3316,47 |
| W) Densidad del suelo $W= P/V$ | 2,08 |
| X) Densidad máxima de la curva de compactación | 2,110 |
| Y) Porcentaje de compactación $W/X*100$ | 98,71 |
| OBSERVACIONES | |
| 1.- Altura de pozo de ensayo es de 15 cm. | |

Fuente: Propia.

Figura. 35. Planilla de cálculo de densidad in situ por el método del cono de arena de capa sub-base.

| CALIBRACION DEL APARATO | | Pto. 1 Der. |
|---|--|--------------------|
| A) Peso del aparato más agua | | 7384,00 |
| B) Peso del aparato | | 1621,00 |
| C) Peso del agua $C=A-B$ | | 5763,00 |
| D) Densidad del agua a Temperatura de Ensayo | | 1,00 |
| E) Volumen del frasco $E=C/D$ | | 5777,21 |
| F) Peso aparato más arena | | 9446,00 |
| G) Peso de arena $G=F-B$ | | 7825,00 |
| H) Densidad de la arena $H=G/E$ | | 1,35 |
| I) Peso del aparato más arena (después de llenar el embudo) | | 7991,00 |
| J) Peso de arena seca en el embudo $J=F-I$ | | 1455,00 |
| DETERMINACION DEL PESO SECO Y HUMEDAD | | |
| 1) Peso de tara más suelo húmedo | | 86,30 |
| 2) Peso de tara más suelo seco | | 83,00 |
| 3) Peso del agua $W=1-2$ | | 3,30 |
| 4) Peso de tara | | 21,40 |
| 5) Peso del suelo seco $2-4$ | | 61,60 |
| K) Porcentaje de humedad $K=(3/5)*100$ | | 5,36 |
| M) Peso del suelo húmedo retirado del hoyo + tara | | 8823,40 |
| N) Peso de tara | | 10,00 |
| O) Peso de suelo húmedo retirado del hoyo $O= M-N$ | | 8813,40 |
| P) Peso de suelo seco retirado del hoyo $P=(O/(100+K))*100$ | | 8365,26 |
| DETERMINACION DEL VOLUMEN DEL HOYO | | |
| Q) Peso de arena calibrada más aparato | | 10006,60 |
| R) Peso de arena que queda después del ensayo | | 3498,36 |
| S) Peso de arena necesaria para llenar el hoyo y el embudo $S= Q-R$ | | 6508,24 |
| T) Peso de la arena seca en el embudo $T=J$ | | 1455,00 |
| U) Peso de arena para llenar el hoyo $U= S-T$ | | 5053,24 |
| V) Volumen del hoyo $V= U/H$ | | 3730,82 |
| W) Densidad del suelo $W= P/V$ | | 2,24 |
| X) Densidad máxima de la curva de compactación | | 2,180 |
| Y) Porcentaje de compactación $W/X*100$ | | 102,85 |
| OBSERVACIONES | | |
| 1.- Altura de pozo de ensayo es de 15 cm. | | |

Fuente: Propia.

4.6. Pruebas empleando el Densímetro Nuclear.-

Para efectos de dicho estudio, al igual que el método del Cono de Arena se efectuó la prueba del densímetro al lado de la efectuada por el método ya mencionado.

Se debe tomar en cuenta que se realizaron 30 mediciones utilizando el densímetro nuclear en cada capa (sub-rasante mejorada y sub-base), es decir, que en total se realizaron 30 ensayos utilizando el método de la arena sobre cada capa, habiendo realizado un total de 60 pruebas utilizando el método de la arena y 30 mediciones con el densímetro nuclear, con una separación entre cada densidad de campo de aproximadamente 40m.

Además es de suma importancia conocer que para la construcción de las sub-bases y bases de la carretera se debe tener una compactación mínima del 95% en el campo y un C.B.R. mayor del 50%, de lo contrario el trabajo será erróneo y de baja calidad.

4.6.1. Resultados de las mediciones.-

Para su comprensión se muestra una planilla de resultados de las mediciones efectuadas por el densímetro nuclear, que son leídas directamente en la pantalla del densímetro Troxler tipo 3440:

Figura 36. Lecturas del Densímetro nuclear de sub-rasante mejorada.

| PROYECTO: ANALISIS COMPARATIVO Y CORRELACION DE DENSIDADES POR LOS METODOS DE CONO DE ARENA Y DENSIMETRO NUCLEAR. PORCEDENCIA:Tramo 3. Pte. Temporal-San Jacinto Norte-Exposur | | | | | | | TRAMO: 3 Sub-Rasante Mejorada FECHA:12/04/2011 | | | |
|--|----------------------|------|--------|--------------|--|--|---|-------------------------------------|----------------|-------------------------------|
| FECHA | CAPA | LADO | ESTACA | PROF. Cm. | DENSIDAD SECA-DD (gr/cm ³) | DENSIDAD HUMEDA-WD (gr/cm ³) | HUMEDAD % | LABORATORIO | | GRADO DE COMPACTACION % |
| | | | | | | | | DENS. MAX. (gr/cm ³) | HUM. OPT. % | |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 3+000 | 20 | 2,05 | 2,215 | 7,96 | 2,11 | 7,22 | 97,24 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje | 2+940 | 20 | 2,03 | 2,173 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 96,10 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Izq. | 2+940 | 20 | 2,07 | 2,213 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 97,87 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje | 2+910 | 20 | 2,07 | 2,219 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 98,14 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 2+880 | 20 | 2,03 | 2,188 | 7,66 | 2,11 | 7,22 | 96,32 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje | 2+850 | 20 | 2,06 | 2,209 | 7,44 | 2,11 | 7,22 | 97,44 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Izq. | 2+820 | 20 | 2,03 | 2,174 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 96,15 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje | 2+790 | 20 | 2,01 | 2,151 | 7,06 | 2,11 | 7,22 | 95,22 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 2+760 | 20 | 2,02 | 2,173 | 7,62 | 2,11 | 7,22 | 95,69 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje | 2+730 | 20 | 2,02 | 2,161 | 6,95 | 2,11 | 7,22 | 95,76 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Izq. | 2+700 | 20 | 2,03 | 2,188 | 7,66 | 2,11 | 7,22 | 96,32 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje | 2+670 | 20 | 2,02 | 2,175 | 7,44 | 2,11 | 7,22 | 95,94 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 2+640 | 20 | 2,03 | 2,174 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 96,15 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje | 2+610 | 20 | 2,01 | 2,151 | 7,06 | 2,11 | 7,22 | 95,22 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Izq. | 2+580 | 20 | 2,02 | 2,173 | 7,62 | 2,11 | 7,22 | 95,69 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje | 2+520 | 20 | 2,02 | 2,162 | 7,16 | 2,11 | 7,07 | 95,62 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 2+520 | 20 | 2,03 | 2,188 | 7,66 | 2,11 | 7,22 | 96,32 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje. | 2+490 | 20 | 2,02 | 2,175 | 7,44 | 2,11 | 7,22 | 95,94 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 0+000 | 20 | 2,03 | 2,174 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 96,15 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje. | 0+030 | 20 | 2,01 | 2,151 | 7,06 | 2,11 | 7,22 | 95,22 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Izq. | 0+060 | 20 | 2,02 | 2,173 | 7,62 | 2,11 | 7,22 | 95,69 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje. | 0+090 | 20 | 2,02 | 2,162 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 95,62 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 0+110 | 20 | 2,03 | 2,188 | 7,66 | 2,11 | 7,22 | 96,32 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje. | 0+140 | 20 | 2,02 | 2,175 | 7,44 | 2,11 | 7,22 | 95,94 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Izq. | 0+170 | 20 | 2,03 | 2,174 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 96,15 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje. | 0+200 | 20 | 2,01 | 2,152 | 7,06 | 2,11 | 7,22 | 95,26 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 0+230 | 20 | 2,02 | 2,173 | 7,62 | 2,11 | 7,22 | 95,69 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Eje. | 0+260 | 20 | 2,02 | 2,162 | 7,16 | 2,11 | 7,22 | 95,62 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Izq. | 0+290 | 20 | 2,03 | 2,188 | 7,66 | 2,11 | 7,22 | 96,32 |
| 12/04/2011 | SUB-RASANTE MEJORADA | Der. | 0+310 | 20 | 2,02 | 2,175 | 7,44 | 2,11 | 7,22 | 95,94 |

Fuente: Propia.

Figura 37. Lecturas del Densímetro nuclear de sub-base.

| PROYECTO: ANALISIS COMPARATIVO Y CORRELACION DE DENSIDADES POR LOS METODOS DE CONO DE ARENA Y DENSIMETRO NUCLEAR. PORCEDENCIA:Tramo 3 Pte. Temporal-San Jacinto Norte-Exposur. | | | | | | | TRAMO: 3 Sub-base FECHA:19/09/2011 | | | |
|--|----------|------|--------|--------------|--|--|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------|
| FECHA | CAPA | LADO | ESTACA | PROF. Cm. | DENSIDAD SECA-DD (gr/cm ³) | DENSIDAD HUMEDA-WD (gr/cm ³) | HUMEDAD % | LABORATORIO | | GRADO DE COMPACTACION % |
| | | | | | | | | DENS. MAX. (gr/cm ³) | HUM. OPT. % | |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 3+000 | 20 | 2,21 | 2,302 | 4,1 | 2,183 | 5,6 | 101,30 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje | 2+940 | 20 | 2,32 | 2,419 | 4,1 | 2,183 | 5,6 | 106,45 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Izq. | 2+940 | 20 | 2,27 | 2,367 | 4,2 | 2,183 | 5,6 | 104,06 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje | 2+910 | 20 | 2,18 | 2,269 | 4,3 | 2,183 | 5,6 | 99,65 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 2+880 | 20 | 2,22 | 2,313 | 4,1 | 2,183 | 5,6 | 101,78 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje | 2+850 | 20 | 2,29 | 2,377 | 3,8 | 2,183 | 5,6 | 104,90 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Izq. | 2+820 | 20 | 2,24 | 2,328 | 3,7 | 2,183 | 5,6 | 102,84 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje | 2+790 | 20 | 2,27 | 2,365 | 4,2 | 2,183 | 5,6 | 103,97 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 2+760 | 20 | 2,13 | 2,212 | 4 | 2,183 | 5,6 | 97,43 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje | 2+730 | 20 | 2,23 | 2,309 | 3,7 | 2,183 | 5,6 | 102,00 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Izq. | 2+700 | 20 | 2,22 | 2,311 | 4 | 2,183 | 5,6 | 101,79 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje | 2+670 | 20 | 2,25 | 2,33 | 3,6 | 2,183 | 5,6 | 103,02 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 2+640 | 20 | 2,21 | 2,296 | 4 | 2,183 | 5,6 | 101,13 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje | 2+610 | 20 | 2,25 | 2,333 | 3,8 | 2,183 | 5,6 | 102,96 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Izq. | 2+580 | 20 | 2,25 | 2,327 | 3,6 | 2,183 | 5,6 | 102,89 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje | 2+520 | 20 | 2,28 | 2,363 | 3,7 | 2,183 | 5,6 | 104,38 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 2+520 | 20 | 2,21 | 2,289 | 3,6 | 2,183 | 5,6 | 101,21 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje. | 2+490 | 20 | 2,24 | 2,33 | 3,8 | 2,183 | 5,6 | 102,83 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 0+000 | 20 | 2,29 | 2,388 | 4,2 | 2,183 | 5,6 | 104,98 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje. | 0+030 | 20 | 2,13 | 2,224 | 4,4 | 2,183 | 5,6 | 97,58 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Izq. | 0+060 | 20 | 2,16 | 2,243 | 4 | 2,183 | 5,6 | 98,80 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje. | 0+090 | 20 | 2,18 | 2,256 | 3,5 | 2,183 | 5,6 | 99,85 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 0+110 | 20 | 2,17 | 2,248 | 3,4 | 2,183 | 5,6 | 99,59 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje. | 0+140 | 20 | 2,21 | 2,289 | 3,6 | 2,183 | 5,6 | 101,21 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Izq. | 0+170 | 20 | 2,22 | 2,308 | 3,78 | 2,183 | 5,6 | 101,88 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje. | 0+200 | 20 | 2,21 | 2,296 | 4 | 2,183 | 5,6 | 101,13 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 0+230 | 20 | 2,21 | 2,289 | 3,6 | 2,183 | 5,6 | 101,21 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Eje. | 0+260 | 20 | 2,24 | 2,33 | 3,8 | 2,183 | 5,6 | 102,83 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Izq. | 0+290 | 20 | 2,18 | 2,256 | 3,5 | 2,183 | 5,6 | 99,85 |
| 19/09/2011 | SUB-BASE | Der. | 0+310 | 20 | 2,17 | 2,248 | 3,4 | 2,183 | 5,6 | 99,59 |

Fuente: Propia.

4.7. Análisis Comparativo.-

4.7.1. Correlación de los resultados.-

La correlación trata de establecer la relación o dependencia que existe entre dos variables que intervienen en una distribución bidimensional.

Es decir, determinar si los cambios en una de las variables influyen en los cambios de la otra. En caso de que suceda, diremos que las variables están correlacionadas entre ellas.

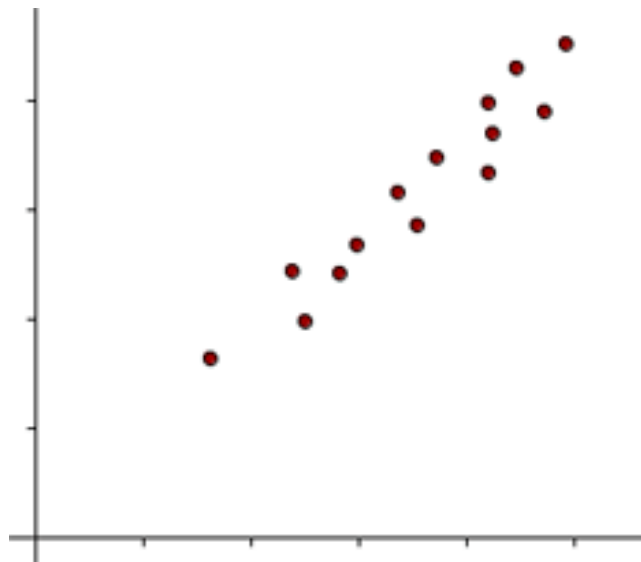
Tipos de Correlación.-

1º Correlación directa.-

La correlación directa se da cuando al aumentar una de las variables, la otra aumenta.

La recta correspondiente a la nube de puntos de la distribución en una recta creciente, como se puede observar en la figura 38:

Figura 38. Nube de puntos de una correlación directa.



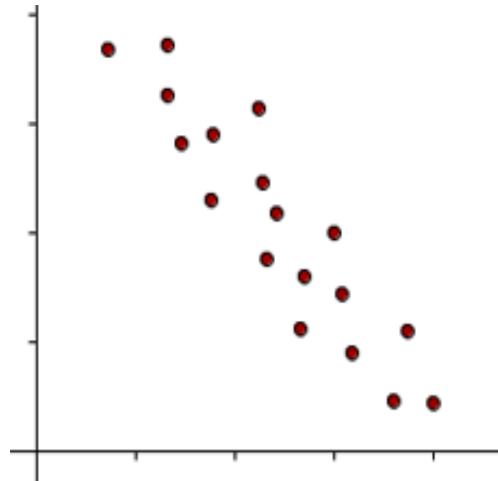
2º Correlación inversa.-

La correlación inversa se da cuando al aumentar una de las variables en análisis, la otra disminuye.

La recta correspondiente a la nube de puntos de la distribución es una recta decreciente,

como se puede observar en la figura 39:

Figura 39. **Nube de puntos de una correlación inversa.**

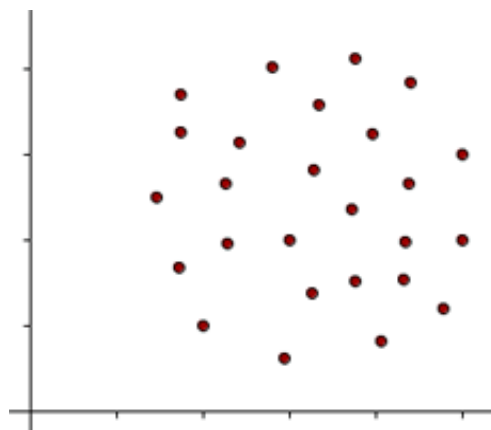


3° Correlación nula.-

La correlación nula se da cuando no existe dependencia de ningún tipo entre las variables en análisis.

En este caso se dice que las variables son incorreladas y la nube de puntos tiene una forma redondeada, tal como podemos observar de manera más clara en la figura número 40:

Figura 40. **Nube de puntos de una correlación nula.**



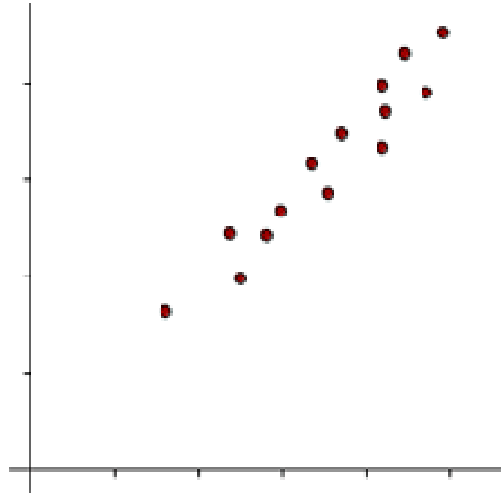
Grado de Correlación.-

El grado de correlación indica la proximidad que hay entre los puntos de la nube de puntos. Se pueden dar tres tipos.

1. Correlación fuerte.-

La correlación será fuerte cuanto más cerca esté los puntos de la recta, como se puede observar en la figura 41:

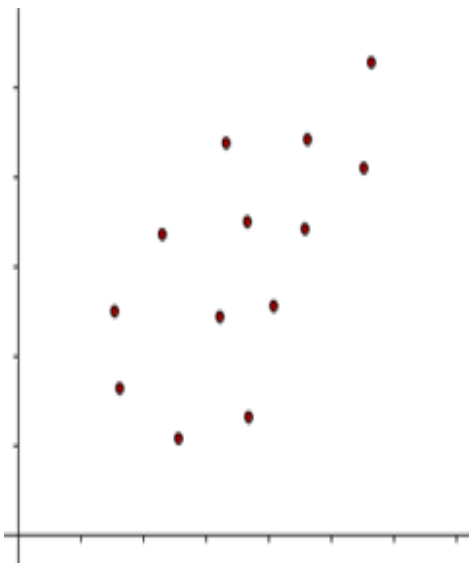
Figura 41. Nube de puntos de una correlación fuerte.



2. Correlación Débil.-

La correlación será débil cuanto más separados estén los puntos de la recta, tal como se ve en la figura 42:

Figura 42. Nube de puntos de una correlación débil.



Recordemos que para el caso de una variable, la varianza era un parámetro que nos mostraba cuanta variación existía entre la media un conjunto de datos. En el mismo tenor, estamos en determinar la dependencia entre dos variables por lo que una primera propuesta es construir una medida que nos permita en forma análoga tratar la “variación”.

Se define la covarianza como la variación que existe entre los datos de dos variables, expresada como:

$$s_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n}$$

Donde x_i e y_i son las variables para n datos que intervienen en el estudio.

En realidad la correlación es una medida sobre el grado de relación entre dos variables, sin importar cuál es la causa y cuál es el efecto. La dependencia de la que se habla en este sentido es la dependencia entre la varianza de las variables.

Como hemos visto el manejo de unidades adimensionales nos permiten tener un coeficiente sobre el que de forma cómoda se pueda trabajar, por lo que podemos dividir entre el producto de las desviaciones de las variables, es decir:

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_x s_y}}$$

Los valores para este coeficiente están comprendidos entre -1 y 1.

Se tiene los siguientes criterios para r

$$r = \begin{cases} r = 1 & \text{la correlación lineal es perfecta, directa o correlación lineal positiva} \\ r = 0 & \text{no existe correlación lineal o correlación lineal nula} \\ r = -1 & \text{la correlación lineal es perfecta, inversa o correlación lineal negativa} \end{cases}$$

Entre más se aproxima a los valores 1 y -1 la aproximación a una correlación se considera buena. Cuando más se aleja de 1 o de -1 y se acerca a cero se tiene menos confianza en la dependencia lineal por lo que una aproximación lineal será lo menos apropiado, sin embargo no significa que no existe dependencia, lo único que podemos decir es que la dependencia no es lineal. Un valor positivo para r indica que a medida que una variable crece la otra también lo hace, por el contrario si su valor es negativo, lo que podemos decir es que a medida que una variable crece la otra decrece.

Una vez que se determina que existe dependencia lineal un aspecto sumamente relevante es el investigar las características del modelo matemático que relaciona una variable con otra, así de esta forma podemos decir, una variable puede clasificarse como determinístico y probabilístico.

El modelo determinístico, que no será abordado en este curso, está ligado a la ecuación que regula de forma determinante el comportamiento de un fenómeno, así por ejemplo podemos determinar a partir de la obtención de una ecuación sobre el potencial de frenado en un material, que ante cambios de la longitud de onda la relación es lineal no permitirá predecir cuáles serán sus valores.

Ecuaciones que permiten ver como es la oposición a la corriente eléctrica, o resistencia eléctrica, al aumentar la temperatura de un metal, entre otros, es un claro indicio de una ecuación que es determinística, en ella se podrá describir como cambiara la resistencia eléctrica del material en cuestión ante el aumento de una temperatura en el material.

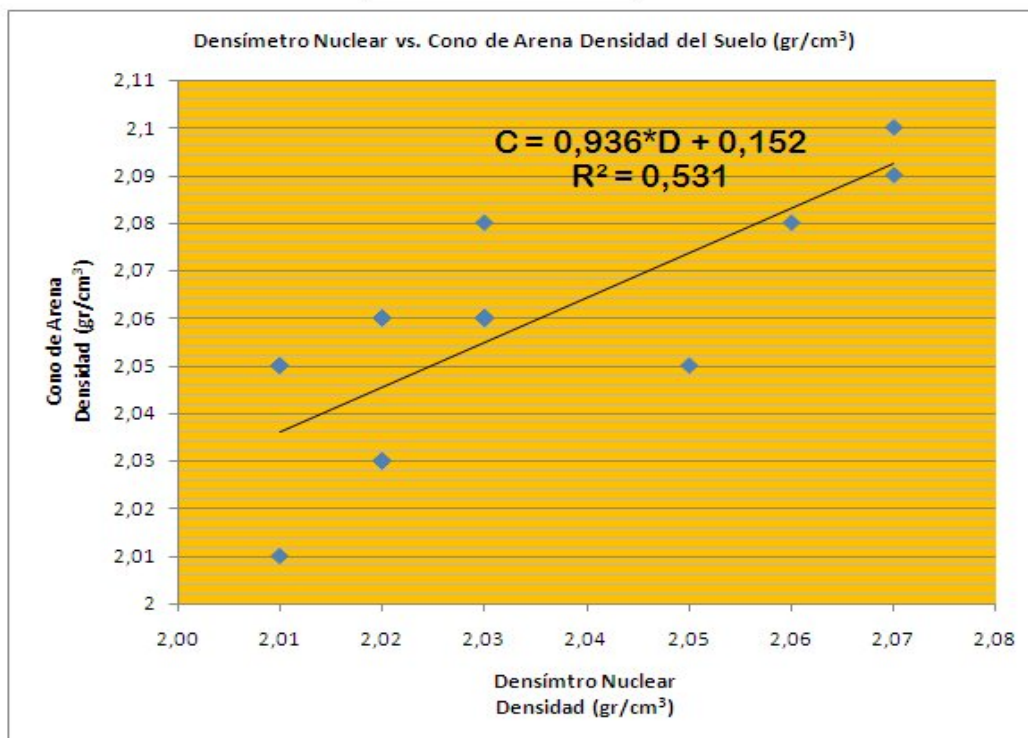
Por otro lado, los fenómenos probabilísticos están sujetos a la modelos que aunque puedan ser descritos por una ecuación no implica que todos los valores que intervienen en el estudio puedan ser localizados en el gráfico que los representan, y por supuesto un dato mas no es garantía que sea localizado en la ecuación.

A continuación se muestran gráficos correlativos de la densidad, porcentaje de humedad (en porcentaje) y del grado de compactación en porcentaje obtenidos por ambos métodos, es decir tanto del ensayo de cono de arena y densímetro nuclear:

Figura 43. Correlación de la densidad por ambos métodos sub-rasante mejorada.

**CORRELACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA SUB-RASANTE MEJORADA
TIPO DE SUELO: A-2-6(8) Ó GW-GC**

| Densímetro | Arena |
|------------|-------|
| 2,05 | 2,05 |
| 2,03 | 2,08 |
| 2,07 | 2,09 |
| 2,07 | 2,1 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,06 | 2,08 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,01 | 2,05 |
| 2,02 | 2,03 |
| 2,02 | 2,03 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,02 | 2,06 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,01 | 2,05 |
| 2,02 | 2,03 |
| 2,02 | 2,03 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,02 | 2,06 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,01 | 2,05 |
| 2,02 | 2,03 |
| 2,02 | 2,03 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,02 | 2,06 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,01 | 2,01 |
| 2,02 | 2,03 |
| 2,02 | 2,03 |
| 2,03 | 2,06 |
| 2,02 | 2,06 |

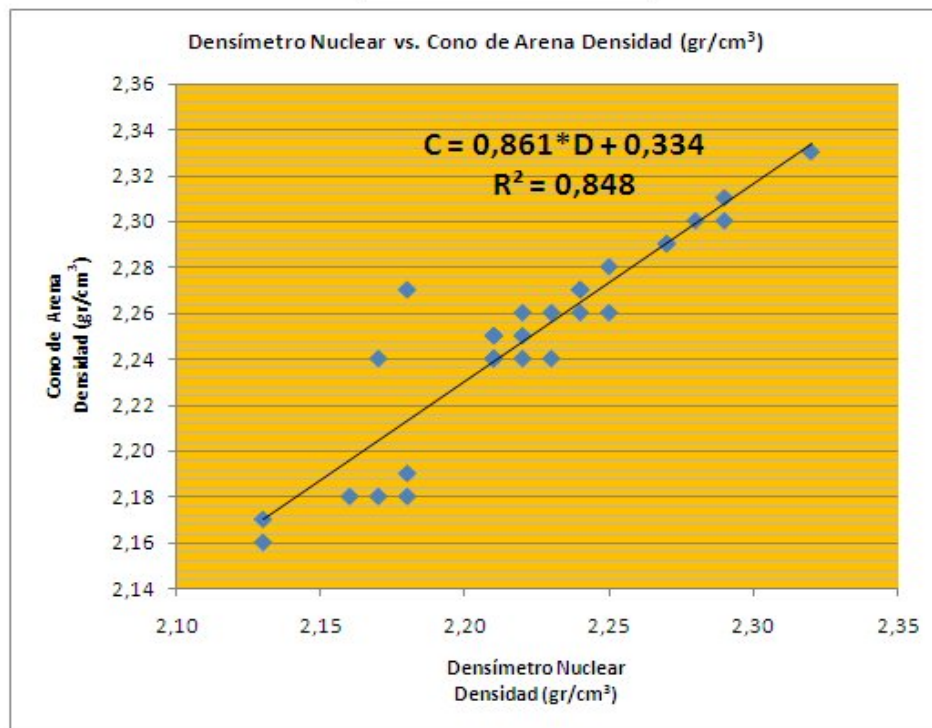


Fuente: Propia.

Figura 44. Correlación de la densidad por ambos métodos sub-base.

CORRELACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA SUB-BASE
TIPO DE SUELO: A-2-4(8) Ó GW-GM

| Densímetro | Areca |
|------------|-------|
| 2,21 | 2,24 |
| 2,32 | 2,33 |
| 2,27 | 2,29 |
| 2,18 | 2,19 |
| 2,22 | 2,26 |
| 2,29 | 2,31 |
| 2,24 | 2,26 |
| 2,27 | 2,29 |
| 2,13 | 2,16 |
| 2,23 | 2,26 |
| 2,22 | 2,25 |
| 2,25 | 2,28 |
| 2,21 | 2,25 |
| 2,25 | 2,26 |
| 2,23 | 2,24 |
| 2,28 | 2,30 |
| 2,21 | 2,24 |
| 2,24 | 2,27 |
| 2,29 | 2,30 |
| 2,13 | 2,17 |
| 2,16 | 2,18 |
| 2,18 | 2,27 |
| 2,17 | 2,18 |
| 2,21 | 2,24 |
| 2,22 | 2,24 |
| 2,21 | 2,25 |
| 2,21 | 2,24 |
| 2,24 | 2,27 |
| 2,18 | 2,18 |
| 2,17 | 2,24 |

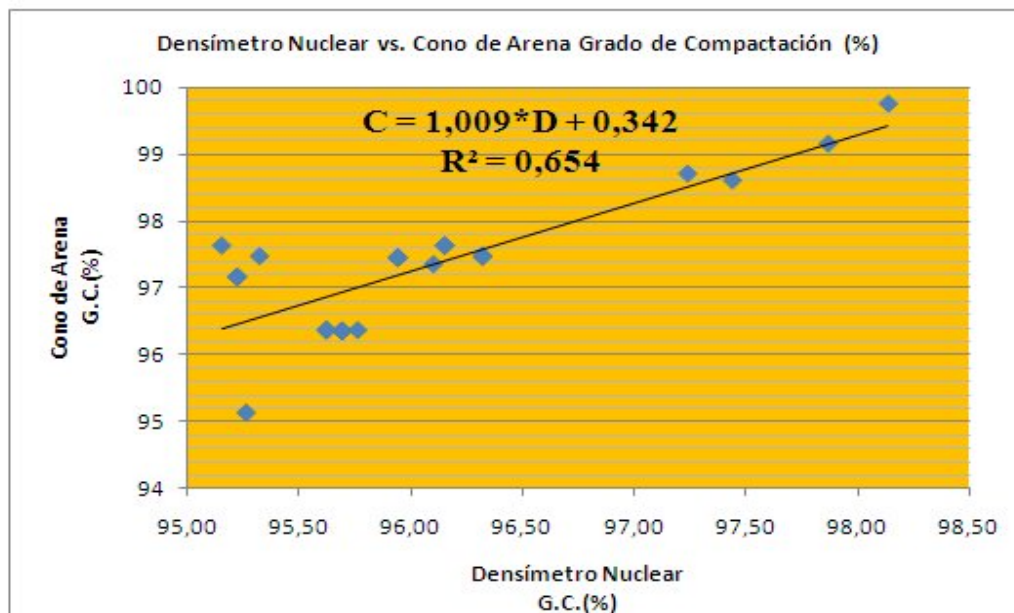


Fuente: Propia.

Figura 45. Correlación del grado de compactación por ambos métodos de sub-rasante mejorada.

**CORRELACIÓN DEL % DE COMPACTACIÓN DE SUB-RASANTE MEJORADA
TIPO DE SUELO: A-2-6(8) Ó GW-GC**

| Densímetro | Areas |
|------------|-------|
| 97,24 | 98,71 |
| 96,10 | 97,35 |
| 97,87 | 99,16 |
| 98,14 | 99,76 |
| 96,32 | 97,47 |
| 97,44 | 98,61 |
| 96,15 | 97,63 |
| 95,22 | 97,16 |
| 95,69 | 96,35 |
| 95,76 | 96,36 |
| 96,32 | 97,47 |
| 95,94 | 97,45 |
| 96,15 | 97,63 |
| 95,22 | 97,16 |
| 95,69 | 96,35 |
| 95,62 | 96,36 |
| 96,32 | 97,47 |
| 95,94 | 97,45 |
| 96,15 | 97,63 |
| 95,22 | 97,16 |
| 95,69 | 96,35 |
| 95,62 | 96,36 |
| 95,32 | 97,47 |
| 95,94 | 97,45 |
| 95,15 | 97,63 |
| 95,26 | 95,12 |
| 95,69 | 96,35 |
| 95,62 | 96,36 |
| 96,32 | 97,47 |
| 95,94 | 97,45 |

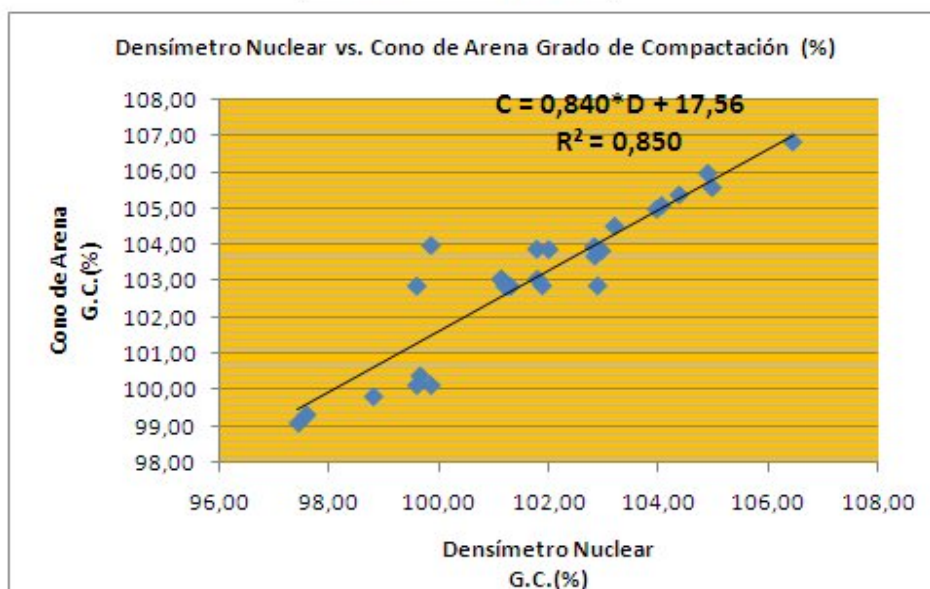


Fuente: Propia

Figura 46. Correlación del grado de compactación por ambos métodos de sub-base

CORRELACIÓN DEL % DE COMPACTACIÓN DE LA SUB-BASE
TIPO DE SUELO: A-2-4(8) Ó GW-GM

| Densímetro | Arena |
|------------|--------|
| 101,30 | 102,85 |
| 106,45 | 106,81 |
| 104,06 | 105,07 |
| 99,65 | 100,40 |
| 101,78 | 103,87 |
| 104,90 | 105,95 |
| 102,84 | 103,68 |
| 103,97 | 104,97 |
| 97,43 | 99,10 |
| 102,00 | 103,86 |
| 101,79 | 103,05 |
| 103,20 | 104,50 |
| 101,13 | 103,05 |
| 102,96 | 103,83 |
| 102,89 | 102,87 |
| 104,38 | 105,36 |
| 101,21 | 102,86 |
| 102,83 | 103,93 |
| 104,98 | 105,56 |
| 97,58 | 99,33 |
| 98,80 | 99,83 |
| 99,85 | 103,97 |
| 99,59 | 100,14 |
| 101,21 | 102,86 |
| 101,88 | 102,87 |
| 101,13 | 103,05 |
| 101,21 | 102,86 |
| 102,83 | 103,93 |
| 99,85 | 100,14 |
| 99,59 | 102,86 |

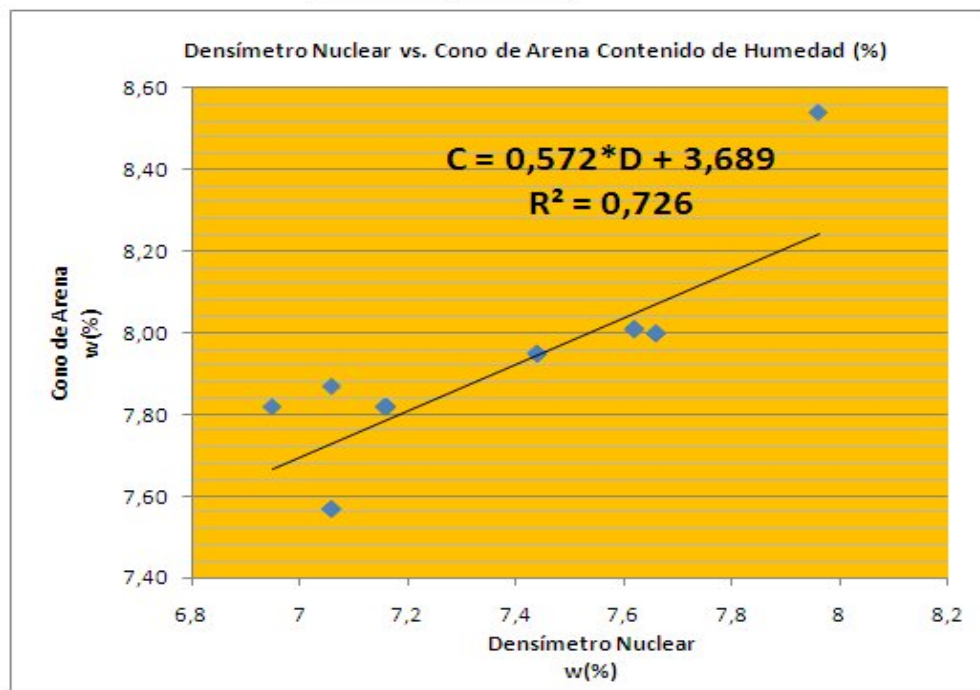


Fuente: Propia.

Figura 47. Correlación del contenido de humedad por ambos métodos de sub-rasante mejorada.

**CORRELACIÓN DEL % DE HUMEDAD DE LA SUB-RASANTE MEJORADA
TIPO DE SUELO: A-2-6(8) Ó GW-GC**

| Densímetro | Arena |
|------------|-------|
| 7,96 | 8,54 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,66 | 8,00 |
| 7,44 | 7,95 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,06 | 7,57 |
| 7,62 | 8,01 |
| 6,95 | 7,82 |
| 7,66 | 8,00 |
| 7,44 | 7,95 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,06 | 7,57 |
| 7,62 | 8,01 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,66 | 8,00 |
| 7,44 | 7,95 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,06 | 7,57 |
| 7,62 | 8,01 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,66 | 8,00 |
| 7,44 | 7,95 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,06 | 7,57 |
| 7,62 | 8,01 |
| 7,16 | 7,82 |
| 7,66 | 8,00 |
| 7,44 | 7,95 |

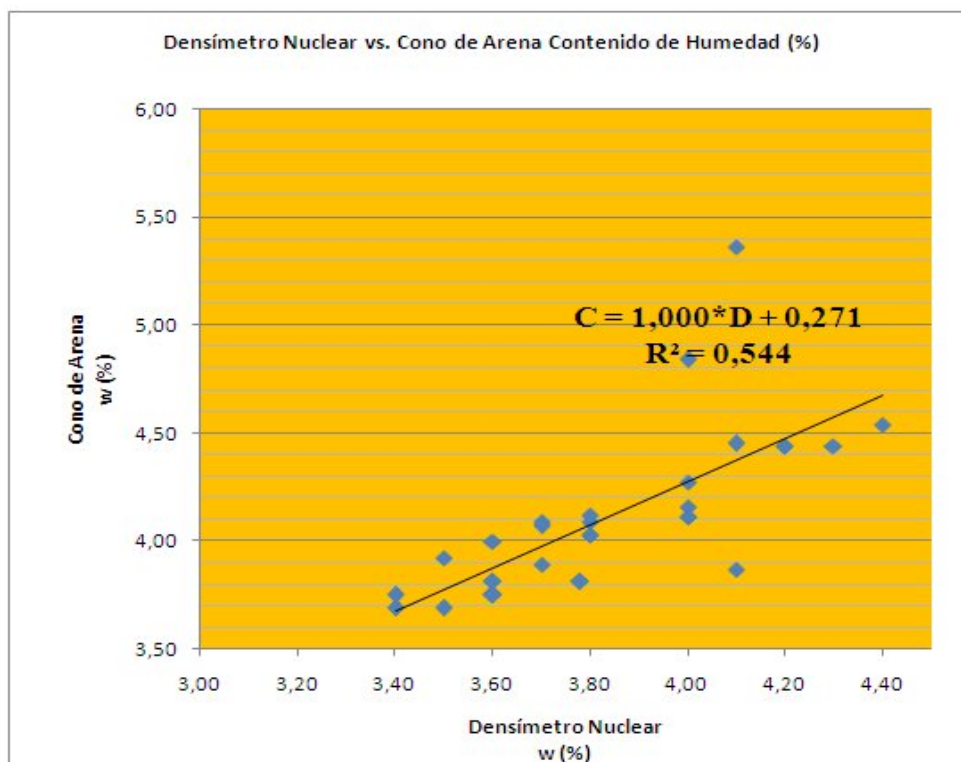


Fuente: Propia.

Figura 48. Correlación del contenido de humedad por ambos métodos de sub-base.

CORRELACIÓN DEL % DE HUMEDAD DE LA SUB-BASE
TIPO DE SUELO: A-2-4(8) Ó GW-GM

| Densímetro | Arena |
|------------|-------|
| 4,10 | 5,36 |
| 4,10 | 4,45 |
| 4,20 | 4,44 |
| 4,30 | 4,44 |
| 4,10 | 3,87 |
| 3,80 | 4,09 |
| 3,70 | 4,07 |
| 4,20 | 4,44 |
| 4,00 | 4,84 |
| 3,70 | 4,09 |
| 4,00 | 4,27 |
| 3,60 | 4,00 |
| 4,00 | 4,11 |
| 3,80 | 4,12 |
| 3,60 | 3,81 |
| 3,70 | 3,89 |
| 3,60 | 3,75 |
| 3,80 | 4,03 |
| 4,20 | 4,44 |
| 4,40 | 4,54 |
| 4,00 | 4,16 |
| 3,50 | 3,92 |
| 3,40 | 3,69 |
| 3,60 | 3,75 |
| 3,78 | 3,81 |
| 4,00 | 4,11 |
| 3,60 | 3,75 |
| 3,80 | 4,03 |
| 3,50 | 3,69 |
| 3,40 | 3,75 |



Fuente: Propia.

4.7.2. Contrastación de resultados.-

A continuación se muestra planillas donde se observa los resultados de ambos métodos, es decir por el método del Cono de Arena y del Densímetro Nuclear, en la planilla se ve los valores de la densidad, grado de compactación y el porcentaje de humedad:

Figura. 49. **Contrastación de resultados de densidades por ambos métodos sub-rasante mejorada.**

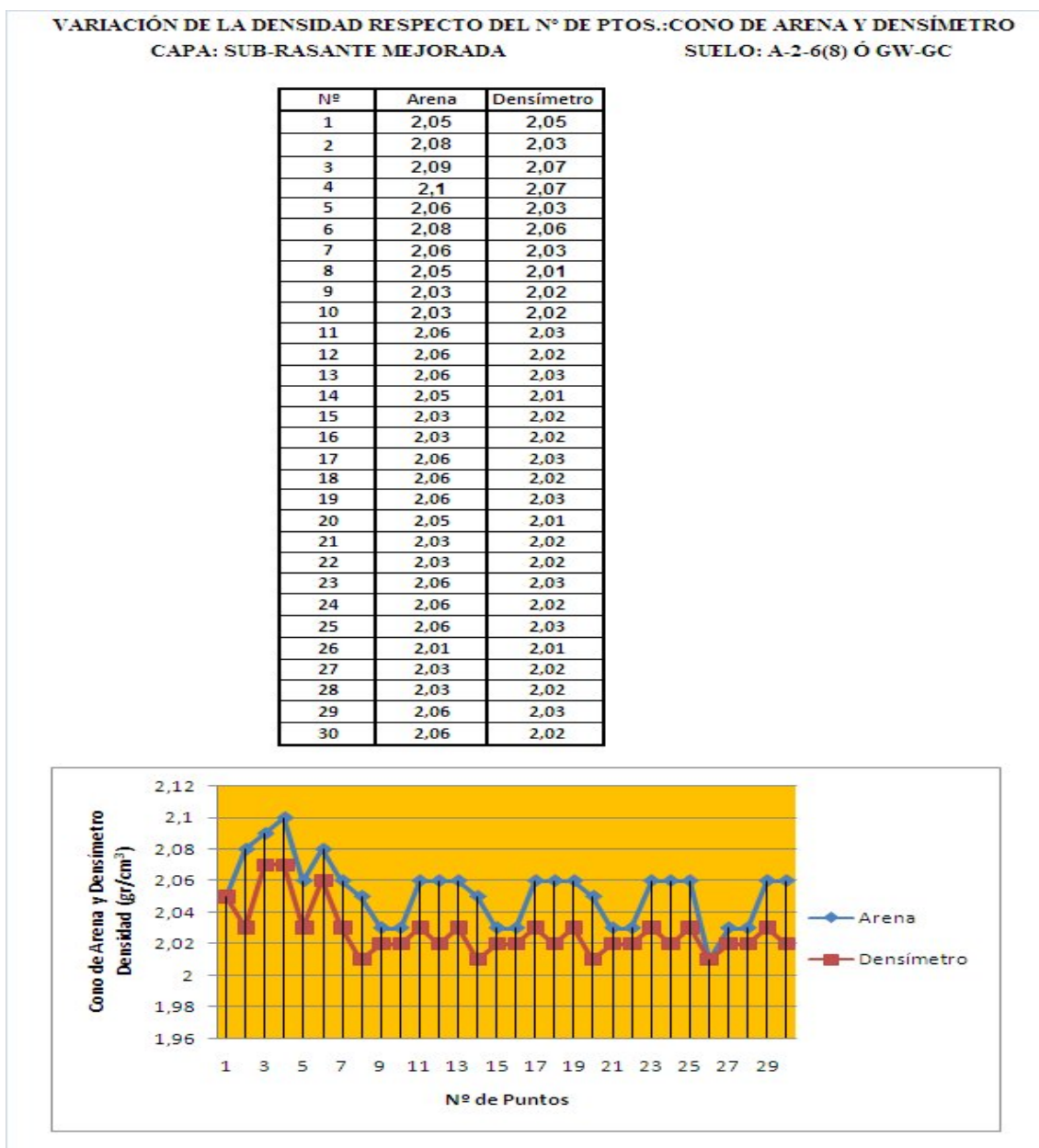
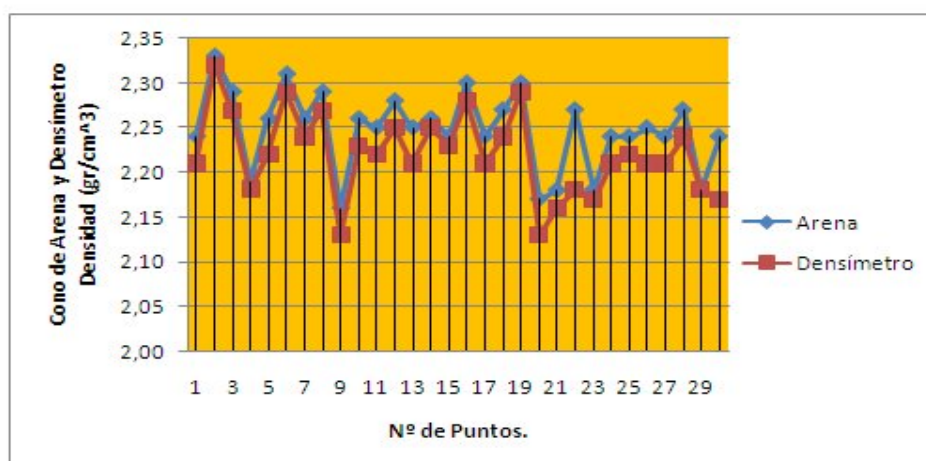


Figura. 50. Contrastación de resultados de densidades por ambos métodos sub-base.

VARIACIÓN DE LA DENSIDAD RESPECTO DEL N° DE PTOS.: CONO DE ARENA Y DENSÍMETRO
 CAPA: SUB-BASE SUELO: A-2-4(8) Ó GW-GM

| Nº | Arena | Densímetro |
|----|-------|------------|
| 1 | 2,24 | 2,21 |
| 2 | 2,33 | 2,32 |
| 3 | 2,29 | 2,27 |
| 4 | 2,19 | 2,18 |
| 5 | 2,26 | 2,22 |
| 6 | 2,31 | 2,29 |
| 7 | 2,26 | 2,24 |
| 8 | 2,29 | 2,27 |
| 9 | 2,16 | 2,13 |
| 10 | 2,26 | 2,23 |
| 11 | 2,25 | 2,22 |
| 12 | 2,28 | 2,25 |
| 13 | 2,25 | 2,21 |
| 14 | 2,26 | 2,25 |
| 15 | 2,24 | 2,23 |
| 16 | 2,30 | 2,28 |
| 17 | 2,24 | 2,21 |
| 18 | 2,27 | 2,24 |
| 19 | 2,30 | 2,29 |
| 20 | 2,17 | 2,13 |
| 21 | 2,18 | 2,16 |
| 22 | 2,27 | 2,18 |
| 23 | 2,18 | 2,17 |
| 24 | 2,24 | 2,21 |
| 25 | 2,24 | 2,22 |
| 26 | 2,25 | 2,21 |
| 27 | 2,24 | 2,21 |
| 28 | 2,27 | 2,24 |
| 29 | 2,18 | 2,18 |
| 30 | 2,24 | 2,17 |

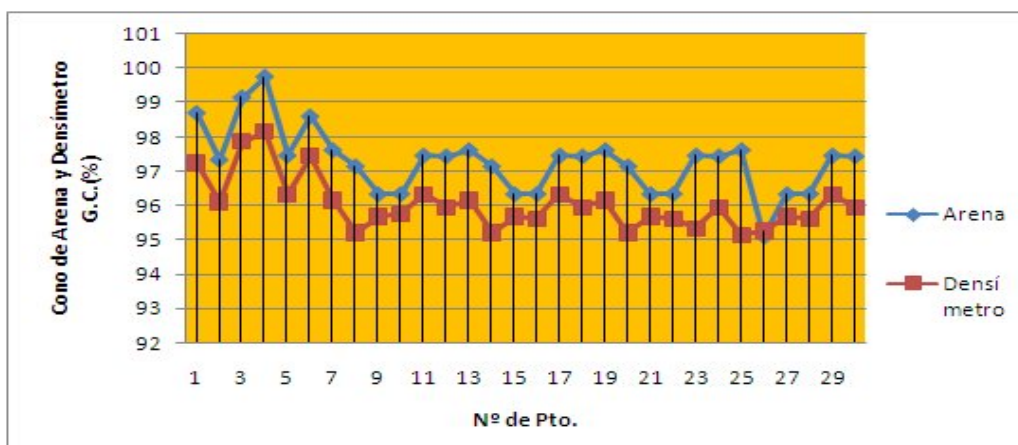


Fuente: Propia.

Figura. 51. Contrastación de resultados del grado de compactación por ambos métodos sub-rasante mejorada.

VARIACIÓN DEL G.C.(%) RESPECTO DEL N° DE PTOS.: CONO DE ARENA Y DENSÍMETRO
 CAPA: SUB-RASANTE MEJORADA SUELO: A-2-6(8) Ó GW-GC

| N° | Arena | Densímetro |
|----|-------|------------|
| 1 | 98,71 | 97,24 |
| 2 | 97,35 | 96,10 |
| 3 | 99,16 | 97,87 |
| 4 | 99,76 | 98,14 |
| 5 | 97,47 | 96,32 |
| 6 | 98,61 | 97,44 |
| 7 | 97,63 | 96,15 |
| 8 | 97,16 | 95,22 |
| 9 | 96,35 | 95,69 |
| 10 | 96,36 | 95,76 |
| 11 | 97,47 | 96,32 |
| 12 | 97,45 | 95,94 |
| 13 | 97,63 | 96,15 |
| 14 | 97,16 | 95,22 |
| 15 | 96,35 | 95,69 |
| 16 | 96,36 | 95,62 |
| 17 | 97,47 | 96,32 |
| 18 | 97,45 | 95,94 |
| 19 | 97,63 | 96,15 |
| 20 | 97,16 | 95,22 |
| 21 | 96,35 | 95,69 |
| 22 | 96,36 | 95,62 |
| 23 | 97,47 | 95,32 |
| 24 | 97,45 | 95,94 |
| 25 | 97,63 | 95,15 |
| 26 | 95,12 | 95,26 |
| 27 | 96,35 | 95,69 |
| 28 | 96,36 | 95,62 |
| 29 | 97,47 | 96,32 |
| 30 | 97,45 | 95,94 |

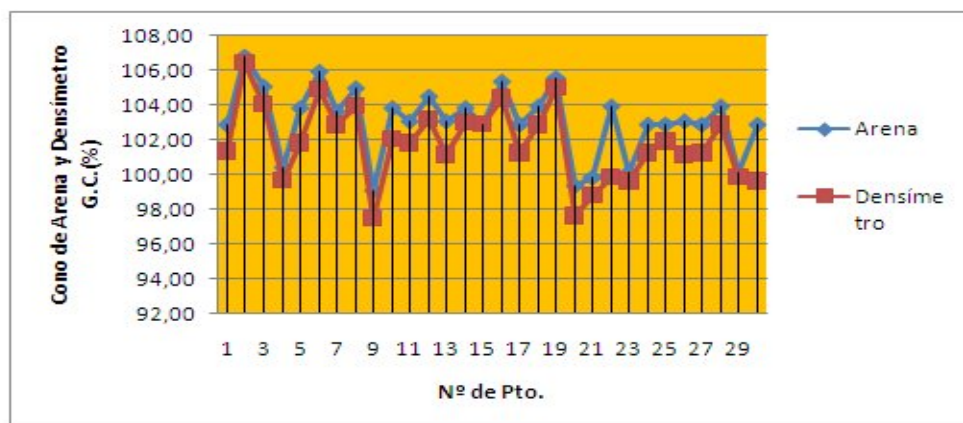


Fuente: Propia.

Figura. 52. Contrastación de resultados del grado de compactación por ambos métodos sub-base.

VARIACIÓN DEL G.C.(%) RESPECTO DEL N° DE PTOS.: CONO DE ARENA Y DENSÍMETRO
CAPA: SUB-BASE SUELO: A-2-4(8) Ó GW-GM

| N° | Arena | Densímetro |
|----|--------|------------|
| 1 | 102,85 | 101,30 |
| 2 | 106,81 | 106,45 |
| 3 | 105,07 | 104,06 |
| 4 | 100,40 | 99,65 |
| 5 | 103,87 | 101,78 |
| 6 | 105,95 | 104,90 |
| 7 | 103,68 | 102,84 |
| 8 | 104,97 | 103,97 |
| 9 | 99,10 | 97,43 |
| 10 | 103,86 | 102,00 |
| 11 | 103,05 | 101,79 |
| 12 | 104,50 | 103,20 |
| 13 | 103,05 | 101,13 |
| 14 | 103,83 | 102,96 |
| 15 | 102,87 | 102,89 |
| 16 | 105,36 | 104,38 |
| 17 | 102,86 | 101,21 |
| 18 | 103,93 | 102,83 |
| 19 | 105,56 | 104,98 |
| 20 | 99,33 | 97,58 |
| 21 | 99,83 | 98,80 |
| 22 | 103,97 | 99,85 |
| 23 | 100,14 | 99,59 |
| 24 | 102,86 | 101,21 |
| 25 | 102,87 | 101,88 |
| 26 | 103,05 | 101,13 |
| 27 | 102,86 | 101,21 |
| 28 | 103,93 | 102,83 |
| 29 | 100,14 | 99,85 |
| 30 | 102,86 | 99,59 |

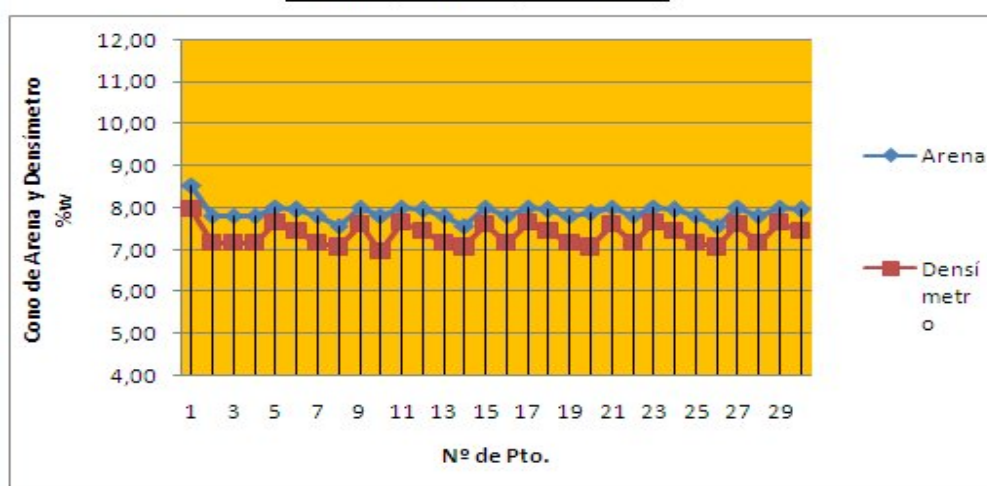


Fuente: Propia.

Figura. 53. Contrastación de resultados del contenido de humedad por ambos métodos sub-rasante mejorada.

VARIACIÓN DE LA HUMEDAD RESPECTO DEL N° DE PTOS.: CONO DE ARENA Y DENSÍMETRO
CAPA: SUB-RASANTE MEJORADA SUELO: A-2-6(8) Ó GW-GC

| Nº | Arena | Densímetro |
|----|-------|------------|
| 1 | 8,54 | 7,96 |
| 2 | 7,82 | 7,16 |
| 3 | 7,82 | 7,16 |
| 4 | 7,82 | 7,16 |
| 5 | 8,00 | 7,66 |
| 6 | 7,95 | 7,44 |
| 7 | 7,82 | 7,16 |
| 8 | 7,57 | 7,06 |
| 9 | 8,01 | 7,62 |
| 10 | 7,82 | 6,95 |
| 11 | 8,00 | 7,66 |
| 12 | 7,95 | 7,44 |
| 13 | 7,82 | 7,16 |
| 14 | 7,57 | 7,06 |
| 15 | 8,01 | 7,62 |
| 16 | 7,82 | 7,16 |
| 17 | 8,00 | 7,66 |
| 18 | 7,95 | 7,44 |
| 19 | 7,82 | 7,16 |
| 20 | 7,87 | 7,06 |
| 21 | 8,01 | 7,62 |
| 22 | 7,82 | 7,16 |
| 23 | 8,00 | 7,66 |
| 24 | 7,95 | 7,44 |
| 25 | 7,82 | 7,16 |
| 26 | 7,57 | 7,06 |
| 27 | 8,01 | 7,62 |
| 28 | 7,82 | 7,16 |
| 29 | 8,00 | 7,66 |
| 30 | 7,95 | 7,44 |

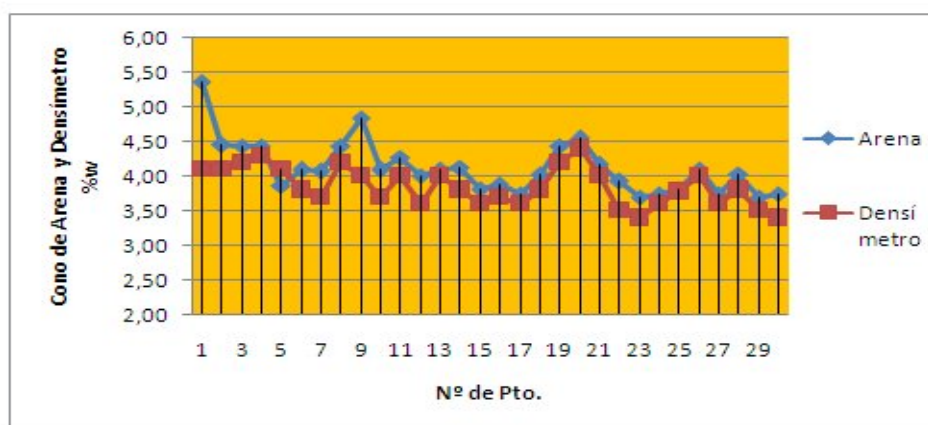


Fuente: Propia.

Figura. 54. Contrastación de resultados del contenido de humedad por ambos métodos sub-base.

VARIACIÓN DE LA HUMEDAD RESPECTO DEL N° DE PTOS.: CONO DE ARENA Y DENSÍMETRO
CAPA: SUB-BASE SUELO: A-2-4(8) Ó GW-GM

| Nº | Arena | Densímetro |
|----|-------|------------|
| 1 | 5,36 | 4,10 |
| 2 | 4,45 | 4,10 |
| 3 | 4,44 | 4,20 |
| 4 | 4,44 | 4,30 |
| 5 | 3,87 | 4,10 |
| 6 | 4,09 | 3,80 |
| 7 | 4,07 | 3,70 |
| 8 | 4,44 | 4,20 |
| 9 | 4,84 | 4,00 |
| 10 | 4,09 | 3,70 |
| 11 | 4,27 | 4,00 |
| 12 | 4,00 | 3,60 |
| 13 | 4,11 | 4,00 |
| 14 | 4,12 | 3,80 |
| 15 | 3,81 | 3,60 |
| 16 | 3,89 | 3,70 |
| 17 | 3,75 | 3,60 |
| 18 | 4,03 | 3,80 |
| 19 | 4,44 | 4,20 |
| 20 | 4,54 | 4,40 |
| 21 | 4,16 | 4,00 |
| 22 | 3,92 | 3,50 |
| 23 | 3,69 | 3,40 |
| 24 | 3,75 | 3,60 |
| 25 | 3,81 | 3,78 |
| 26 | 4,11 | 4,00 |
| 27 | 3,75 | 3,60 |
| 28 | 4,03 | 3,80 |
| 29 | 3,69 | 3,50 |
| 30 | 3,75 | 3,40 |



Fuente: Propia.

4.7.3. Valoración de Resultados.-

Realizado el análisis para ambas muestras se comprobó que la muestra utilizada para la capa sub-base muestra una densidad seca máxima de 2.18 gr/cm^3 con un contenido de humedad óptimo de 5.66 %, y una clasificación general según el sistema AASHTO A - 2 - 4 (8); y por consiguiente la sub-rasante muestra una densidad seca máxima de 2.11 gr/cm^3 con un contenido de humedad óptimo de 7.22%, y una clasificación general A-2-6(8), según el sistema AASTHO.

Basándonos en los resultados obtenidos sobre la sub-rasante mejorada y capa sub-base, se pudo notar que el método que mostró una menor variación en los resultados mostrados; es el método de la arena (según la tabla de resultados finales, la cual indica el promedio de las pruebas realizadas con el método de la arena y el densímetro nuclear para ambas capas), ya que indican que para la capa sub-rasante mejorada vemos que los valores se aproximan al 100% de compactación, mientras tanto siempre en la misma capa, la medición con el densímetro nuclear por el contrario ningún resultado obtuvo un 100% de compactación, incluso ninguno de ellos da un valor que esté por encima de los obtenidos por el método de cono de arena. Mientras tanto en la sub-base se observa nuevamente que la menor variación de resultados la obtuvo el método de la arena siendo así que de las treinta pruebas sólo 3 no alcanzan el 100 % del grado de compactación, mientras tanto el densímetro nuclear da como resultado que de las 30 lecturas 8 de ellas no llegan al 100% de compactación y las demás están por debajo de las medidas con el cono de arena.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.-

- De acuerdo a las características de ambos métodos, se pudo determinar que en la actualidad independientemente de las limitantes que presente uno del otro, ambos son aptos para la determinación de la densidad de campo de cualquier tipo de estrato de suelo.
- Una de las principales interrogantes al momento de realizar al presente estudio, era conocer si ambos métodos, sin importar que el procedimiento no fuere el mismo, serían equivalentes al momento de determinar la densidad en campo. Y luego de la realización de pruebas, los resultados indican que ambos métodos aunque varían en algunos de sus resultados de manera más significativa que otros, esto es debida a los factores externos que intervienen al momento de realizar la medición con el densímetro nuclear, indican que son equivalentes.
- Según los resultados obtenidos, se pudo determinar que el método del cono de arena es el método más viable, confiable y factible para el ensayo de densidad in situ. No sólo por el factor económico, sino también debido a su procedimiento, ya que se interactúa de una manera más directa con el estrato de suelo a trabajar.
- Aunque se pudo determinar que el método del cono de arena es el más viable y factible para la determinación de la densidad de campo, es de importancia mencionar el factor tiempo que lleva al elaborar una prueba respecto de la otra. Mientras que para el método de la arena la realización de una prueba se toma un día, con el densímetro nuclear cada ensayo se realiza aproximadamente en 15seg., lo cual las empresas ven como un beneficio. Además que se trata de un ensayo no destructivo que es otro elemento favorable a la hora de decidir por el método a emplear.

- El método del Cono de Arena, a pesar de ser el método más recomendable según este estudio, tiene una desventaja que está haciendo que su uso se vaya desplazando y esto es porque aparte de que se pierde bastante tiempo en la determinación final de los resultados se trata de un ensayo destructivo, ya que al hacer el agujero se está alterando la homogeneidad en la formación de la capa en cuestión, pues es sabido que luego de su realización no se rellena de manera adecuada los huecos.
- A través de las pruebas de campo realizadas con el densímetro nuclear, se pudo notar una serie de factores externos al equipo, los cuales afectaban a la medición del porcentaje de compactación y el porcentaje de la humedad contenida. Estos provocaban datos erróneos, que al ser comparados posteriormente con los resultados presentados por el método de la arena, se notó una variación dentro de los mismos. Dentro de estos factores se pudieron detectar los siguientes: Vibración del suelo durante la calibración y medición de las pruebas producidas por la maquinaria y el transporte pesado del lugar, segregación del material, la superficie del terreno a evaluar la cual presentaba agujeros, etc. Sin embargo esto puede subsanarse haciendo una buena calibración del equipo.
- En los resultados de la densidad se observa que existe mayor variación en la capa sub-rasante mejorada es por esto que el coeficiente de correlación lineal “r” es 0.531, es decir vemos que el ajuste no es muy fiable; esto puede explicarse porque se trata de una capa de rodadura, en otras palabras estamos hablando de un “ripiado” que no fue compactado bajo condiciones técnicas recomendadas por Normas, por lo que fue compactado por el tránsito de los vehículos, es por ello que la densidad varía más porque al estar el suelo menos denso esto hace que los rayos gamma se escapen, por otro lado la superficie no estaba con una uniformidad deseada. En la capa sub-base se tiene resultados menos variables, es decir el coeficiente de correlación lineal “r” es 0.848.

- Una vez realizado todo el análisis de los resultados y obtenida la diferencia “ Δ ” tanto de: densidad, grado de compactación y contenido de humedad en la sub-rasante mejorada como en la sub-base, podemos decir que en cuanto a la densidad la diferencia es igual en ambos casos (sub-rasante mejorada y sub-base), estamos hablando de una diferencia “ Δ ” de 0.03 gr/cm^3 , que es el valor que debemos adicionar al valor obtenido con el densímetro nuclear.
- En cuanto a la diferencia “ Δ ” del grado de compactación en porcentaje este es igual a 1.26% para la sub-rasante mejorada y de 1.34% para la sub-base en este caso podemos ver que la variación es mayor en la sub-base, al igual que en la densidad son estos los valores que se deben aumentar a los valores que se obtengan por el densímetro nuclear y de este modo llegar al valor del cono de arena.
- Finalmente la diferencia del contenido de humedad “ Δ ” expresada en porcentaje es de 0.54% para la sub-rasante mejorada y de 0.29% para la sub-base, aquí se observa una mayor variación para el caso de la sub-rasante, de similar manera estos valores se deben sumar a los valores que se obtengan a través del densímetro nuclear para llegar a los valores máximos que se obtienen por medio del ensayo del cono de arena según este estudio de investigación.
- Como conclusión fundamental se tiene que existe correlación entre ambos métodos analizados y que con el sólo uso de uno de ellos se puede determinar el valor que nos dará por el otro método. Es decir si usamos el Densímetro Nuclear, debemos afectar por un valor de “ Δ ” de 0.03 gr/cm^3 para obtener el valor máximo que se obtiene con el Método de Cono de Arena para en caso de la densidad.

5.2. Recomendaciones.-

- Al momento de realizar las pruebas independientemente del método, se debe evitar cualquier tipo de vibración en el área de ensayo, ya que provoca un exceso de arena calibrada dentro del agujero, para el ensayo del método de la

arena y el rebote del aparato permite que los rayos gamma se escapen, en el caso de la medición con el densímetro nuclear.

- El tiempo de realización de una prueba por el método de la arena es de aproximadamente 30-40min (en campo), es por eso que al extraer el material de suelo en donde se concluye dicho ensayo y al ser colocado en la tara metálica debe ser cubierto, lo cual permitirá que la humedad del suelo no se evapore, debido a la temperatura ambiente, provocando que el contenido de humedad sea el correcto.
- Si se cuenta con un densímetro nuclear, es importante que se tenga el debido compromiso para establecer una política de seguridad de acuerdo a la legislación vigente, con el fin de evitar accidentes radiológicos.
- Debido al peligro que se sufre en el manejo del densímetro nuclear, se recomienda que la persona que realice el ensayo, deba estar alejada del mismo por lo menos a una distancia de 3 a 4m, para evitar que los rayos gamma (radiación) afecten su organismo.
- Al momento de determinar el porcentaje de compactación y el contenido de humedad con el densímetro nuclear, se recomienda que el terreno sobre el cual se realizará el ensayo, debe de encontrarse totalmente horizontal, libre de agujeros, sin vibraciones y sin capas de material suelto sobre la misma, para que los rayos gamma (radiación) no se escapen y la prueba se realice exitosamente.
- Un densímetro nuclear siempre debe ser usado por un operador autorizado que tenga los conocimientos respectivos, tanto del uso como de los riesgos que implica la manipulación de dicho aparato. Es por tanto que si una empresa cuenta con un operador autorizado y cumple con la normativa vigente estaría previniendo todo accidente radiológico que tiene como consecuencias daños a las personas y por consiguiente al ambiente.

- La calibración continua en ambos métodos es de suma importancia, debido a que como anteriormente se mencionó, a una mayor calibración, un mejor resultado. En el método de la arena es necesario conocer que si se deja pasar mucho tiempo desde la calibración de los equipos y la arena, puede ser que la arena calibrada de Ottawa adquiera humedad, lo cual variará la densidad de la misma, dando como resultado datos erróneo.
- Debido a que la arena calibrada de Ottawa se rescata del agujero, luego de varios ensayos está altamente contaminada, es por eso que se recomienda tamizarla periódicamente por la malla número 16. Teniendo en cuenta que la suciedad de la arena, también puede influir en los resultados.
- Contar siempre con equipos adecuados, y en buenas condiciones, con sus formas geométricas en excelente estado, es decir, sin abolladuras, sin perforaciones, etc. Debido a que muchos instrumentos por el excesivo uso se deterioran rápidamente. Por tanto, siempre hay que estar pendiente de sus reposiciones, para obtener buenos resultados.
- Mantener cuidado y ser precisos al momento de anotar las cantidades y calcular los resultados obtenidos según los ensayos aplicados, ya que la equivocación puede ser muy fácil, provocando datos erróneos y absurdos.