

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.-

Para reducir el porcentaje de vacíos de un suelo y mejorar sus propiedades mecánicas como la resistencia al corte, la compresibilidad y el potencial de expansión, se realizan diferentes procedimientos o ensayos de compactación de suelos, logrando conseguir una estructura de máxima densidad que presenta deformaciones mínimas cuando se somete a diferentes cargas. La finalidad del trabajo es un análisis experimentalmente mediante metodología alternativa para suelos no cohesivos mediante método vibratorios en laboratorio.

Muchos parámetros del suelo no son constantes, sino que dependen de distintos factores como el nivel tensional, el modo de deformación, etc. En algunos casos, por imposibilidad física o por la propia naturaleza de los materiales, es necesario recurrir a la definición de parámetros mediante correlaciones a partir de otro de indicadores.

Evidentemente siempre que se disponga de estas correlaciones, deben ser fehacientemente contrastadas. Dichas correlaciones se tiene que presentar con un sólido fundamento teórico y una clara base empírica de investigación a partir del mayor número posible de ensayos.

El método es aplicable a suelos en que la compactación por impacto no produce una curva bien definida de relación humedad – densidad y la densidad máxima por impacto resulta generalmente menor que la obtenida por métodos vibratorios.

La finalidad de estos ensayos es lograr la obtención de un análisis experimental, para ello se realizará la extracción de muestras de suelos en nuestro medio, el cual generarán resultados propios realizando pruebas de laboratorio que determinan las características del suelo mediante el ensayo de compactación por medio vibratorio con una granulometría variable de suelos no cohesivos.

1.2. Justificación.-

Se demostrará densidades máximas en la aplicación de suelos no cohesivos con granulometría variable. Para lo cual se hará una selección minuciosa de los agregados granulares es decir que se encuentren en los rangos establecidos por el investigador y basados en la bibliografía, se mantendrá la densidad máxima constante y se variará la granulometría mediante la compactación por método vibratorio

Consiguientemente se procederá buscar nuevas formas para la compactación más eficaz de suelos en laboratorio en menor tiempo, de tal manera poder determinar la densidad máxima seca,

La investigación propuesta permitirá en primera instancia definir una alternativa viable al problema, que cumpla con los objetivos, en lo que se refiere a la posibilidad de obtención de una correlación, al no ser realizada correctamente la densidad máxima es causante de la aparición de grietas en muros, aceras, edificios, carreteras, etc.

1.3. Determinación del problema.-

¿Cuál es la densidad máxima de una granulometría utilizando el método vibratorio para suelos no cohesivos?

1.4. Situación problemática.-

En Tarija tiene estratos material granular que al realizar proyectos a veces es necesario compactar este tipo de suelo y al no ser realizada correctamente es la causante de la aparición de grietas en estructuras.

Las construcciones más afectadas o más propensas a sufrir daños por la presencia de suelos mal compactados son las casas de interés social, muros, aceras, edificios de poca altura, carreteras, pistas de aterrizaje, etc. en los que por a las presiones transmitidas al [terreno](#), se produce la aparición de fisuras, las mismas pueden incrementar su magnitud de difícil y costosa reparación, e incluso puede provocar el colapso completo de la estructura ocasionando inseguridades a los usuarios, por esta razón es muy importante minimizar estos

efectos a través del estudio de alternativas de ensayos de laboratorio que representen mejor los procesos de compactación realizados en campo.

Dónde es necesario obtener la densidad máxima en laboratorio un tiempo reducido y en algunos casos no se cuenta con la cantidad necesaria de muestra del lugar por diferentes motivos por lo cual al no haber suficiente muestra de material se produce la mala obtención de resultados al usar la misma muestra compactada para obtener la curva de compactación.

En estos casos es necesario contar con un ensayo que requiera mayor exactitud y para obtener la curva de compactación por lo cual se pudo observar que el método vibratorio es un ensayo eficaz para y que requiere poco tiempo para obtener estos resultados.

1.5. Objetivos del trabajo.-

1.5.1. Objetivo general.-

- ❖ Determinar la correlación entre densidad máxima y granulometría de suelos no cohesivos, utilizando el método vibrado de compactación de tal manera se establezca una ecuación o modelo matemático de fácil aplicación para la ingeniería.

1.5.2. Objetivo específico.-

- ❖ Determinar la cantidad de bancos de suelo a estudiar para la obtención de densidad máxima de la ciudad de Tarija.
- ❖ Determinar el rango de tamaño de las partículas presentes en el suelo por medio de un análisis granulométrico.
- ❖ Establecer las principales características del equipo de la mesa vibratoria y su Funcionamiento.
- ❖ Determinar los asentamientos de las diferentes granulometrías.
- ❖ Realizar la curva de correlación de la densidad máxima vs granulometría del suelo.

- ❖ Analizar la densidad máxima mediante la granulometría.

1.6. Hipótesis.-

La metodología asumida nos podrá determinar la densidad máxima de suelos no cohesivos mediante la granulometría en un menor tiempo utilizando el tipo de ecuación que tenga mejor correlación de datos.

1.7. Alcance.-

El trabajo estará enmarcado dentro del siguiente alcance y limitaciones:

- Los ensayos de la clasificación de suelo será los establecidos por la AASTHO como granulometría.
- Se realizaron los ensayos de densidad máxima seca para los tamices 2½”, 2”, 1½”, 1”, ¾”, ½”, ⅜” , N°4, N°10, N°40 y N°200 para material de canto rodado.
- Se realizaron los ensayos de densidad máxima seca para los tamices 1”, ¾”, ½”, ⅜” y N°4 para material de chancadoras.
- La investigación abordará el diseño mediante ensayos de laboratorio, de la compactación método de la mesa vibratoria procedimiento de los ensayos estarán basados en el manual de instrucción de la empresa CONTROLS (Densidades máximas y mínimas de suelos sin cohesión **33-T0063**).
- Se determinará la probabilidad mediante el método estadístico que consistirá en la realización como mínimo de 30 pruebas para cada granulometría el cual nos determine datos reales.
- Para la realización de los ensayos de densidad máxima se tomará en cuenta cinco diferentes bancos de la ciudad de Tarija

1.8. Diseño Metodológico.-

1.8.1. Unidad de estudio y decisión muestral.-

1.8.1.1. Unidad de Estudio.- (ensayo de densidad máxima seca).-

La unidad a estudiarse es el proceso de correlación determinando la densidad máxima seca en laboratorio, en suelos no cohesivos que tienen como finalidad incrementar las características de resistencia de los suelos, aumentando así su capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellas.

1.8.1.2. Población.- (Agregados granulares)

Los suelos granulares se los extraerá el material que tenga las características específicas que requiere la investigación a realizarse, como por ejemplo la no plasticidad, la no cohesión, la densidad, granulometría, la porosidad de los agregados gruesos, para este estudio se tomará en cuenta agregado grueso de canto rodado y chancado.

Banco de Materiales:

- ✓ Río Guadalquivir altura Tarija.
- ✓ Río Guadalquivir altura San Lorenzo.
- ✓ Quebrada la Victoria.

Chancadoras:

- ✓ 16 enero ubicada en el barrio San Blas.
- ✓ Erika ubicada en carretera Tarija-San Lorenzo.

1.8.1.3. Muestra.- (material granular no cohesivos).

La muestra comprenderá en la utilización de distintos tipos de suelos granular a estado seco para la compactación manteniendo una energía constante mediante el método de mesa vibratoria para suelos no cohesivos.

Los suelos empleados para el análisis de la correlación dependerán del tamaño de las partículas y sus propiedades físico Se realizarán 30 muestras variando la granulometría del suelo y luego se procederá a encontrar los distintos valores de densidad máxima seca óptima.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. La densidad de los suelos.-

La densidad es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa, cuanto mayor es la densidad relativa, menor es la deformación y mayor la resistencia. En materiales granulares, el estado de compactación del suelo se determina por medio del parámetro densidad relativa, la cual está en función del peso unitario seco máximo, peso unitario seco mínimo y el peso unitario seco in- situ.

La densidad húmeda y la densidad seca de los suelos son valores importantes para los ingenieros geotécnicos al momento de determinar los esfuerzos ante sobrecarga, los índices de poros, la compactación máxima y la compactación porcentual de los suelos. El valor de la densidad también puede ayudar a evaluar la resistencia y sensibilidad del suelo.

En ocasiones puede resultar útil referirse a la densidad seca del material, considerada como la relación entre la masa de las partículas sólidas y el volumen total del suelo. Dado que la humedad del terreno puede ser variable, considerar la densidad seca permite establecer un criterio comparativo entre suelos más o menos compactos con referencia a un valor determinado de densidad como máxima. Un ejemplo habitual es la valoración del grado de compactación de un terreno colocado en un relleno controlado, para la cual se compara la densidad seca “in situ” con la densidad seca máxima obtenida mediante un ensayo de referencia (habitualmente el denominado Proctor.)

Se denomina densidad aparente de un suelo a la relación entre su masa total (partículas sólidas y agua que haya en los poros) y su volumen:

$$\gamma_a = (W_s + W_w) / V$$

Se denomina densidad seca de un suelo a relación entre la masa de las partículas y el volumen total del suelo:

$$\gamma_d = W_s / V$$

Se denomina densidad saturada de un suelo a la masa total de las partículas y del agua que ocupa la totalidad de los poros, dividida por el volumen total.

$$\gamma_{sat} = (W_s + W_w sat) / V$$

Se entiende por densidad sumergida (γ') de un suelo a su densidad saturada menos la densidad del agua (γ_w).

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Se pueden relacionar los diferentes parámetros referidos a la densidad con la porosidad (n), y la humedad (w), mediante las siguientes expresiones:

$$\gamma_d = \gamma(1 - n)$$

$$\gamma_a = \gamma(1 - n)(1 + w)$$

$$\gamma_{sat} = \gamma(1 - n) + n\gamma_w$$

$$\gamma' = (\gamma - \gamma_w)(1 - n)$$

La densidad aparente de una muestra de suelo se calcula mediante la determinación del peso en una balanza de precisión adecuada, y del volumen de la muestra. Para lo segundo puede recurrirse a diversos procedimientos:

- Tallado de una probeta de geometría regular (cálculo del volumen a partir de dicha geometría).
- Determinación del peso sumergido de una muestra que se ha parafinado previamente (la parafina evita que el agua penetre en la probeta), y estimación del volumen por diferencia respecto al peso al aire (según el principio de Arquímedes), deduciendo el volumen de parafina por diferencia de pesada antes y después del parafinado (conociendo previamente la densidad de la parafina.).

Una vez conocida la densidad aparente y la humedad (por el procedimiento del secado a la estufa) pueden calcularse el resto de parámetros relativos al peso específico (densidad seca, densidad saturada, etc.).

Los métodos indicados son apropiados para la determinación de la densidad de suelos coherentes, de los cuales es factible la obtención de muestras representativas que mantengan inalterada la estructura del material.

Para suelos granulares de los que no es factible la obtención de muestras inalteradas mediante procedimientos convencionales, es usual valorar, en lugar de la densidad, la densidad relativa (D_r) o índice de densidad mediante la estimación empírica a partir del resultado de ciertos ensayos “in situ”.

La densidad máxima de los suelos.-

Densidad de un suelo en el estado más denso que se puede obtener aplicando el ensaye normalizado.

La densidad mínima de los suelos.-

Densidad de un suelo en el estado más suelto que se puede obtener aplicando el ensaye normalizado.

2.1.1. Densidad in-situ.-

El ensayo permite obtener la densidad de terreno y así verificar los resultados obtenidos en faenas de compactación de suelos, en las que existen especificaciones en cuanto a la humedad y la densidad. Entre los métodos utilizados, se encuentran el método del cono de arena, el del balón de caucho e instrumentos nucleares entre otros. Tanto el método del cono de arena como el del balón de caucho, son aplicables en suelos cuyos tamaños de partículas sean menores a 50 mm. y utilizan los mismos principios, o sea, obtener el peso del suelo húmedo (P_{hum}) de una pequeña perforación hecha sobre la superficie del terreno y generalmente del espesor de la capa compactada. Obtenido el volumen de dicho agujero ($Vol. Exc$), la densidad del suelo estará dada por la siguiente expresión:

$$\gamma_{\text{hum}} = P_{\text{hum}} / \text{Vol. Exc (grs/cc)}$$

Si se determina luego el contenido de humedad (w) del material extraído, el peso unitario seco será:

$$\gamma_{\text{seco}} = \gamma_{\text{hum}} / (1 + w) (\text{grs/cc})$$

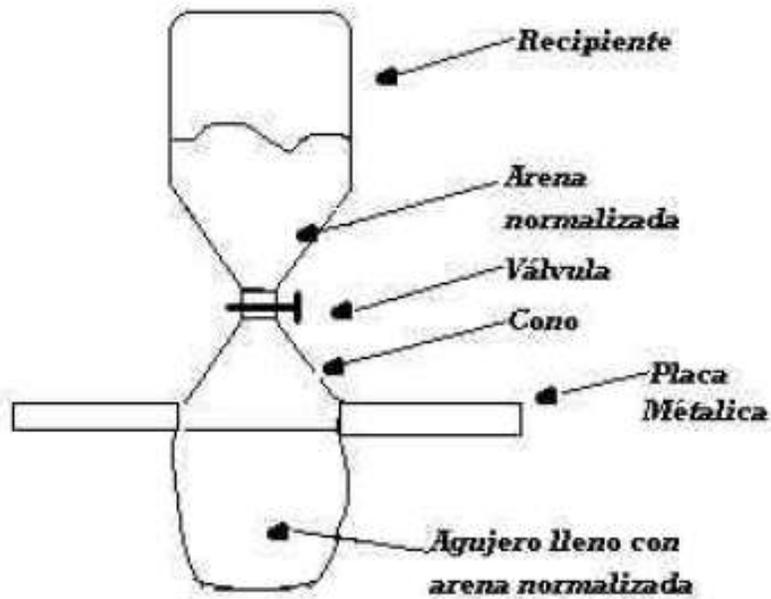
Densidad seca del suelo in situ que puede ser de un suelo natural o de un material de relleno que está siendo compactado; la dificultad en la determinación de la densidad seca reside en la determinación del volumen ocupado por el suelo in situ, para lo cual existen diversos métodos; entre ellos, el método del cono de arena que es el de uso más frecuente y que corresponde a una determinación de la densidad realizada en terreno (se detalla en un ítem aparte en esta guía).

Un suelo natural o compactado requiere la determinación de la densidad in situ. En la mayoría de los casos, esta determinación se realiza utilizando el método del cono de arena. Otros métodos son el del balón de goma y equipos nucleares.

El cono de arena consiste de un recipiente cilíndrico de metal que continúa hacia abajo con un doble cono, es decir, simétrico con respecto a la válvula, acompañado de una placa metálica con una abertura al centro circular de igual diámetro que la base invertida del cono.

Método del Cono de Arena

Figura 2.1 Equipo del cono de arena



Fuente: Cuevadelcivil.com

En terreno, se excava un agujero de aproximadamente 12-14 cm. de profundidad y un diámetro igual a la abertura circular de la placa, la que se coloca horizontalmente sobre la superficie. Esta placa, que tiene rebordes, permite asegurar que no se pierda material en el proceso de excavación, material que deberá ser pesado para obtener WT ; su humedad, w , deberá ser determinada para obtener el peso total seco WS .

$$W_s = \frac{W_T}{1 + w}$$

Habiendo determinado el peso del total de la “arena normal” (W_1), se coloca sobre el agujero abriéndose la válvula. Una vez que el agujero y el cono inferior se llenan de “arena normal”, se determina el peso de la arena no utilizada (W_2), de modo que:

$$W_3 = W_1 - W_2$$

Dónde:

W_3 = peso de la arena para llenar el agujero y el cono inferior.

El volumen del hueco excavado se determina ahora como:

Dónde:
$$V_{\text{hueco}} = \frac{W_3 - W_c}{\gamma_{d(\text{arena})}}$$

W_c = peso de la arena para llenar únicamente el cono inferior.

γ_d (arena) = peso unitario seco de la arena normalizada.

Los valores de W_c y γ_d (arena) son determinados a partir de la calibración hecha en laboratorio.

Finalmente, el peso unitario seco del suelo in situ se determina a través del peso unitario húmedo:

$$\gamma_{\text{hum}} = \frac{W_T}{V_{\text{hueco}}}$$

Dónde:

W_T : Peso del suelo húmedo.

V_{hueco} : Volumen del hueco.

Con el contenido de humedad w del material excavado, el peso unitario seco del material es:

$$\gamma_{\text{seca}} = \frac{\gamma_{\text{hum}}}{1 + w}$$

2.1.2. Densidad absoluta.-

La densidad o densidad absoluta es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. Su unidad en el Sistema Internacional es kilogramo por metro cúbico (kg/m^3), aunque frecuentemente también es expresada en g/cm^3 . La densidad es una magnitud intensiva.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Siendo ρ , la densidad; m , la masa; y V , el volumen de la sustancia.

2.1.3. Densidad relativa.-

La densidad relativa es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de otra que se toma como referencia. Ambas densidades se expresan en las mismas unidades y en iguales condiciones de temperatura y presión. La densidad relativa es adimensional (sin unidades), ya que queda definida como el cociente de dos densidades.

A veces se la llama densidad específica (del inglés specific density) especialmente en los países con fuerte influencia anglosajona. Tal denominación es incorrecta, por cuanto que en ciencia el término "específico" significa por unidad de masa.

Densidad referida a un valor de un material determinado, y cuyo valor se obtiene mediante el cociente de los valores de densidad del material y del que se toma como referencia. Las referencias más usadas son el agua para las densidades de líquidos, y el aire para las densidades de gases. Si se trata de otras sustancias como referencia, deben indicarse específicamente al expresar un valor. Es una magnitud adimensional.

La densidad relativa está definida como el cociente entre la densidad que primordialmente es de una sustancia y la de otra sustancia tomada como referencia:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$$

Dónde ρ_r es la densidad relativa, ρ es la densidad absoluta y ρ_0 es la densidad de referencia.

La densidad relativa es una propiedad índice de estado de los suelos que se emplea normalmente en gravas y arenas, es decir, en suelos que contienen reducida cantidad de partículas menores que 0.074 mm. (malla # 200). La densidad relativa indica el grado de compactación del material y se emplea tanto en suelos naturales como en rellenos compactados.

Según la norma chilena, el porcentaje de finos no debe sobrepasar un 12% para que la densidad relativa sea aplicable. Para mayores contenidos de finos se utiliza por tanto el ensayo de compactación. La razón de esta limitación reside en la ineficacia del procedimiento de vibrado utilizado en la determinación de la densidad máxima. En casos límites, se recomienda realizar, tanto el ensayo de densidad relativa como el de compactación, cuando el porcentaje de finos se encuentra entre 10 y 12%, conservando los resultados del mejor de ellos. Hay que hacer notar que el ensayo de densidad relativa puede ser válido en suelos que superan el contenido de finos indicado cuando éstos no poseen plasticidad alguna, como es el caso de algunos materiales de relaves (residuos de la lixiviación de minerales, por ejemplo, de cobre) y finos tales como el polvo de roca.

La densidad relativa tiene gran aplicación en geotecnia debido a las correlaciones que existen con otros parámetros de ingeniería tales como el ángulo de roce interno y la resistencia a la penetración de cuchara normal. Por otra parte, muchas fórmulas que permiten estimar los asentamientos posibles de estructuras fundadas sobre suelos granulares, están basadas en la densidad relativa. Existen sin embargo dificultades para determinar la densidad relativa en suelos granulares de grandes tamaños.

Ya que la obtención de muestras inalteradas en suelos granulares resulta impracticable, a menos que ellas sean obtenidas por procedimientos tan especiales y costosos como el congelamiento, la densidad relativa adquiere importancia porque permitiría reproducir esta condición de estado en el laboratorio.

Los valores de la densidad relativa dan idea del grado de compacidad de un suelo granular. Es de gran utilidad, pues la resistencia y la deformabilidad de una arena dependen casi exclusivamente de su densidad relativa.

2.1.4. Densidad aparente.-

La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales de constitución heterogénea, y entre ellos, los porosos como el suelo, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire u otra sustancia, de forma que la densidad total de un volumen del material es menor que la densidad del material poroso si se compactase.

En el caso de un material mezclado con aire se tiene:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ap}}{V_{ap}} = \frac{m_r + m_{aire}}{V_r + V_{aire}}$$

La densidad aparente de un material no es una propiedad intrínseca del material y depende de su compactación. La densidad aparente del suelo (ρ_{ap}) se obtiene secando una muestra de suelo de un volumen conocido a 105 °C hasta peso constante.

$$\rho_{ap} = \frac{W_{SS}}{V_S}$$

Dónde:

W_{SS} , Peso de suelo secado a 105 °C hasta peso constante.

V_S , Volumen original de la muestra de suelo.

Se debe considerar que para muestras de suelo que varíen su volumen al momento del secado, como suelos con alta concentración de arcillas 2:1, se debe expresar el contenido de agua que poseía la muestra al momento de tomar el volumen.

En construcción se considera la densidad aparente de elementos de obra, como por ejemplo de un muro de ladrillo, que contiene ladrillos, mortero de cemento o de yeso y huecos con aire (cuando el ladrillo es hueco o perforado).

Tabla 2.1 Valores comunes de densidad aparente

Suelos orgánicos: 0,1 - 0,6 g/cm ³
Suelos superficiales, texturas finas: 1,0 - 1,3 g/cm ³

Suelos superficiales, texturas gruesas: 1,0 - 1,8 g/cm ³
Suelos compactados: hasta 2,0 g/cm ³
Suelos franco arcillosos: 1,0 - 1,4 g/cm ³
Suelos franco limosos: 1,1 - 1,4 g/cm ³
Suelos franco arenosos: 1,2 - 1,8 g/cm ³
Suelos volcánicos: 0,3 - 0,85 g/cm ³

Fuente: Rico Castillo “Tomo I”

2.2. Características de los suelos.-

2.2.1. Suelos y rocas: origen del suelo.-

La mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por la meteorización de las rocas. Los geólogos emplean el término meteorización de las rocas para describir todos los procesos externos, por medio de los cuales la roca experimenta descomposición química y desintegración química y desintegración física, proceso mediante el cual masas de roca se rompen en fragmentos y pequeños. Esta fragmentación continua es un mero cambio físico y por eso se llama también meteorización mecánica. Por otra parte, la meteorización química de una roca es el proceso de descomposición, mediante el cual los minerales constitutivos de rocas allí presentes cambian de composición química. En la descomposición, los minerales persistentes se transforman en minerales de composición y propiedades físicas diferentes. Es preciso indicar que la desintegración física completa la descomposición, ya que los minerales y partículas rocosas de menor tamaño producidos por meteorización mecánica son mucho más susceptibles al cambio químico que los granos minerales firmemente soldados en grandes masas de roca compacta.

La meteorización mecánica es el proceso por el cual las rocas se fracturan en piezas de menor tamaño bajo la acción de las fuerzas físicas, como la corriente de agua de los ríos, viento,

olas oceánicas, hielo glacial, acción de la congelación, adelas de expansión y contracciones causadas por ganancia y pérdida de calor.

La meteorización química es el proceso de descomposición química de la roca original. Entre los distintos procesos de alteración química pueden citarse: la hidratación (paso de anhidrita a yeso), disolución (de los sulfatos en el agua), oxidación (de minerales de hierro expuestos a la intemperie), cementación (por agua contenido carbonatos), etc. Por ejemplo, la meteorización química de los feldspatos puede producir minerales arcillosos.

Muy relacionada con la meteorización química se encuentra la meteorización biológica producida fundamentalmente por la actividad bacteriana, originando putrefacción en materiales orgánicos.

La acción conjunta individual de estos procesos de meteorización da lugar un perfil de meteorización de la roca en función de la profundidad (ver figura adjunta). En este perfil la roca sana ocupa la zona más profunda, transformandose gradualmente a suelo hacia la parte más superficial.

Figura 2.2 Perfil de meteorización

PERFIL ESQUEMÁTICO	LOVE (1951) LITTLE (1981)	VARGAS (1981)	SOWERS (1984, 1983)	CHANDLER (1988)	GEOLOGICAL SOC. ENGL. GROUP (1970)	DEERE Y PRITTON (1971)
	ROCAS IGNEAS	IGNEAS, BASÁLTICAS Y ARENISCAS	IGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS IGNEAS	IGNEAS Y METAMÓRFICAS
	VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	IV COMPLETAMENTE ALTERADA	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	IV a	V COMPLETAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IB
	IV ALTAMENTE ALTERADA	CAPAS DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA	III	IV ALTAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IC (SAPROLITO)
	III MODERADAMENTE ALTERADA				III MODERADAMENTE ALTERADA	IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA (SAPROLITO)
	II ALGO ALTERADA	ROCA SANA	ROCA SANA	ROCA INALTERADA	II DEBILMENTE ALTERADA	II PARCIALMENTE METEORIZADA
	I ROCA SANA				III MUY POCO ALTERADA	III ROCA SANA
				I ROCA SANA		

Fuente: Diversas fuentes

Así por ejemplo observación de una trinchera recién abierta (una excavación para una carretera, una pared de cantera, etc.), a menudo revela una secesión de capas de diferentes materiales térreos. En la base del afloramiento puede haber roca compacta denominada roca firme, se encuentra todavía en su lugar de origen y está relativamente poco modificada. La roca firme suele presentar innumerables grietas denominadas juntas o diaclasas, que son consecuencia de esfuerzos principalmente asociados a una historia anterior de procesos

tectónicos. Allí donde existen familias de junta que se cruzan, la roca firme se desintegra fácilmente en bloques.

Por encima de la roca firme puede haber una capa de materia mineral blanca denominada regolita. (El prefijo rego viene de la palabra griega que significa “manto”). La regolita puede formarse in situ por descomposición y desintegración de la roca firme inmediatamente subyacente; este tipo se denomina regolita residual o suelo residual. Si esta capa de partículas minerales relativamente suelta o blandas dispuestas sobre la roca firme, es transportadas por agentes tales como corrientes de agua, hielo, viento, olas..., recibe de regolita transportada o suelo sedimentario.

2.2.1.1. Suelos residuales.-

Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de las rocas no son transportadas como sedimentos, sino que se acumulan in situ. Si la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de descomposición, se produce una acumulación de suelo residual. Entre los factores que influyen sobre la velocidad de alteración en la naturaleza de los productos de meteorización están el clima (temperatura y lluvia), el tiempo, la naturaleza de la roca original, la vegetación, el drenaje y la actividad bacteriana. Los suelos residuales suelen ser más abundantes en zonas húmedas, templadas, favorables al ataque químico de las rocas y con suficiente vegetación para evitar que los productos de meteorización sean fácilmente arrastrados.

2.2.1.2. Suelos sedimentarios.-

La formación de los suelos sedimentarios puede explicarse más adecuadamente considerando la formación, el transporte y el depósito de los sedimentos.

El modo principal de la formación de sedimentos lo constituye la meteorización física y química de las rocas en la superficie terrestre. En general, las partículas de limo, arena y grava se forma por la meteorización física de las rocas, mientras que las partículas arcillosas proceden de la alteración química de las mismas.

Los sedimentos pueden ser transportados por cualquiera de los cinco agentes siguientes: agua, aire, hielo, gravedad y organismos vivos. El transporte afecta a los sedimentos de dos formas

principales: a) modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución; b) produce una clasificación o graduación de las partículas. Después de que las partículas se han formado y han sido transformadas se depositan para formar un suelo sedimentario. Las tres causas principales de este depósito en el agua son la reducción de la velocidad, la disminución de la solubilidad y el aumento de electrolitos. Cuando una corriente de agua desemboca en un lago, océano, etc., pierde la mayor parte de su velocidad. Disminuye así la fuerza de la corriente y se produce una sedimentación. Cualquier cambio en la temperatura del agua o en su naturaleza química puede provocar una reducción en la solubilidad de la corriente, produciéndose la precipitación de algunos de los elementos disueltos.

Figura 2.3 Esquema del proceso de formación de los suelos



Fuente: Diversas fuentes

Por tanto, el suelo es el resultado del proceso de meteorización de las rocas con o sin transporte de los productos de alteración. Los suelos se caracterizan fundamentalmente por los siguientes aspectos:

- Los suelos están formados por partículas pequeñas (desde micras a algunos centímetros) e individualizadas que pueden considerarse indeformables.

- Entre estas partículas quedan huecos con un volumen total de orden de magnitud del volumen ocupado por ellas (desde la mitad a varias veces superior).
- Un suelo es un sistema multifase (sólida, líquida y gaseosa).
- Los huecos pueden estar llenos de agua (suelos saturados), o con aire y agua (suelos semisaturados), lo que condiciona la respuesta de conjunto del material. En condiciones normales de presión y temperatura, el agua se considera incompresible.

2.3. Estructura de suelo

Clasificar los materiales para terracerías, que pueden ser fragmentos de roca o suelos, mediante pruebas índices, que permiten estimar algunas de las propiedades físicas y mecánicas del material y, con base en éstas, determinar su tipo de acuerdo con un sistema de clasificación de fragmentos de roca y suelos.

Los fragmentos de roca son todos aquellos cuyo tamaño está comprendido entre 7.5 cm (3") y 200 cm.

La clasificación de los fragmentos de roca y de los suelos en campo se realiza en forma visual, por lo que se requiere experiencia para clasificar los diferentes materiales. La experiencia se obtiene mediante la enseñanza de quien ya la tiene y comparando las clasificaciones hechas en campo con las obtenidas en el laboratorio.

Tabla 2.2 estructura del suelo

Forma	Redondeada
	Sub redondeada
	Angulosa
	Lajeada
	Acicular

Textura	Lisa Rugosa Muy rugosa
Grado de alteración	Sanos Alterados Muy alterados

Fuente: Rico Castillo “Tomo I”

La granulometría se extiende una muestra seca del material con tamaño menor de 7.5 cm, sobre una superficie plana con el propósito de estimar, en forma aproximada, los porcentajes de los tamaños de las partículas, forma y composición mineralógica. Para distinguir la grava de la arena se usa el tamaño de 5 mm como equivalente a la malla N° 4 y para los finos basta considerar que las partículas del tamaño correspondiente a la malla N°200 son aproximadamente las más pequeñas que pueden distinguirse a simple vista. Para esto se procede como sigue:

- a) Se determina el tamaño de la partícula mayor, que se considera como tamaño máximo.
- b) Según su tamaño las partículas de material se agrupan en:
 - Partículas mayores de 5 mm (grava).
 - Partículas comprendidas entre las de menor tamaño que pueda observarse a simple vista y 5 mm (arena).
 - Partículas del menor tamaño que se pueda observar a simple vista (finos).

Tabla 2.3: Clasificación de partículas

Granulometría	
Partícula	Tamaño
Limos	0,0039- 0,0625 mm
Arenas	0,0625-2 mm

Gravas	2-64 mm
--------	---------

Fuente: Rico Castillo "Tomo I"

c) Se determinan en forma aproximada los porcentajes de cada uno de los grupos mencionados en el punto anterior con relación al volumen total y con ellos se clasifica el suelo como grava, arena, fino o su mezcla.

d) Cuando se aprecia que las partículas de menor tamaño del que puede observarse a simple vista constituyen menos del 5% del volumen total, se estima la graduación del material, como bien graduada cuando se observe una amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios, y como mal graduada cuando se observe la predominancia de un tamaño o de un rango de tamaños, faltando algunos intermedios.

Tabla 2.4 : Tamaño de tamiz

Nro.	Abertura	Nro.	Abertura	Nro.	Abertura	Nro.	Abertura	Nro.	Abertura	Nro.	Abertura
5"	127.00	1 1/2"	38.10	3/8"	9.53	12	1.70	60	0.250	325	0.041
4.24"	107.70	1 1/4"	31.75	5/16"	7.94	14	1.40	70	0.212	400	0.035
4"	101.60	1.06"	26.92	0.265"	6.73	16	1.18	80	0.180	450	0.031
3 1/2"	88.90	1"	25.40	1/4"	6.35	18	1.00	100	0.150	500	0.028
13/4"	82.55	7/8"	22.23	4	4.75	20	0.85	120	0.125	635	0.021
3"	76.20	3/4"	19.05	5	4.00	25	0.71	140	0.106		
2 1/2"	63.50	5/8"	15.88	6	3.35	30	0.60	170	0.090		
2.12"	53.85	0.53"	13.46	7	2.80	35	0.50	200	0.075		
2"	50.80	1/2"	12.70	8	2.36	40	0.43	230	0.065		
1 3/4"	44.45	7/16"	11.11	10	2.00	50	0.36	270	0.053		

Fuente: Cuevadelcivil.com

e) Cuando se aprecia que las partículas de menor tamaño que pueden observarse a simple vista constituyen más del 12% del volumen total, para identificar el grupo fino del material, se toma la fracción del material que pasa la malla N° 40 (0.425 mm); si no se dispone de esta malla, el cribado puede sustituirse por una separación manual equivalente y se procede como se indica en los párrafos de Dilatación, Tenacidad, Resistencia en estado seco, Color y Olor.

2.3.1. Clasificación de suelos.-

Clasificar los materiales para terracerías, que pueden ser fragmentos de roca o suelos, mediante pruebas índices, que permiten estimar algunas de las propiedades físicas y mecánicas del material y, con base en éstas, determinar su tipo de acuerdo con un sistema de clasificación de fragmentos de roca y suelos.

2.3.1.1. Método de S.U.C.S.-

Los suelos son materiales con partículas de tamaño menor de 7.5 cm (3”). Se clasifican como se indica en la tabla de este manual y se explica a continuación, con base en su composición granulométrica y en sus características de plasticidad, representada por los límites de consistencia.

Los suelos se clasifican como suelos gruesos cuando más del 50% de sus partículas son de tamaño mayor que 0.075mm (malla N° 200) y como suelos finos cuando el 50% de sus partículas o más, son de tamaño menor.

Los suelos gruesos se clasifican como grava cuando más del 50% de las partículas de la fracción gruesa tienen tamaño mayor que 4.75 mm (malla N° 4) y como arena cuando el 50% de las partículas o más de la fracción gruesa, son de tamaño menor.

La grava se identifica con el símbolo G (Gravel) y la arena con el símbolo S (Sand). Ambas a la vez se subdividen en 8 subgrupos:

❖ Grava o arena bien graduada (GW o SW). Si el material contiene hasta 5% de finos, cuando se trate de una grava cuyo coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor de 4 y su coeficiente de curvatura (C_c) esté entre 1 y 3, se clasifica como grava bien graduada y se identifica con el símbolo GW. Cuando se trate de una arena cuyo coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor de 6 y su coeficiente de curvatura (C_c) esté entre 1 y 3, se clasifica como arena bien graduada y se identifica con el símbolo SW.

❖ Grava o arena mal graduada (GP o SP). Si el material contiene hasta 5% de finos y sus coeficientes de uniformidad y curvatura, no cumplen con lo indicado en el párrafo anterior, se clasifica como grava mal graduada o arena mal graduada, según corresponda y se identifica con los símbolos GP o SP, respectivamente.

contiene más del 12% de finos y estos son limo, se clasifica como grava limosa o arena limosa, según corresponda y se identifica con los símbolos GM o SM, respectivamente.

❖ Grava o arena arcillosa (GC o SC). Si el material contiene más del 12% de finos y estos son arcilla, se clasifica como grava arcillosa o arena arcillosa, según corresponda y se identifica con los símbolos GC o SC, respectivamente.

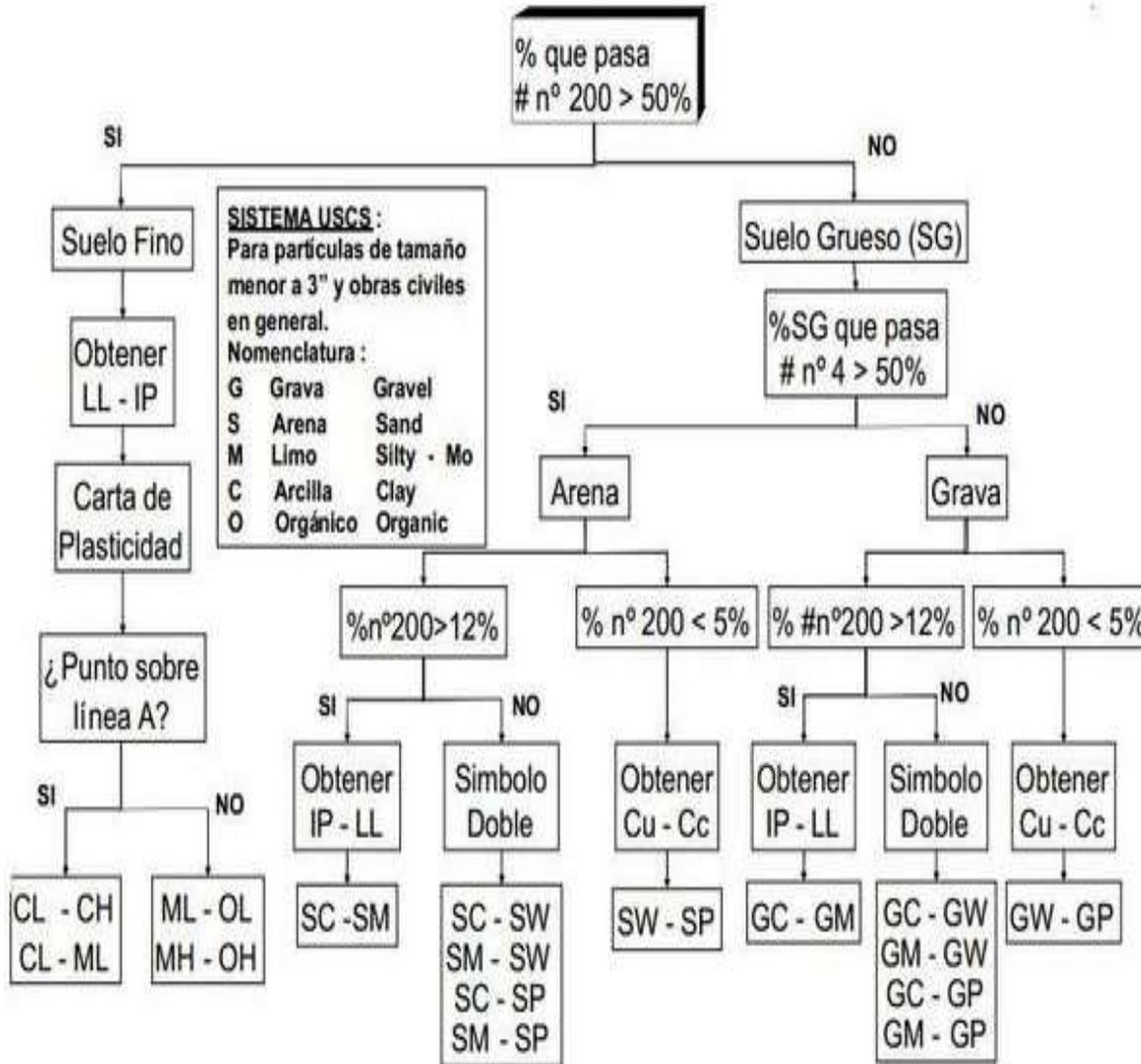
❖ Grava o arena bien graduada limosa (GW-GM o SW-SM). Si el material contiene entre 5% y 12% de finos y estos son limo, se trate de una grava bien graduada limosa y se identifica con el símbolo GW-GM. Cuando se trate de una arena, se clasifica como arena bien graduada limosa y se identifica con el símbolo SW-SM.

❖ Grava o arena mal graduada limosa (GP-GM o SP-SM). Si la grava o la arena son mal graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y estos son limo, se clasifican como grava mal graduada limosa o arena mal graduada limosa, según corresponda y se identifican con los símbolos GP-GM o SP-SM, respectivamente.

❖ Grava o arena bien graduada arcillosa (GW-GC o SW-SC). Si la grava o la arena cumplen con los requisitos de bien graduadas, excepto que contienen entre 5 y 12% de finos y estos son arcilla, se clasifican como grava bien graduada arcillosa o arena bien graduada arcillosa, según corresponda y se identifican con los símbolos GW-GC o SW-SC, respectivamente.

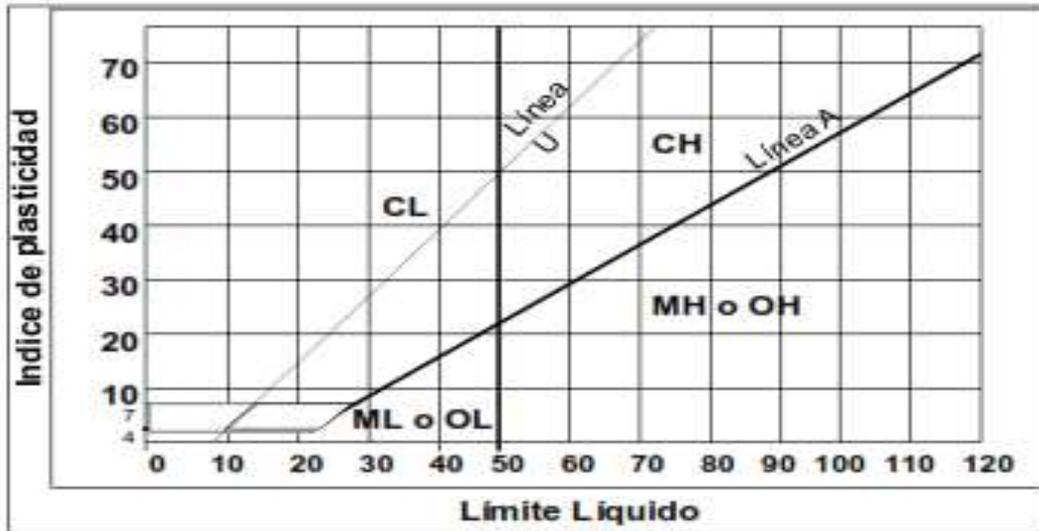
❖ Grava o arena mal graduada arcillosa (GP-GC o SP-SC). Si la grava o la arena son mal graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y estos son arcilla, se clasifican como grava mal graduada arcillosa o arena mal graduada arcillosa, según corresponda y se identifican con los símbolos GP-GC o SP-SC, respectivamente.

Tabla 2.5: Clasificación del sistema unificado (S.U.C.S.)



Fuente: Cuevadelcivil.com

Tabla 2.6 :Límites de attetberg carta de plasticidad



$$\text{Línea A} = 0,73 (LL - 20)$$

$$\text{Línea U} = 0,90 (LL - 8)$$

Fuente: Cuevadelcivil.com

2.3.1.2. Método de AASHTO.-

Este sistema fue desarrollado en 1929 como el Pública Road Administración Sistema (Sistema de Clasificación de Oficina de Caminos Públicos). Ha sufrido varias revisiones, con la versión actual propuesta por el comité para clasificación de materiales para sub-rasantes y caminos tipo granulares del consejo de investigaciones de carreteras en 1945, este sistema clasifica el suelo en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan el tamiz # 200. Los suelos de los que más del 35% de las partículas pasan el tamiz # 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, la mayoría de los cuales están formados por partículas de limo y arcilla.

Este sistema se basa los siguientes criterios, la plasticidad en el término limoso se aplica cuando las fracciones de suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos. El término arcilloso se aplica cuando es mayor de 10.

Canto rodado y boleos: Cuando hay tamaños mayores a 75 mm. Presente, estos se excluyen de la porción de la muestra de suelo que se está clasificando. Sin embargo el porcentaje de este material se registra.

Para clasificar un suelo de acuerdo con la tabla de clasificación, los datos de la prueba se aplican de izquierda a derecha. Por un proceso de eliminación, el primer grupo desde la izquierda en que los datos de prueba se ajusten, es la clasificación correcta.

a) Grueso granulares: 35% o menos pasa el Tamiz #200 comprende:

- ❖ A-1, si menos del 20% pasa el Tamiz #200 y menos del 50% pasa el Tamiz #40, pero el $IP < 6\%$.
- ❖ A-2, si menos del 35% pasa el Tamiz #200, (limoso o arcilloso), y el material no cumple con A-1 ni A-3.
- ❖ A-3, si menos del 10% pasa el Tamiz #200 y 51% o más pasa el Tamiz #40, pero el suelo es no plástico.

b) Suelos fino granulares (grupo limo arcilla): más del 35% pasa el Tamiz #200.

- ❖ A-4 si $IP \leq 10$ (limo) y $LL \leq 40\%$.
- ❖ A-5 si $IP \leq 10$ (limo) y $LL \geq 41\%$.
- ❖ A-6 si $IP \geq 11$ (arcilla) y $LL \leq 40\%$.
- ❖ A-7 si $IP \geq 11$ (arcilla) y $LL \geq 41\%$.

En consecuencia: A-1 = cascajo y arena; A-3 = arena fina; A-2 = cascajos y arenas limosas o arcillosas; A-4 y A-5 suelos limosos, y A-6 y A-7 suelos arcillosos. A-1 y A-3 son suelos excelentes y buenos, A-2 buenos y moderados, y A-6 y A-7 son suelos de moderados a pobres.

Tabla 2.7 : Para uso del sistema de clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla No. 200)						
	A-1			A-2			
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por cribado (porcentaje que pasa las mallas)							
No. 10	50 máx.						
No. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
No. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción que pasa la malla No. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos							
	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Tasa general de los subrasantes			De excelente a bueno				

Clasificación general	Materiales limo-arcilla (más del 35% de la muestra que pasa la malla No. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Clasificación de grupo	A-4	A-5	A-6	A-7
Análisis por cribado (porcentaje que pasa por las mallas)				
No. 10				
No. 40				
No. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa por la malla No. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Tasa general de los sobrantes	De mediano a pobre			
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$				
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$				

Fuente: Cuevadecivil.com

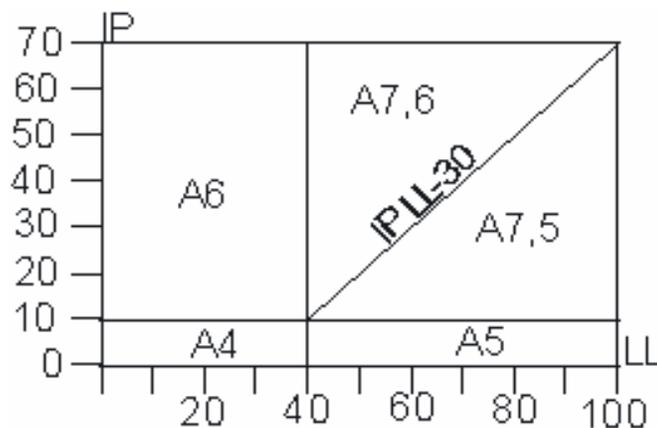
Pero estos suelos tienen subclases así:

A-1-a: si $IP < 6\%$ y además el Tamiz #200 = 15%, Tamiz #40 = 30% y Tamiz #10 = 50%

A-1-b: si es del grupo A1 y no cumple con A-1-a.

A-2-4; A-2-5, A-2-6, y A-2-7: Según la fracción fina se encuentre en las zonas 4, 5, 6 o 7 de la carta de plasticidad.

Tabla 2.8: Carta de Plasticidad AASHTO



Fuente: Cuevadecivil.com

Para la evaluación de la calidad del suelo, como material para sub-rasantes de

carreteras, se incorpora también un número llamado índice de grupo (GI) junto con los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe en paréntesis después de la designación del grupo. El índice de grupo está dado por la ecuación:

$$GI = (F - 35) [0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01 (F - 15) (PI - 10)$$

Dónde:

F: por ciento que pasa por la malla No. 200.

LL: límite líquido.

PI: índice de plasticidad.

El primer término de la ecuación es el índice de grupo parcial determinado a partir de límite líquido, el segundo es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice plástico.

A continuación un grupo de reglas para determinar el índice de grupo:

- ❖ Si la ecuación da un valor negativo $GI = 0$.
- ❖ El índice de grupo calculado se redondea al entero más cercano.
- ❖ No hay límite superior para el GI.
- ❖ El GI de suelos que pertenece a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 es cero.
- ❖ Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, use el índice de grupo parcial para PI.

$$GI = 0.01 (F - 15) (PI - 10)$$

En general la calidad del comportamiento de suelo como material para subrasantes es inversamente proporcional al índice de grupo.

2.3.2. Suelos no cohesivos.-

Los suelos no cohesivos son los formados por partículas de roca sin ninguna cementación, como la arena, grava y limo. Las partículas de suelo no tienden a juntarse ni adherirse.

2.3.3. Grava.-

Figura 2.4: Grava de canto rodado y chancada



Fuente: Propia

Grava chancada



Fuente: Propia

Grava canto rodado

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen, cuando son acarreadas por las aguas las gravas sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, en los márgenes y en los conos de deyección de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido re transportadas. Las gravas ocupan grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Sus partículas varían desde 7.62 cm (3") hasta 2.0mm.

La forma de las partículas de las gravas y su relativa frescura mineralógica dependen de la historia de su formación, encontrándose variaciones desde elementos rodados a los poliédricos.

2.3.4. Arena.-

Figura 2.5: Arena de canto rodado y chancada



Fuente: Propia

Arena chancada



Fuente: Propia

Arena canto rodado

La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro.

El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla. Las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.

2.3.5. Limo.-

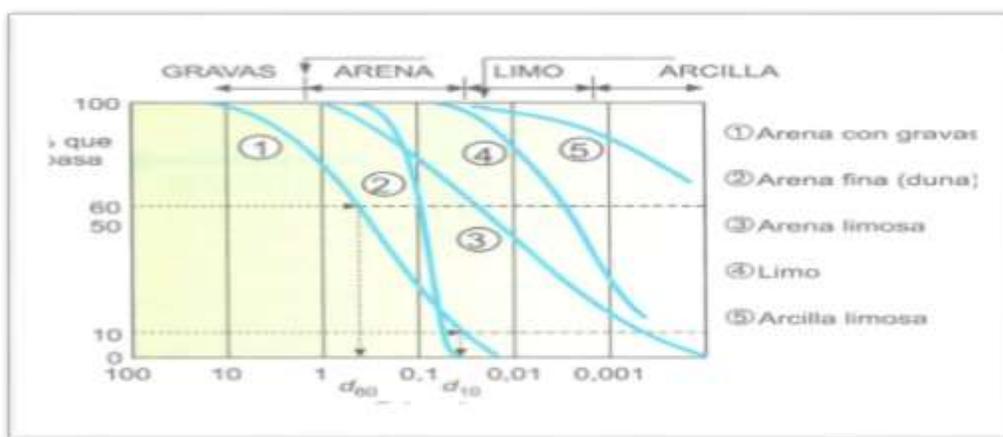
Figura 2.6: Características de limo



Fuente: Propia

Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.

Figura 2.7: Análisis granulométrico



Fuente: Diversas fuentes

2.4. Comportamiento de los suelos granulares.-

Los suelos son materiales complejos que exhiben un rango amplio de comportamientos mecánicos que dependen de la composición y estructura del suelo,

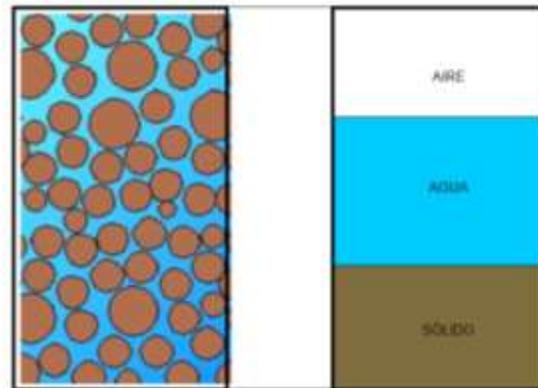
del historial de tensiones, de la densidad y de las características de la fuerza aplicada. Esta variedad de comportamientos del suelo nos obliga a clasificar los suelos en dos grupos: cohesivos y no cohesivos (o granulares). Los suelos granulares se definen como aquellos en los cuales las fuerzas inter granulares o atractivas tienen un efecto despreciable en el comportamiento mecánico observado. Esta categoría engloba a rocas, gravas y arenas. Basados en el estado de tensiones y en la estructura del suelo, normalmente definidos en función de la densidad relativa (D_r), del índice de huecos (e) ó de la porosidad (n), los suelos granulares además se clasifican en materiales densos o sueltos. En cambio, en los suelos cohesivos las fuerzas inter granulares o atractivas tienen un efecto significativo en el comportamiento mecánico observado. Esta categoría incluye a suelos de tipo arcilloso y limos. Basados en el historial de tensiones, normalmente definido en términos del índice de sobre consolidación, podemos clasificar los suelos cohesivos en suelos sobre consolidados o normalmente consolidados.

En este capítulo se presentan las relaciones entre tensión y deformación de los suelos no cohesivos (granulares). Además, se describe el fenómeno de la dilatación, el cual tiene un efecto importante en la resistencia volumétrica y tangencial de los suelos granulares. El ensayo triaxial se utiliza frecuentemente en la Mecánica del suelo, en los cuales unas muestras cilíndricas de suelo son sometidas a un estado axial simétrico de tensiones. Por esta razón, la respuesta cualitativa que se presenta en esta sección se basa en los resultados obtenidos en ensayos de este tipo. Al final de este capítulo describiremos más profundamente el ensayo triaxial.

Los suelos son, en general, materiales trifásicos constituidos por: (1) el esqueleto de partículas sólidas, rodeado de huecos interconectados que pueden estar ocupados por (2) aire y (3) agua (Figura 2.8). Un suelo con los huecos completamente ocupados por agua se denomina suelo saturado. Sin embargo, es posible que los huecos estén llenos de aire, sin nada de agua, entonces se define como suelo seco.

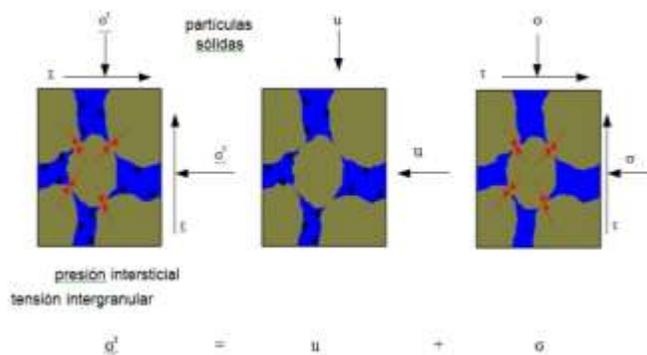
Figura 2.8: Fases de un suelo: Elemento de suelo en estado natural

(izquierda) y porciones de las tres fases en el mismo elemento de suelo (derecha).



Fuente: Diversas fuentes

Figura 2.9: Tensión total y efectiva en suelos saturados



Fuente: Diversas fuentes

La Mecánica de medios continuos define que el estado total de tensiones está formado por dos componentes: la tensión inter granular y la presión intersticial (Fig. 2.9). La tensión inter granular se denomina como la tensión efectiva. Si un suelo está totalmente saturado, la relación entre la tensión total, la tensión efectiva y la presión intersticial viene dada por:

$$\sigma = \sigma^t - u1$$

Dónde, σ^t =tensor de tensiones totales, σ =tensor de tensiones efectivas, u =presión intersticial, y 1 es tensor de segundo orden simétrico. El concepto de tensión efectiva es importante, ya que controla la respuesta mecánica del suelo.

2.4.1. Condición de drenaje.-

El agua y las partículas sólidas se consideran incompresibles en suelos totalmente saturados (suelos con los huecos completamente ocupados por agua). Por lo tanto, sólo si se escapase agua de los huecos se permitiría un cambio de volumen. Si las tensiones se aplican tan lentamente que se disipa fácilmente el exceso de presión intersticial, el suelo tiene la condición de drenaje. De esta forma, en un suelo con esta condición, cualquier cambio en la tensión total aplicada implica un cambio en la tensión efectiva y el espécimen sufre una deformación volumétrica. Por otro lado, bajo una condición sin drenaje, las cargas se aplican tan rápidamente que la presión intersticial no tiene tiempo a disiparse. Por lo tanto, si no se permite el drenaje, no puede haber ningún cambio de volumen y el suelo únicamente experimenta deformación tangencial, denominándose condición de volumen constante.

El objetivo de los subdrenajes para vías es evitar la saturación total de la estructura, captando, conduciendo y evacuando el agua que pueda entrar en la estructura del pavimento.

Esta especificación se refiere al uso de material granular en la construcción de sub drenes. La colocación de un material granular en contacto con el suelo permite el paso del agua, dentro del sistema de drenaje sub superficial reteniendo el suelo adyacente. Las características del material para filtración serán función de la gradación del suelo del sitio y de las condiciones hidráulicas del mismo.

2.4.2. Material granular filtrante.-

En el mundo y especialmente en Latino América, la creciente demanda de obras civiles durables y que permanezcan en buen estado hace que los ingenieros en la actualidad tengan que pensar en diseños óptimos de acuerdo con los mejores criterios internacionales de calidad. Un buen sistema de drenaje y/o subdrenaje está íntimamente relacionado con una mayor durabilidad de las obras. De hecho, la vida útil de las vías depende en gran parte del periodo de tiempo en que el exceso de agua esté presente en su estructura.

Determinar la ubicación y profundidad de la dirección del flujo, que puede ir en sentido longitudinal o transversal con respecto al eje de la vía. Para captar aguas subsuperficiales es conveniente tener en cuenta el diseño de un sistema de captación, que asegure la rápida llegada del agua al subdrén, verificando la velocidad de llegada. En la mayoría de los casos es recomendable especificar un sistema de subdrenaje compuesto por: geotextil – geored – geotextil; un material granular limpio de gradación abierta protegido por un geotextil, que cumpla la función de filtro; o por un geotextil de espesor considerable que tenga propiedades de drenaje planar. Lo anterior se debe a que los suelos de subrasante en la mayoría de los casos presentan permeabilidades muy bajas.

Estimar el caudal crítico para la longitud de descarga, el cual es la sumatoria de los caudales de aporte, que provienen del nivel freático y de infiltración. El agua de infiltración proviene de aguas lluvia y superficiales que se filtran directamente a través de la carpeta del pavimento o a través del suelo aledaño al tramo de vía en consideración.

Dimensionar la sección transversal del subdrén capaz de conducir la suma de los caudales de aporte, con una velocidad de evacuación adecuada.

Los sistemas de subdrenaje deben contar un sistema de filtración adecuado, que asegure una mayor vida útil del sistema y por consiguiente de la estructura del pavimento. El uso de los geotextiles ha venido desplazando los sistemas tradicionales de filtración, debido principalmente al aumento de la vida útil, facilidad de instalación, reducción de costos totales de la construcción y en general por ser un sistema constructivo ambientalmente eficiente.

La ubicación del subdrenaje, debe ser de tal manera que intercepten el agua lo más perpendicularmente posible. Lo anterior quiere decir, que en tramos dónde la pendiente longitudinal sea mayor que la pendiente de bombeo, es más eficiente colocar subdrenajes transversales. Esto debido a que el agua se moverá en dirección de la suma vectorial o resultante de las pendientes.

Podrá provenir de la trituración de roca o ser de cantos rodados, o una mezcla de ambos, y estará constituido por fragmentos duros y resistentes a la acción de los agentes del intemperismo.

Comparando estos dos agregados, podemos decir que con el canto rodado obtenemos una buena resistencia y mejor trabajabilidad por que las partículas se deslizarán muy fácilmente

llegando a esquinas y lugares difíciles para el concreto , en cambio con la piedra chancada obtenemos una excelente resistencia por sus aristas, porque entre las partículas habrá un mejor comportamiento frente a la compresión ya que estas presentan esquinas que hacen que sea difícil el deslizamientos entre partículas e impidiendo que se pueda llegar a quebrar el concreto , que un agregado redondeado “canto rodado” , pero la desventaja de la piedra chancada es su trabajabilidad pero esto se puede solucionar disminuyendo el tamaño de piedra.

En fin este es un tema que se llega a comprender mejor en obra, porque ahí es dónde veremos los problemas que se presentan y las soluciones que debemos de dar a estas en lo que respecta a un buen concreto

2.4.2.1. Canto rodado.-

Figura 2.10: Cantos rodados



Fuente : Propia

Un canto rodado o guijarro es un fragmento de roca suelto, susceptible de ser transportado por medios naturales (como las corrientes de agua, los corrimientos de tierra, etc). Aunque no se hace distinción de forma, en general, un canto rodado adquiere una morfología más o menos redondeada, subredondeada u oblonga, sin aristas y con la superficie lisa, debido al desgaste sufrido por los procesos erosivos, generalmente causados por la corrosión, las corrientes de agua (erosión hídrica) o el viento (erosión eólica). . También se conoce, en términos geológicos como un fragmento de roca con un diámetro mayor a 256 mm, es decir, más grande que un guijarro.

Usos

Se utilizan generalmente en la construcción para hacer revoques y pavimentos. Sus cantos planos son de gran utilidad para el apilamiento de material y su adherencia al hormigón o cemento los hacen muy útiles.

Los guijarros fueron usados como arma arrojadiza preferida por parte de los honderos.

Los guijarros chicos, llamados chinás o chinarrros, estos un poco más grandes, se usaron en la antigüedad con profusión –técnica del cosmatesco– para realizar solados artísticos; dibujos circulares, sogueados y otros efectos artísticos geométricos. Pueden hallarse en muchas de las iglesias rurales del norte de España. Igualmente en el sur de España fue empleado por los musulmanes de Granada y se conoce con el nombre de empedrado Granadino. Normalmente se hace con guijarros blancos en contraste con otros oscuros.

2.4.2.2. Material chancado

Figura 2.11: Material chancado



Fuente: Propia

La piedra triturada o roca angular es una forma de agregados de construcción, por lo general producida por la minería en un depósito de roca adecuada, dónde se rompe la roca removida hasta el tamaño deseado, con trituradoras. Es distinto de la grava que se produce por procesos naturales de meteorización y erosión y tiene una forma más redondeada. La piedra triturada angular es el material clave para la construcción de la carretera de macadán y su fuerza depende de la interdependencia de las caras de las piedras individuales angulares. La piedra natural triturada también se utiliza de manera similar sin una carpeta de ripio, balasto de ferrocarril y sin piedra de filtro. También se puede utilizar con una carpeta en un material compuesto, tales como hormigón o asfalto. La piedra triturada es uno de los recursos naturales más accesibles, y es una importante materia prima básica, utilizada por la construcción, la agricultura y otras industrias. A pesar del bajo valor de sus productos básicos,

la industria de la piedra triturada es un factor importante y un indicador del bienestar económico de una nación. La demanda de piedra triturada se determina principalmente por el nivel de actividad de la construcción y por la demanda de materiales de construcción. La piedra caliza de alta pureza y la dolomita es adecuada para usos especiales y son limitadas en muchas áreas geográficas.

Los diferentes tipos de roca triturada están hechos de materiales diferentes y cada una tiene sus propias características que pueden gustarle o no al comprador. Los tipos populares incluyen la piedra caliza, la piedra azul, el granito, la arenisca y el basalto. La piedra azul es el tipo más común de grava que se usa en la mayoría de las aplicaciones. Está disponible en varios tamaños para diferentes usos. Los tamaños estándar incluyen la roca triturada fina, conocida como polvo de roca, y los demás tamaños son los siguientes: 3/8 pulgadas (0,95 cm), 5/8 pulgadas (1,58 cm), 3/4 pulgadas (1,90 cm), 1 1/2 pulgadas (3,81 cm) y 2 1/2 pulgadas (6,35 cm).

Usos

Las piedras pequeñas se usan en las entradas para autos, en las mezclas de asfalto, en los sistemas sépticos y en los patios. Las piedras medianas se suelen usar en los drenajes, en el paisajismo y en los lugares de trabajo. Los tamaños más grandes se usan comercialmente en las canteras y en otras operaciones grandes. Los distribuidores comerciales suelen agregar pedazos de rocas trituradas para la construcción de calles, para renovaciones y para la mezcla de concreto. Todos los tamaños se usan en la construcción de casas y edificios, incluyendo la arena y otros tipos de piedra triturada. Los bordillos y las aceras se hacen de baldosas comerciales y se utilizan piedras trituradas en la base de su aplicación.

2.4.3. Granulometría para dren.-

El material drenante deberá estar constituido por partículas con tamaños comprendidos entre el tamiz de setenta y cinco milímetros (3") y el tamiz de diecinueve milímetros (3/4"). No se requiere ninguna gradación especial, permitiéndose el uso de fragmentos de un solo tamaño. Las partículas podrán ser angulares o redondeadas o una combinación de ellas.

El material deberá estar libre de partículas finas y de material orgánico. Como se indican los requisitos que deberá cumplir el material granular para filtros.

los trabajos se efectúen con una adecuada programación entre las actividades de apertura de la excavación y de construcción del subdrén, de manera que aquella quede expuesta el menor tiempo posible para evitar que el material in-situ alrededor de la excavación pierda sus condiciones iniciales y a la vez se disminuyan los riesgos contraídos con terceros durante la ejecución de la obra.

Será responsabilidad del Constructor la colocación de elementos de señalización preventiva en la zona de los trabajos, la cual deberá ser visible durante las veinticuatro (24) horas del día.

2.4.4. Estimación del caudal de diseño.-

Para diseñar subdrenaje laterales en una vía, se debe considerar primero la distancia entre alcantarillas o los sitios en dónde los subdrenajes realizan la descarga de agua. Para establecer las distancias de los tramos, se debe tener en cuenta que cada tramo conserve en lo posible, características similares, por ejemplo igual pendiente, condiciones geomorfológicas similares o condiciones geométricas de la vía similares. Entre más largo sea el recorrido del agua dentro de un subdrenaje, mayor tendrá que ser su capacidad de transporte debido a que a lo largo del subdrenaje se van sumando caudales de aporte.

Posteriormente se identifica las posibles fuentes a tener en cuenta para el cálculo del caudal total.

Los subdrenajes son sistemas que se utilizan para retirar el agua infiltrada o subterránea que ha entrado en la estructura. Un sistema eficiente de drenaje en vías se debe complementar con estructuras de drenaje superficial como son: cunetas, zanjas de coronación, trincheras drenantes, de manera que ayuden a reducir la infiltración del agua al subsuelo.

Los caudales de aporte que conforman el caudal total para el diseño de un subdrenaje en la estructura de un pavimento son:

- El caudal generado por la infiltración de agua lluvia.
- El caudal generado por el abatimiento del nivel de agua subterránea.

Es importante determinar adecuadamente las áreas aferentes para el cálculo del caudal por infiltración ya que muchas veces el subdrenaje puede captar agua de infiltración proveniente de los taludes aledaños.

2.4.5. Manejo ambiental.-

Todas las labores de fabricación de subdrenes de material granular se realizarán teniendo en cuenta lo establecido en los documentos o evaluaciones ambientales del proyecto y las disposiciones vigentes sobre la conservación del medio ambiente y los recursos naturales.

2.4.6. Calidad del material granular filtrante.-

De cada procedencia de los agregados pétreos y para cualquier volumen previsto se tomarán cuatro (4) muestras y de cada fracción de ellas se determinará el desgaste en la máquina de Los ángeles. Los resultados deberán satisfacer las exigencias indicadas. Si el material no cumple con la totalidad de los requisitos será rechazado.

Durante la etapa de producción, el Interventor examinará las descargas de los acopios y ordenará el retiro de los agregados que, a simple vista, presenten restos de tierra vegetal, materia orgánica y tamaños superiores o inferiores al máximo y al mínimo especificados.

La unidad de medida del material granular filtrante será el metro cúbico (m^3), aproximado a la décima de metro cúbico, de material suministrado y colocado en obra. El volumen se determinará multiplicando la longitud de la zanja, medida a lo largo del eje del subdrén, por el ancho de la misma y por la altura de colocación del material filtrante indicados en los planos del proyecto.

2.5. La compactación en los suelos.-

La energía que se requiere para compactar los suelos en el campo se puede aplicar mediante cualquiera de las cuatro formas que adelante se enumeran, las cuales se diferencian por la naturaleza de:

Figura 2.12: Curva de compactación obtenida en prueba dinámica de arenas limpias y gravas arenosas



Fuente: Rico Castillo "Tomo I"

Los esfuerzos aplicados y por la duración de los mismos. Estas formas son:

- Por amasado.
- Por presión.
- Por impacto.
- Por vibración.
- Métodos mixtos.

Con las tres primeras formas se aplican casi todos los métodos convencionales en uso desde hace varias décadas. La cuarta se refiere a técnicas de implantación más reciente, pero que se han popularizado mucho en los tiempos. Como es natural no representa todos los modos posibles de entregar energía de compactación a un suelo, sino que simplemente son las soluciones comerciales e industriales que hasta el momento se han desarrollado para resolver el problema.

2.5.1. Variables que afectan el proceso de la compactación de los suelos.-

Como es natural, un suelo se puede compactar de varias maneras, y en cada caso se obtendrá un resultado diferente; por otra parte, una misma forma de compactación dará resultados distintos si se aplica a diversos suelos; por último, si una misma forma de compactación se aplica a un suelo determinado, podrán lograrse resultados muy diferentes si de un caso a otro se varían ciertas condiciones de las prevalecientes en dicho suelo.

Las afirmaciones anteriores justifican las conclusiones, obvia para quienquiera que tenga cualquier grado de familiaridad con estos problemas, de que los resultados de un proceso de compactación dependen de varios factores, unos que atañen al tipo de suelo, otros relativos al método de compactación que se emplee y, por último, varios más que se refieren a determinadas circunstancias que en ese momento pudieran prevalecer en el suelo con que se trabaja. Estos factores suelen denominarse las “variable” que rigen el proceso de compactación. Las principales de estas se reseñan a continuación.

2.5.1.1. La naturaleza del suelo.-

Es claro que la clase de suelo con que se trabaja influye de manera decisiva en el proceso de compactación; de hecho, a lo largo de este capítulo habrán de diferenciarse las técnicas que se empleen y los resultados que se obtengan precisamente con base en el tipo de suelo.

Prevalece aun la distinción usual entre suelos finos y gruesos o entre suelos arcillosos y friccionantes, pero en el análisis de los procesos de compactación es muy común que tal distinción se detalle bastante más, tipificando los suelos de acuerdo con las normas.

2.5.1.2. El método de compactación.-

En laboratorio resulta bastante fácil clasificar los métodos de compactación en uso en tres tipos bien diferenciados: la compactación por impactos, por amasado y por aplicación de carga estática. A reserva de detallar algo más estos métodos, baste por el momento la afirmación de que producen resultados diferentes tanto en la estructuración que adquiere el suelo como, en consecuencia, en las propiedades del material que se compacta. Además, ya se comienza a utilizar algunos dispositivos de laboratorio para compactar por vibración, si bien su uso está menos extendido que el de los otros tres métodos.

Resulta bastante difícil diferenciar de un modo análogo los métodos de compactación de campo. Es común describir estos con base en el equipo mecánico que se emplee en el proceso,

y así se habla de la compactación con rodillo liso, con rodillo neumático, con equipo vibratorio, etc. Se supone que los métodos de laboratorio reproducen las condiciones del proceso de campo, pero en muchos casos no es fácil establecer una correspondencia clara entre el tipo de trabajo de campo y las pruebas de laboratorio, en el sentido de contar con que estas últimas reproduzcan en forma suficientemente representativa todas las condiciones del suelo compactado en el campo.

2.5.1.3. La energía específica. -

Se entiende por energía específica de compactación la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico de que se trate.

Es muy fácil evaluar la energía específica en una prueba de laboratorio en que se compacta al suelo por impactos dados con un pisón; de hecho, resulta claro que para tal caso queda dada por la expresión:

$$E_e = \frac{N * n * w * h}{V}$$

Dónde:

E_e = Energía específica.

N = Número de golpes del pisón compactador por cada una de las capas en que se acomoda el suelo en el molde de compactación.

n = Número de capas que se disponen hasta llenar el molde.

W = Peso del pisón compactador.

h = Altura de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo.

V = Volumen total del molde de compactación igual al volumen total del suelo compactado.

En las pruebas de laboratorio en que se compacta el suelo con la aplicación de presión estática, en principio la energía específica se puede evaluar de manera análoga en términos del tamaño del molde el número de capas que se dispone el suelo, la presión que se aplique a cada capa y el tiempo de aplicación. Sin embargo, en este caso la evaluación no resulta ya tan sencilla y la energía específica se ve afectada por la deformabilidad del suelo y por el tiempo de aplicación de la presión.

En el caso de las pruebas en que se realiza la compactación por amasado es aún más compleja la evaluación de la energía específica, pues cada capa de suelo dentro del molde se compacta mediante un cierto número de aplicaciones de carga con un pisón que produce presiones que varían gradualmente desde cero hasta un valor máximo, y luego se invierte el proceso en la descarga. La energía de compactación no se puede cuantificar de un modo sencillo pero puede hacerse variar a voluntad si se introducen cambios en la presión de apisonado, en el número de capas, en el número de aplicaciones del pisón por capa, en el área de pisón o en el tamaño del molde.

El concepto de energía específica conserva su pleno valor fundamental cuando se relaciona con procedimientos de compactación de campo. En el caso del uso de rodillos depende principalmente de la presión y el área de contacto entre el rodillo y el suelo, del espesor de la capa que se compacte y del número de pasadas del equipo. Tampoco es sencillo evaluar la energía de compactación en términos absolutos en un caso dado, pero si varían los factores mencionados es posible hacerla cambiar, con lo que se obtienen términos de comparación entre dos trenes de trabajo diferentes.

En páginas subsiguientes de este capítulo se podrá ver la gran influencia de la energía de compactación en los resultados que se logran. Puede decirse que la energía específica de compactación es una de las variables que mayor influencia ejercen en el proceso de compactación de un suelo dado, con un procedimiento determinado.

2.6. Correlación de datos.-

Es una técnica estadística usada para determinar la relación entre dos o más variables. con el fin de ver si existe alguna relación entre ellas, es decir, si los cambios en una de ellas influyen en los valores de la otra. Si ocurre esto decimos que las variables están correlacionadas o bien que hay correlación entre ellas.

En ocasiones nos puede interesar estudiar si existe o no algún tipo de relación entre dos variables aleatorias. Así, por ejemplo, podemos preguntarnos si hay alguna relación entre las notas de la asignatura Estadística I y las de Matemáticas I. Una primera aproximación al problema consistiría en dibujar en el plano R^2 un punto por cada alumno: la primera coordenada de cada punto sería su nota en estadística, mientras que la

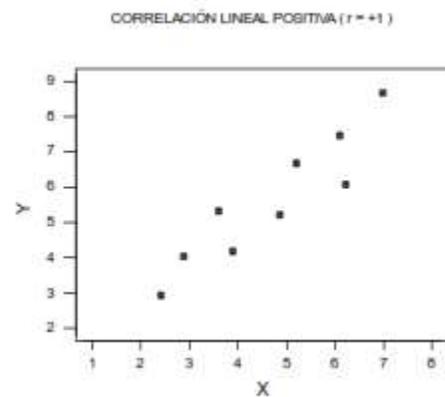
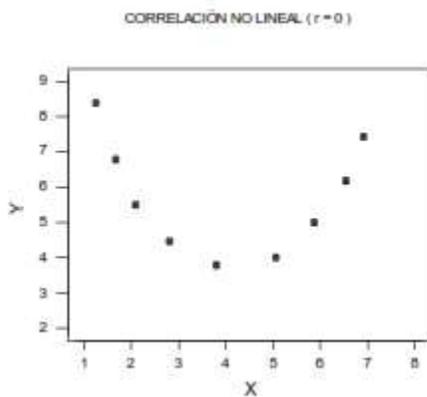
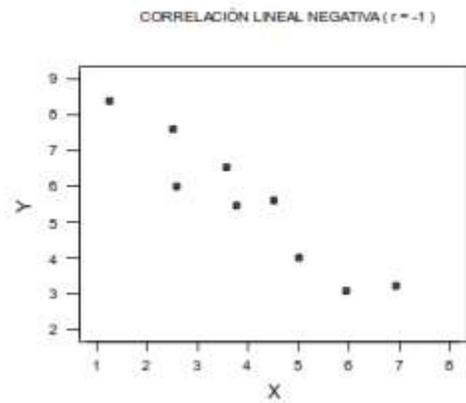
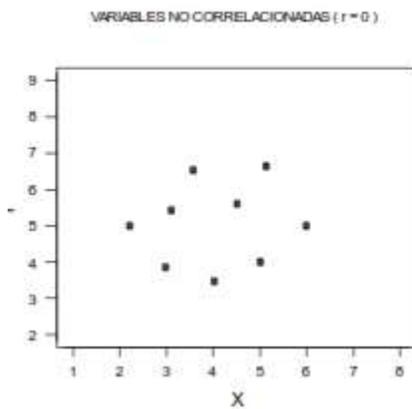
segunda sería su nota en matemáticas. Así, obtendríamos una nube de puntos la cual podría indicarnos visualmente la existencia o no de algún tipo de relación (lineal, parabólica, exponencial, etc.) entre ambas notas.

Otro ejemplo, consistiría en analizar la facturación de una empresa en un periodo de tiempo dado y de cómo influyen los gastos de promoción y publicidad en dicha facturación. Si consideramos un periodo de tiempo de 10 años, una posible representación sería situar un punto por cada año de forma que la primera coordenada de cada punto sería la cantidad en euros invertidos en publicidad, mientras que la segunda sería la cantidad en euros obtenidos de su facturación. De esta manera, obtendríamos una nube de puntos que nos indicaría el tipo de relación existente entre ambas variables.

En particular, nos interesa cuantificar la intensidad de la relación lineal entre dos variables. El parámetro que nos da tal cuantificación es el coeficiente de correlación lineal de Pearson r , cuyo valor oscila entre -1 y $+1$:

$$-1 \leq r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{s_X s_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) * (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \leq +1$$

Figura 2.13: Tipos de correlación



Fuente; nracs.usda.gov

Como se observa en los diagramas anteriores, el valor de r se aproxima a $+1$ cuando la correlación tiende a ser lineal directa (mayores valores de X significan mayores valores de Y), y se aproxima a -1 cuando la correlación tiende a ser lineal inversa.

Es importante notar que la existencia de correlación entre variables no implica causalidad.

Si no hay correlación de ningún tipo entre dos v.a., entonces tampoco habrá correlación lineal, por lo que $r = 0$. Sin embargo, el que ocurra $r = 0$ sólo nos dice que no hay correlación lineal, pero puede que la haya de otro tipo.

El siguiente diagrama resume el análisis del coeficiente de correlación entre dos variable:

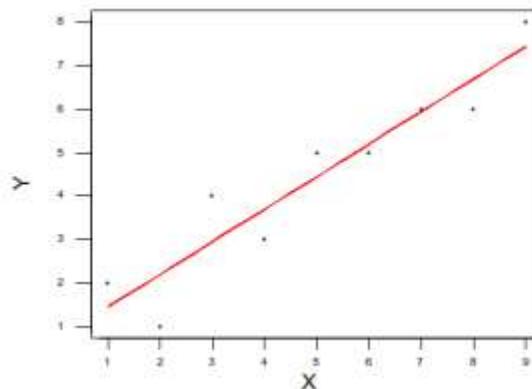


2.7. Regresión de datos.-

El análisis de la regresión es un proceso estadístico para la estimación de relaciones entre variables. Más específicamente, el análisis de regresión ayuda a entender cómo el valor típico de la variable dependiente cambia cuando cualquiera de las variables independientes es variada, mientras que se mantienen las otras variables independientes fijas

En aquellos casos en que el coeficiente de regresión lineal sea “cercano” a +1 o a -1, tiene sentido considerar la ecuación de la recta que “mejor se ajuste” a la nube de puntos (recta de mínimos cuadrados). Uno de los principales usos de dicha recta será el de predecir o estimar los valores de Y que obtendríamos para distintos valores de X. Estos conceptos quedarán representados en lo que llamamos diagrama de dispersión:

Figura 2.14: Nube de puntos y recta de mínimos cuadrados



Fuente; nracs.usda.gov

CAPÍTULO III INGENIERÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3. Desarrollo de la Investigación.-

3.1. Criterios de selección de material.-

La selección del material fue intencional ya que se necesita un diámetro en los rangos específicos de acuerdo al requerimiento para cada ensayo, tanto de canto rodado que son transportados por medios naturales. Morfología más o menos redondeada, sub-redondeada u oblonga, sin aristas y con la superficie lisa, generalmente causados por la corrosión, las corrientes de agua (erosión hídrica) o el viento (erosión eólica). Como de material chancado cualidad de ser artificial donde se rompe la roca con trituradoras que son de forma angulares.

Figura 3.1: “Banco de materiales”



Fuente: Propia



Fuente: Propia

Para realizar los ensayos se ha utilizado suelos granulares el cual se extrajo de diferentes bancos. Se verificó que tenga las características específicas que requiere la investigación a realizarse, para este estudio se tomó en cuenta agregado grueso de canto rodado y chancado.

Banco de Materiales:

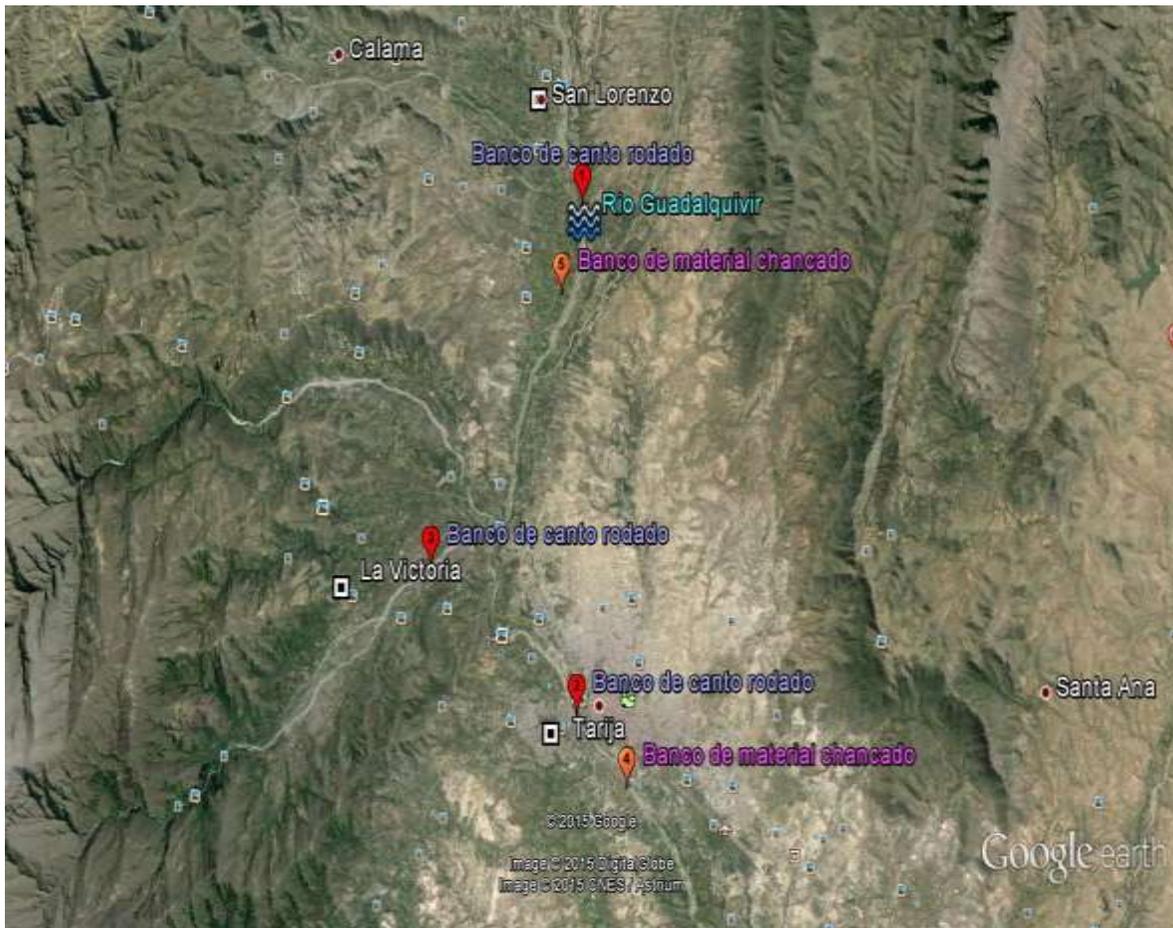
- ✓ Río Guadalquivir altura Tarija.
- ✓ Río Guadalquivir altura San Lorenzo.
- ✓ Quebrada la Victoria.

Chancadoras:

- ✓ 16 enero ubicada en el barrio San Blas.
- ✓ Erika ubicada en carretera Tarija-San Lorenzo.

De cada banco se extrajo aproximadamente 350 kilos tomando cuenta perdidas de un 5% considerando q para cada ensayo se utilizó 50 kilos de material grueso y 20 kilos de material fino.

Figura 3.2: Ubicación de la Extracción de los materiales



Fuente: propia

3.2. Selección del material utilizado.-

3.2.1. Selección de canto rodado.-

Para la selección de material grueso se realizó en tamizado en el mismo lugar del banco, ya que cuando se extrajo el material por primera vez no tuvo una buena distribución de tamaño y cantidad requería para cada ensayo. Motivo por el cual se tuvo que realizar el tamizado en mismo lugar del banco para extraer la cantidad apropiada para cada ensayo. El cual se utilizó aproximadamente 50 kilos para material grueso. Comprendido del tamiz 2 ½”, 2”, 1 ½”y 1”.

Figura 3.3: “Canto rodado grueso”



Fuente: Propia

Para la selección de material fino se realizó en tamizado en laboratorio de suelos U.A.J.M.S. para la extracción de este material no se tuvo ningún problema en cuanto a la distribución de los tamaños y cantidad necesaria. El cual se utilizó aproximadamente 20 kilos para material. Comprendido del tamiz ¾”, ½”, ⅜”, N°4, N°10, N°40 y N°200”.

Figura 3.3: “Canto rodado fino”



Fuente: Propia

3.2.2. Selección de chancadora.-

Para la selección de material grueso se realizó en tamizado en el mismo lugar del banco. La dificultad de selección fue la no obtención de material retenido en los tamices 2 ½”, 2” y 1½”. El cual se utilizó aproximadamente 50 kilos para material grueso. Comprendido del tamiz 2 ½”, 2”, 1 ½” y 1”.

Figura 3.5 : “Material chancado grueso”



Fuente: Propia

Para la selección de material fino se realizó en tamizado en laboratorio de suelos A.U.J.M.S. para la extracción de este material no se tuvo ningún problema en cuanto a la distribución de los tamaños y cantidad necesaria. El cual se utilizó aproximadamente 20 kilos para material fino. Comprendido del tamiz 3/4”, 1/2”, 3/8”, N°4, N°10, N°40 y N°200”.

Figura 3.6: “Material chancado fino”



Fuente: Propia

3.3. Materiales Utilizados.-

3.3.1. Clasificación de tamaño.-

Para la clasificación del tamaño de las partículas de los diferentes bancos se hizo mediante tamizado, y lo retenido en cada tamiz.

Figura 3.7: “Juego de tamiz”

Fuente: Propia



3.3.2. Características mesa vibratoria.-

Mesa vibradora, de acero, con cubierta vibradora de aproximadamente 750 x 750 mm, apoyada sobre amortiguadores y accionada por un vibrador electromagnético. El vibrador debe ser semi-silencioso y con una masa igual o mayor que 45 kg, una frecuencia de 3.660 vibraciones por minuto y una amplitud de vibrado vertical entre 0,05 y 0,64 mm bajo una carga de 1.112 N.

Figura 3.8: “Mesa vibratoria”

Fuente: Propia



Moldes metálicos, con una capacidad nominal de 2,8 y 14,2 lt. respectivamente. Deben cumplir con los requisitos dimensionales

Figura 3.9: “Moldes metálicos”



Fuente: Propia

Tubos guías, metálicos, ajustables a cada tipo de molde. Con un sistema de ajuste consistente en tres juegos de tornillos, dos de los cuales deben tener tuercas de fijación.

Figura 3.10: “Tubos Guía”



Fuente: Propia

Placas base de acero de 12,5 mm de espesor, para cada tamaño de molde.

Figura 3.11: “Placas de acero”



Fuente: Propia

Sobrecargas, una para cada tamaño de molde. La masa total de la sobrecarga y su correspondiente placa base debe ser equivalente a 14 Kpa para el molde en uso.

Figura 3.12: “Sobrecarga”



Fuente: Propia

Una manilla para cada placa base sujeción del calibre.

Figura 3.13: “Manilla de Sujeción”



Fuente: Propia

Deformó metro para comparar calibres con indicador de dial, un recorrido de 50 mm y graduaciones de 0,01 mm.

Figura3.14: 2Manómetro”



Fuente: Propia

Balanzas; una de 100 kg de capacidad y otra de 20 kg de capacidad con resolución de 1g contador de tiempo o cronómetro que indique minutos y segundos.

Figura 3. 15: “Balanza y cronómetro”



Fuente: Propia



Fuente: Propia

3.3.3. Otros.-

Figura 3.16: “Llave para asegurar el molde”



Fuente: Propia

Figura 3.17: “Fuentes para pesar el material”



Fuente: Propia

Figura 3. 18: “Poruña”



Fuente: Propia

3.4. Preparación de la Muestra.-

Para la realización de los ensayos se empezó a separar de acuerdo al tamaño de sus partículas mediante método del tamizado aproximadamente unos 50 kilos para material grueso y 20 kilos para material fino tomando en cuenta que el material es seco. Comprendido el material grueso del tamiz 2 ½”, 2”, 1 ½”y 1”y el material fino comprendido del tamiz ¾”, ½”, 3/8”, N°4, N°10, N°40 y N°200”.

Figura 3.19: “Separación de tamaño de partículas”

Fuente: Propia



3.5. Calibración del equipo.-

Figura 3.20: “Calibración de los moldes”



Fuente: Propia

Molde tamaño máximo 75 mm



Fuente: Propia

Molde tamaño máximo 19 mm

Se determinó el volumen del molde mediante uno el procedimiento de llenado con agua:

Se coloque el molde sobre una superficie firme, plana y horizontal; luego se llena el molde con agua a temperatura ambiente y enrase con una placa de vidrio, eliminando burbujas de aire y el exceso de agua

Mida la temperatura del agua y determine su densidad ρ_w de acuerdo con la Tabla interpolando si fuese necesario.

Tabla3.1: “Densidad del agua en función de la Temperatura”

Temperatura (°C)	Densidad (g /cm ³) (kg /l)
16	0,99909
18	0,99859
20	0,99829
23	0,99754
26	0,99678
29	0,99594

Fuente: NCh1726-1980

Determine y registre la capacidad volumétrica (V_c) aproximando a 1 cm³ (1 ml), dividiendo la masa del agua que llena el molde por su densidad.

$$V_c = m_w / \rho_w$$

Dónde:

V_c: Volumen del molde

m_w: Peso de agua

ρ_w: Densidad del agua

3.6. Procedimiento de prueba.-

Se determinó mediante el siguiente procedimiento:

1. Primeramente se hizo la separación de partículas del material de canto rodado como chancado para cada tamiz y de acuerdo al tamaño máximo de las partículas, se pesó 34 kl. tamiz 2 ½”, 2”, 1 ½”y 1”y 11 kl. Para material retenido en tamiz ¾”, ½”, 3/8”, N°4, N°10, N°40 y N°200” de acuerdo a la tabla.

Tabla 3.2: “Peso de la muestra”

tamaño máximo de las partículas (mm)	peso de la muestra partículas (Kg)	volumen el molde partículas (cm ³)
75.0	34	14200
38.1	34	14200
19.0	11	2830
9.5	11	2830
0.00475	11	2830

Fuente: Manual 33-T0063

2. Se colocó el tubo guía ajustando las tres tuercas de fijación con sus respectivos tornillos para tener una estabilidad con la sobre carga y un buena distribución del peso.

Figura 3.21: “Tubo guía”



Fuente: Propia



Fuente: Propia

3. Se llenó el molde con la cantidad establecida de acuerdo al tamaño máximo de partícula de la muestra por el procedimiento establecido.

Tabla 3.3: “Forma de llenado”

Tamaño máximo nominal de partículas (mm)	Aparato de llenado para densidad
80	Pala o poruña
40	Poruña
20	Poruña
10	Embudo de 25 mm
5	Embudo de 12,5 mm

Fuente: NCh 1726-1980

Figura 3.22: “Llenado del molde”

Fuente: Propia



4. Se colocó la placa base sobre la superficie del suelo. Luego se coloca la sobrecarga encima de la placa base (empleando el aparejo de usar en el caso del molde de 14,2 lt).

Figura 3.23: “Placa base de la sobre carga”



Fuente: Propia



Fuente: Propia

5. Se puso en funcionamiento el vibrador a la amplitud de 60 Hz y se vibró el molde con cargado durante un periodo de 6-8 min.

Figura 3.24: “Cronometrar el tiempo de vibrado”



Fuente: Propia



Fuente: Propia

6. Se mide con el dial el asentamiento del suelo ensayada ocurrido por la vibración y una sobre carga durante un periodo.

Figura 3.25: “Medición de asentamiento”



Fuente: Propia



Fuente: Propia

3.6.1. Densidad máxima.-

$$\rho_{max} = \frac{ms}{Vc}$$

Dónde:

ρ_{max} = Densidad seca máxima (gr/cm3).

ms = Masa seca del suelo que llena el molde (gr).

Vc = Volumen del suelo compactado (cm3).

$$Vc = V - \frac{Li - Lf}{10} * A$$

Dónde:

Li: Lectura inicial del calibre (mm).

Lf: Lectura final del calibre (mm).

A : Área seccional del molde (cm2).

V: Volumen del molde (cm3).

3.7. Procedimiento para la determinación de la densidad máxima seca.-

3.7.1. Determinación Densidad Máxima Seca.-

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n}$$

3.7.2. Determinación de Asentamientos.-

3.7.2.1. Banco de muestra del río Guadalquivir altura Tarija.-

Tabla 3.4: “Asentamiento del Río Guadalquivir altura Tarija”

ASENTAMIENTO		
Tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Asentamiento (mm)
2 1/2 "	63,5	6,10
2"	50,80	7,95
1 1/2"	38,1	11,43
1"	25,4	11,317
3/4"	19,10	10,265
1/2"	12,7	18,093
3/8"	9,52	22,159
N° 4	4,76	26,219
N° 10	2	36,972
N° 40	0,425	41,791
N° 200	0,075	44,764

Fuente: Propia

3.7.2.2. Banco de muestra del río Guadalquivir altura San Lorenzo.-

Tabla 3.5: “Asentamiento del Río Guadalquivir altura San Lorenzo”

ASENTAMIENTO		
tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Asentamiento (mm)
2 1/2 "	63,5	6,700
2"	50,80	7,623
1 1/2"	38,1	11,765
1"	25,4	11,333
3/4"	19,10	10,626
1/2"	12,7	17,371
3/8"	9,52	22,814
N° 4	4,76	28,301
N° 10	2	37,276
N° 40	0,425	43,266
N° 200	0,075	45,282

Fuente: Propia

3.7.2.3. Banco de muestra de la Quebrada la Victoria.-

Tabla 3.6: “Asentamiento de la Quebrada la Victoria”

ASENTAMIENTO

tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Asentamiento (mm)
2 1/2 "	63,5	6,723
2"	50,80	7,737
1 1/2"	38,1	11,10
1"	25,4	11,974
3/4"	19,10	10,693
1/2"	12,7	18,912
3/8"	9,52	22,008
N° 4	4,76	28,469
N° 10	2	37,588
N° 40	0,425	41,892
N° 200	0,075	45,887

Fuente: Propia

3.7.2.4. Banco de muestra de Chancadora Erika.-

Tabla 3.7: “Asentamiento de Chancadora Erika”

ASENTAMIENTO		
tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Asentamiento (mm)
2 1/2 "	63,5	-
2"	50,80	-
1 1/2"	38,1	-
1"	25,4	3,554
3/4"	19,10	18,710
1/2"	12,7	20,959
3/8"	9,52	28,488
N° 4	4,76	30,293
N° 10	2	-
N° 40	0,425	-
N° 200	0,075	-

Fuente: Propia

Banco de muestra de chancadora San Blas.-

Tabla 3.8: “Asentamiento de chancadora San Blas”

ASENTAMIENTO

tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Asentamiento (mm)
2 1/5 "	63,5	-
2"	50,80	-
1 1/5"	38,1	-
1"	25,4	3,993
3/4"	19,10	20,450
1/2"	12,7	22,044
3/8"	9,52	25,878
N° 4	4,76	30,458
N° 10	2	-
N° 40	0,425	-
N° 200	0,075	-

Fuente: Propia

3.7.3. Determinación de densidad máxima.-

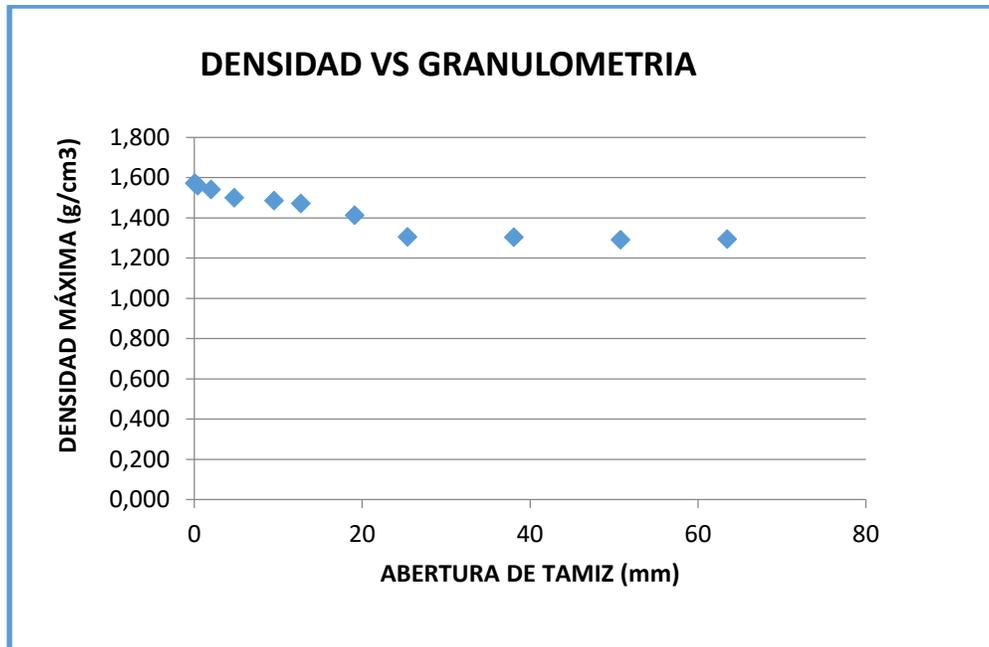
3.7.3.1. Banco de muestra del río Guadalquivir altura Tarija.-

Tabla 3.9: “Promedio de la densidad Río Guadalquivir altura Tarija”

DENSIDAD VS GRANULOMETRÍA		
Tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Densidad promedio (gr/cm3)
2 1/2 "	63,5	1,289
2"	50,80	1,294
1 1/2"	38,1	1,305
1"	25,4	1,306
3/4"	19,10	1,413
1/2"	12,7	1,472
3/8"	9,52	1,486
N° 4	4,76	1,501
N° 10	2	1,542
N° 40	0,425	1,562
N° 200	0,075	1,574

Fuente: Propia

Figura 3.26: “Gráfica Río Guadalquivir altura Tarija”



Fuente: Propia

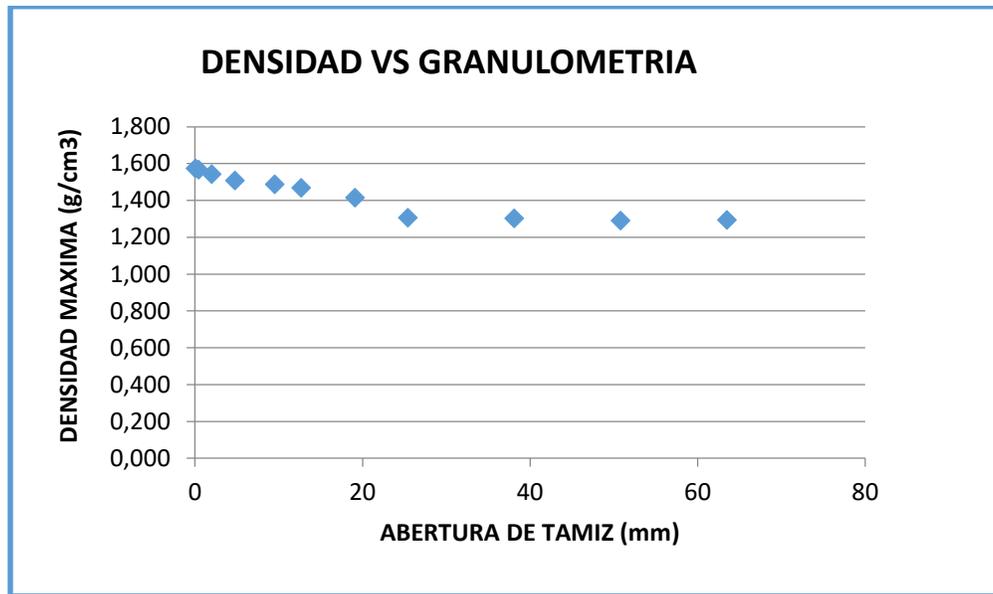
3.7.3.2. Banco de muestra del río Guadalquivir altura San Lorenzo.-

Tabla 3.10: “Promedio de la densidad Río Guadalquivir altura San Lorenzo”

DENSIDAD VS GRANULOMETRÍA		
Tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Densidad promedio (gr/cm ³)
2 1/2 "	63,5	1,291
2"	50,80	1,295
1 1/2"	38,1	1,303
1"	25,4	1,307
3/4"	19,10	1,415
1/2"	12,7	1,469
3/8"	9,52	1,489
N° 4	4,76	1,509
N° 10	2	1,544
N° 40	0,425	1,567
N° 200	0,075	1,576

Fuente: Propia

Figura 3.27: “Gráfica Río Guadalquivir altura San Lorenzo”



Fuente: Propia

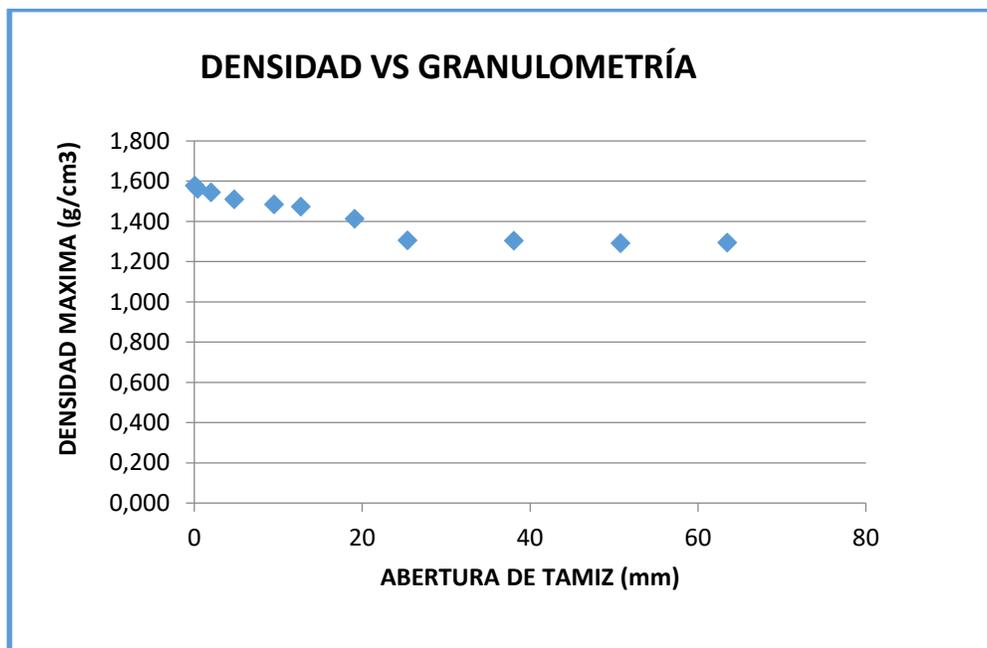
3.7.3.3. Banco de muestra de la Quebrada la Victoria.-

Tabla 3.11: “Promedio de la densidad de la Quebrada la Victoria”

DENSIDAD VS GRANULOMETRÍA		
Tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Densidad promedio (gr/cm3)
2 1/2 "	63,5	1,292
2"	50,80	1,294
1 1/2"	38,1	1,305
1"	25,4	1,306
3/4"	19,10	1,413
1/2"	12,7	1,475
3/8"	9,52	1,486
N° 4	4,76	1,510
N° 10	2	1,545
N° 40	0,425	1,562
N° 200	0,075	1,578

Fuente: Propia

Figura 3.28: “Gráfica de la Quebrada la Victoria”



Fuente: Propia

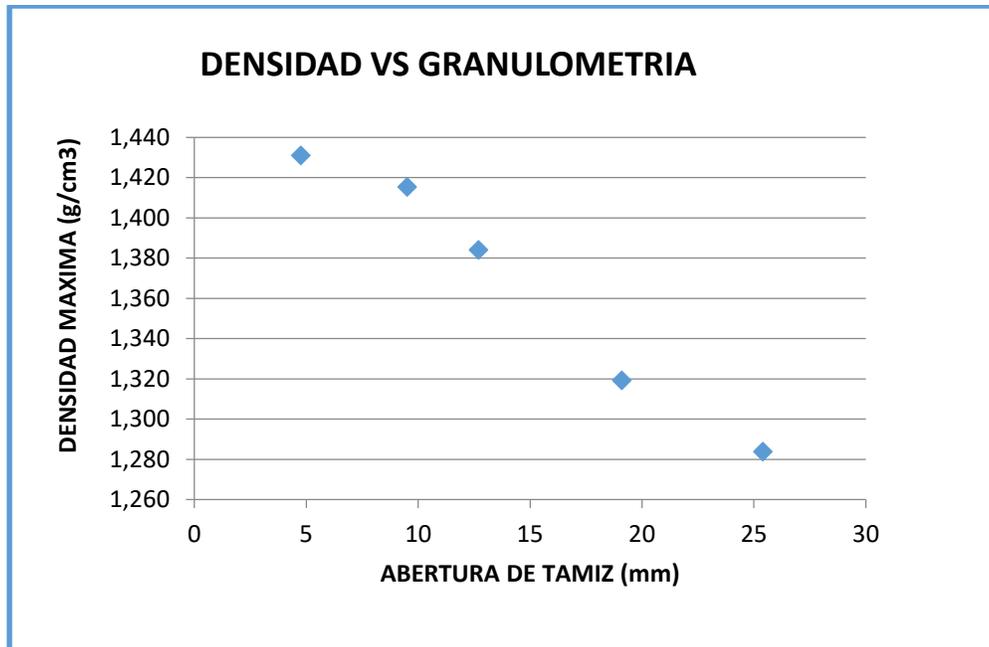
3.7.3.4. Banco de muestra de Chancadora Erika.-

Tabla 3.12: “Promedio de la densidad de Chancadora Erika”

DENSIDAD VS GRANULOMETRÍA		
Tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Densidad promedio (gr/cm3)
2 1/2 "	63,5	-
2"	50,80	-
1 1/2"	38,1	-
1"	25,4	1,284
3/4"	19,10	1,319
1/2"	12,7	1,384
3/8"	9,52	1,416
N° 4	4,76	1,431
N° 10	2	-
N° 40	0,425	-
N° 200	0,075	-

Fuente: Propia

Figura 3.29: “Gráfica de Chancadora Erika”



Fuente: Propia

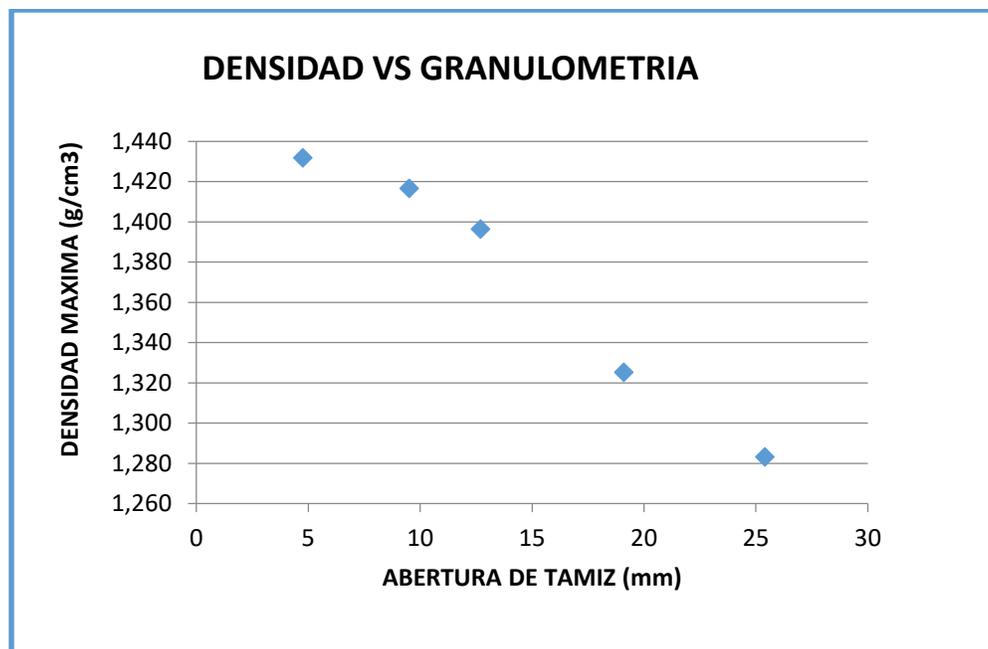
3.7.3.5. Banco de muestra de chancadora San Blas.-

Tabla 3.13: “Promedio de la densidad de chancadora San Blas”

DENSIDAD VS GRANULOMETRÍA		
Tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Densidad promedio (gr/cm3)
2 1/2 "	63,5	-
2"	50,80	-
1 1/2"	38,1	-
1"	25,4	1,283
3/4"	19,10	1,325
1/2"	12,7	1,397
3/8"	9,52	1,417
N° 4	4,76	1,432
N° 10	2	-
N° 40	0,425	-
N° 200	0,075	-

Fuente: Propia

Figura 3.30: “Gráfica de chancadora San Blas”



Fuente: Propia

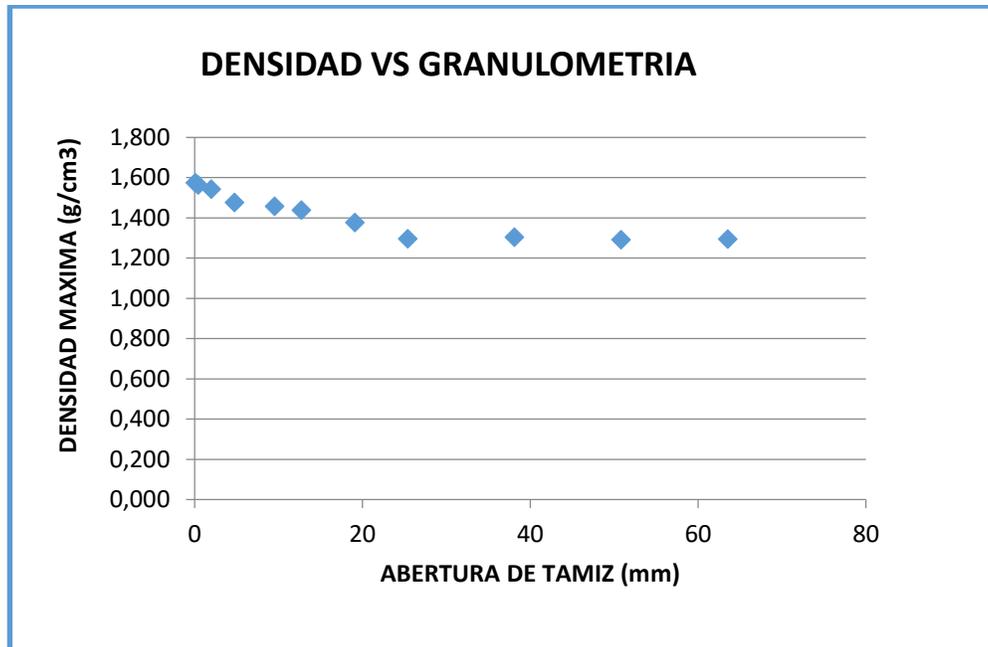
3.8. Determinación de la Correlación entre densidad máxima y granulometría

Tabla 3.14: “Promedio de las densidades máximas”

DENSIDAD VS GRANULOMETRÍA							
tamaño de tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Densidad Río Guadalquivir	Densidad san Lorenzo	Densidad Quebrada Victoria	Densidad Chancador a Erika	Densidad Chancador a San Blas	Promedio
2 1/2 "	63,5	1,289	1,291	1,292	-	-	1,291
2"	50,80	1,294	1,295	1,294	-	-	1,295
1 1/2"	38,1	1,305	1,303	1,305	-	-	1,304
1"	25,4	1,306	1,307	1,306	1,284	1,283	1,297
3/4"	19,10	1,413	1,415	1,413	1,319	1,325	1,377
1/2"	12,7	1,472	1,469	1,475	1,384	1,397	1,439
3/8"	9,52	1,486	1,489	1,486	1,416	1,417	1,459
N° 4	4,76	1,501	1,509	1,510	1,431	1,432	1,477
N° 10	2	1,542	1,544	1,545	-	-	1,544
N° 40	0,425	1,562	1,567	1,562	-	-	1,564
N° 200	0,075	1,574	1,576	1,578	-	-	1,576

Fuente: Propia

Figura 3.31: “Gráfica de densidades máximas”



Fuente: Propia

3.9. Determinación de la ecuación de Correlación de densidad máxima y granulometría.-

Tabla 3.15: “Comparación de Modelos Alternos”

<i>Modelo</i>	<i>Correlación</i>	<i>R-Cuadrada</i>
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0,9647	93,06%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0,9646	93,05%
Raíz Cuadrada Doble	-0,9644	93,01%
Raíz Cuadrada de X	-0,9641	92,95%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0,9629	92,72%
Cuadrado-Y Log-X	-0,9224	85,08%
Logaritmo de X	-0,9146	83,65%
Multiplicativa	-0,9064	82,16%
Inversa de Y	0,8983	80,69%
Inversa-Y Log-X	0,8979	80,62%
Exponencial	-0,8929	79,72%
Raíz Cuadrada de Y	-0,8900	79,20%
Lineal	-0,8869	78,66%
Cuadrado de Y	-0,8803	77,49%
Inversa-Y Cuadrado-X	0,7488	56,06%

Log-Y Cuadrado-X	-0,7402	54,79%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0,7357	54,13%
Cuadrado de X	-0,7311	53,45%
Cuadrado Doble	-0,7216	52,07%
Cuadrado-Y Inversa de X	0,5629	31,69%
Inversa de X	0,5504	30,29%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0,5441	29,61%
Curva S	0,5379	28,93%
Doble Inverso	-0,5254	27,61%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Fuente: Propia

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo log-Y raíz cuadrada-X es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 93,0553%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

Modelo log-Y raíz cuadrada-X

Variable dependiente: Densidad máxima.

Variable independiente: Abertura de tamiz.

Log-Y Raíz Cuadrada-X: $Y = \exp(a + b \cdot \sqrt{X})$.

Tabla 3.16: “Coeficientes”

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	0,460862	0,0122592	37,5932	0,0000
Pendiente	-0,029676	0,00270234	-10,9816	0,0000

Fuente: Propia

NOTA: intercepto = $\ln(a)$

Tabla 3.17: “Análisis de Varianza”

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0,0591471	1	0,0591471	120,60	0,0000
Residuo	0,00441413	9	0,000490459		
Total (Corr.)	0,0635612	10			

Fuente: Propia

Coefficiente de Correlación = -0,964652.

R-cuadrada = 93,0553 por ciento.

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92,2837 por ciento.

Error estándar del est. = 0,0221463.

Error absoluto medio = 0,0147018.

Estadístico Durbin-Watson = 1,18855 (P=0,0285).

Auto correlación de residuos en retraso 1 = 0,296107.

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

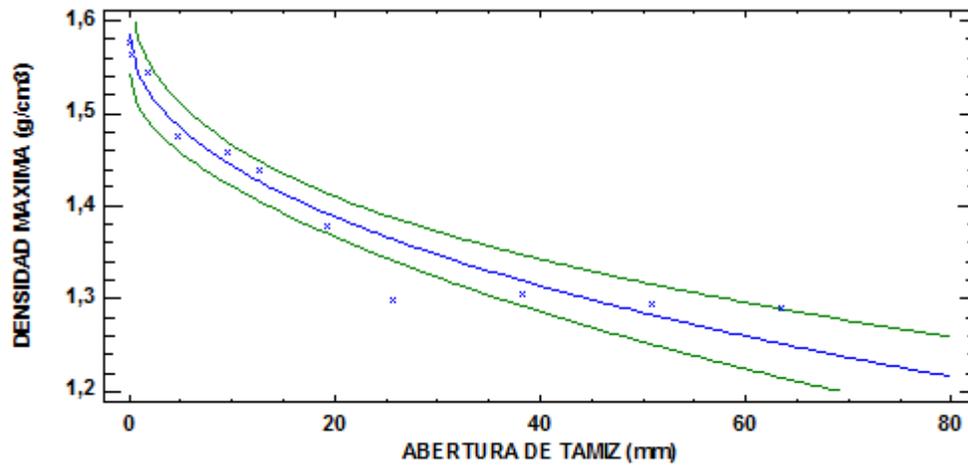
El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 93,0553% de la variabilidad en la densidad máxima. El coeficiente de correlación es igual a -0,964652, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0221463. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Pronósticos del menú de texto.

El error absoluto medio (MAE) de 0,0147018 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%. Grafique los residuos versus el número de fila para ver si hay algún patrón que pueda detectarse.

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo log-Y raíz cuadrada-X para describir la relación entre densidad máxima y abertura de tamiz. La ecuación del modelo ajustado es

Figura 3.32: “Gráfico del Modelo Ajustado”

DENSIDAD VS GRANULOMETRÍA



Fuente: Propia

$$D = e^{(0,461 - 0,030 \times \sqrt{\phi})}$$

Dónde:

ρ_{\max} = Densidad máxima (gr/cm³)

ϕ = Diámetro de tamiz (mm)

3.10. Validación de ecuación.-

Se realizara 5 pruebas para la validación tres, con material de canto rodado y dos con material chancado.

- Con la ecuación de densidad vs granulometría:

$$\rho_{max} = e^{(0,461-0,030 \times \sqrt{\phi})}$$

Dónde:

ρ_{max} = Densidad máxima (gr/cm³).

ϕ = Diámetro de tamiz (mm).

- Con ensayo de densidad mediante mesa vibratoria:

$$\rho_{max} = \frac{ms}{Vc}$$

Dónde:

ρ_{max} = Densidad seca máxima (gr/cm³).

ms = Masa seca del suelo que llena el molde (gr).

Vc = Volumen del suelo compactado (cm³).

$$Vc = V - \frac{Li - Lf}{10} * A$$

Dónde:

Li: lectura inicial del calibre (mm).

Lf: lectura final del calibre (mm).

A : área seccional del molde (cm²).

V: Volumen del molde (cm³).

- **Material canto rodado:**

Validación 1°

- Con la ecuación de densidad vs granulometría:

$$\rho_{max} = e^{(0,461-0,030 \times \sqrt{50,80})}$$

$$\rho_{max} = \mathbf{1,28 \text{ gr/cm}^3}$$

- Con ensayo de densidad mediante mesa vibratoria:

$$V_c = 26785,218 - \frac{46,975 - 38,56}{10} * 615,752$$

$$V_c = \mathbf{26267,063 \text{ cm}^3}$$

$$\rho_{max} = \frac{34165}{26267,063}$$

$$\rho_{max} = \mathbf{1,30 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\mathbf{1,30 \times 0,9305 = 1,209 \leq 1,28 \text{ CUMPLE}}$$

Validación 2°

- Con la ecuación de densidad vs granulometría:

$$\rho_{max} = e^{(0,461-0,030 \times \sqrt{19,10})}$$

$$\rho_{max} = \mathbf{1,39 \text{ gr/cm}^3}$$

- Con ensayo de densidad mediante mesa vibratoria:

$$V_c = 7802,711 - \frac{34,055 - 22,601}{10} * 181,458$$

$$V_c = \mathbf{7594,869 \text{ cm}^3}$$

$$\rho_{max} = \frac{11000}{7594,869}$$

$$\rho_{max} = \mathbf{1,448 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\mathbf{1,448 \times 0,9305 = 1,347 \leq 1,39 \text{ CUMPLE}}$$

Validación 3°

- Con la ecuación de densidad vs granulometría:

$$D = e^{(0,461-0,030 \times \sqrt{2})}$$

$$D = \mathbf{1,51 \text{ gr/cm}^3}$$

- Con ensayo de densidad mediante mesa vibratoria:

$$Vc = 7802,711 - \frac{41,005 - 3,755}{10} * 181,458$$

$$Vc = \mathbf{7126,780 \text{ cm}^3}$$

$$\rho_{max} = \frac{11000}{7126,780}$$

$$\rho_{max} = \mathbf{1,543 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\mathbf{1,543 \times 0,9305 = 1,436 \leq 1,51 \text{ CUMPLE}}$$

- **Material chancado:**

Validación 4°

- Con la ecuación de densidad vs granulometría:

$$D = e^{(0,461-0,030 \times \sqrt{12,7})}$$

$$D = \mathbf{1,423 \text{ gr/cm}^3}$$

- Con ensayo de densidad mediante mesa vibratoria:

$$Vc = 7802,711 - \frac{22,995 - 1,570}{10} * 181,458$$

$$Vc = \mathbf{7413,937 \text{ cm}^3}$$

$$\rho_{max} = \frac{11000}{7413,937}$$

$$\rho_{max} = 1,484 \text{ gr/cm}^3$$

$$1,484 \times 0,9305 = 1,380 \leq 1,423 \text{ CUMPLE}$$

Validación 5°

- Con la ecuación de densidad vs granulometría:

$$D = e^{(0,461 - 0,030 \times \sqrt{4,76})}$$

$$D = 1,485 \text{ gr/cm}^3$$

- Con ensayo de densidad mediante mesa vibratoria:

$$Vc = 7802,711 - \frac{33,01 - 1,05}{10} * 181,458$$

$$Vc = 7222,771 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{max} = \frac{10355}{7222,771}$$

$$\rho_{max} = 1,434 \text{ gr/cm}^3$$

$$1,485 \times 0,9305 = 1,382 \leq 1,434 \text{ CUMPLE}$$

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones-

En el presente proyecto de investigación se llegó a realizar la correlación de densidades máximas y granulometría de suelos no cohesivos utilizando el método de compactación. Como se puede observar en la gráfica 3.31 se obtuvo la ecuación con la respectiva correlación:

$$D = e^{(0,461 - 0,030 \times \sqrt{\phi})}$$

$$R^2 = 0,930553$$

Se pudo analizar que los resultados obtenidos son aceptables ya que se obtuvo una regresión de 0,930553 el mismo que llega a aproximarse a 1.

Se pudo comprobar que la densidad máxima de los bancos con material de canto rodado es superior a la de la densidad máxima obtenida de los banco con material chancado.

Tras la realización de ensayos de granulometría se obtuvo una distribución diferente entre material de canto rodado y material chancado, ya que el material chancado no contaba con algunos tamaños de tamices (2½", 2", 1½", N°10, N°40 y N°200)

Con la mesa vibratoria se obtuvo densidades máximas en menor tiempo, además que el equipo es de fácil manipulación.

Se obtuvo los asentamientos de las diferentes granulometrías llegando a obtener valores similares entre los distintos bancos. Como se puede observar en el anexo 2.

4.2. Recomendación.-

Se recomienda realizar la distribución granulométría en campo para luego transportarlo al laboratorio, y así evitar la falta de material en el respectivo ensayo, ya que, cuando se lleva el material directo al laboratorio no se obtiene una distribución uniforme del tamaño de las partículas.

Se recomienda utilizar un trípode o equipo que ayude a levantar la pesa fija para su mejor manipulación.

Para mejor resultados es recomendable asegurar bien los tornillos de los moldes ya que con la vibración suelen desajustarse lo cual puede ocasionar la pérdida de material.