

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El CBR fue concebido desde 1929 (Quintana Crespo, 2005) como parámetro de referencia para estimar la capacidad de soporte de los suelos, esto debido a que es un ensayo sencillo y su interpretación es simple y fácil de aplicar.

El CBR es un parámetro ampliamente conocido en área de pavimentos, ya que este brinda información sobre la resistencia de la subrasante (suelo), y es sobre esta capa que se coloca la base, sub base y superficie de rodadura. La capacidad de soporte de la subrasante posee una relación directa sobre los espesores de las capas superiores: Se tiene un inconveniente con el ensayo convencional, ya que se toma muestras en campo, y en un laboratorio equipado con lo necesario para la elaboración de los ensayos correspondientes para definir el valor del CBR de la muestra de suelo. Siendo esta la metodología más aceptada, y, dejada de lado o con cierta especulación el resultado ensayado con la metodología CBR In Situ.

En la actualidad no existe una comparación de resultados a partir de los dos ensayos, el ensayo CBR convencional y el ensayo CBR In Situ. De esta manera se plantea realizar ambos ensayos en los barrios de: La Cañada – Monte Sud, Luis Espinal – Monte Cristo, San Antonio – Medinacelli y Nueva Terminal – Pampa Galana, ya que es estas zonas no se cuenta con valores estadísticos de valores de la capacidad portante del suelo (CBR's). Lo que se quiere hacer con el presente proyecto es una aplicación de los métodos, a su vez que se establecerán parámetros de comparación entre uno y el otro método de ensayo para determinar la capacidad portante del tipo de suelo de los lugares respectivos. A partir de los resultados se realizará un análisis de comparación y correlación entre las dos metodologías de ensaye.

Podremos establecer una curva de correlación entre CBR convencional y CBR In Situ, a partir de ella se podrán establecer correcciones de ajuste tanto de CBR In Situ a CBR Convencional, como viceversa, facilitando comprobaciones en campo.

1.2 Situación problemática

En la actualidad en nuestro departamento, no existen estudios referentes a una comparación entre el ensayo de CBR in situ y el CBR convencional. El ensayo de CBR convencional que actualmente utiliza el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho es un ensayo que se vino realizando tanto en prácticas estudiantiles así como también en estudios para empresas externas, el problema de este ensayo es el tiempo que toma el realizarlo, tanto desde la extracción de la muestra como en el transporte de la misma y su posterior caracterización, debido a ello se presenta la opción de realizar el ensayo de CBR in situ mediante la cual se podrá eliminar la variable de tiempo debido a que el ensayo se realiza directamente en el terreno donde se emplazara la carretera, los resultados que nos brinde dicho ensayo de CBR in situ deben ser resultados que sean concordantes con los de CBR convencional, para así poder tomarlos como resultados confiables y aplicarlos en el campo académico y laboral.

1.2.1 Problema

¿Cómo determino la correlación entre el CBR in situ y CBR convencional, para validar la aplicación del ensayo CBR in situ en suelos subrasantes?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

Es importante estudiar este problema para encontrar la relación que existe entre los resultados de un CBR In Situ y los resultados de un CBR Convencional, para finalmente establecer su aplicación en subrasantes.

En nuestro medio, aún no se aplica el ensayo de CBR In Situ, porque no hay la confiabilidad de sus resultados, sin embargo, el Laboratorio de Suelos de la U.A.J.M.S. cuenta a disposición dicho equipo.

Por lo tanto, el equipo de CBR In Situ puede ser utilizado directamente en obra para los estudios de CBR que se realicen en subrasantes, capas sub-base y base de un paquete estructural de pavimento.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema

El presente estudio se realizó dentro del municipio de Tarija, en subrasantes que no fueron mejoradas, ni contaban con paquete estructural.

Por las condiciones del estudio, se realizaron ensayos in situ y en laboratorio. Los ensayos in situ fueron: CBR In Situ, densidad In Situ, y extracción de muestras de suelo, los mismos que se realizaron en un tiempo de 3 meses. Los ensayos en laboratorio fueron: CBR convencional, compactación, humedad natural, granulometría, límites de consistencia Atterberg y clasificación, los mismos que fueron realizados en un tiempo aproximado de 8 meses.

1.3 Justificación

Comprender el comportamiento del CBR “in situ” tomando como patrón el CBR “Convencional” hará posible seleccionar, con un nivel de confianza, el valor de la capacidad de soporte de la subrasante. Con esta información se podrían proponer herramientas de evaluación y gestión más precisas.

El laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho actualmente cuenta con el equipo necesario para la realización de CBR in situ. Y dicho equipo no se encuentra en uso, tampoco cuenta con una estimación o algún parámetro que pueda referenciar que ensayo de laboratorio (CBR in situ o CBR convencional) es más ventajoso y tiene más precisión en sus resultados, es por eso que mediante el presente proyecto se busca encontrar un parámetro estadístico que indique cual de ambos métodos es más efectivo tanto en la parte técnica, económica y determinar cual nos da resultados más concordes a la realidad del terreno.

1.4 Objetivos del proyecto

Los objetivos del proyecto se dividen en objetivo general y objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo general

Correlacionar los resultados del CBR In Situ con el CBR Convencional, para determinar la confiabilidad de la aplicación del CBR In Situ en suelos subrasantes.

1.4.2 Objetivos específicos

- Buscar información bibliográfica para respaldar la aplicación y metodología práctica de los ensayos de CBR In Situ y CBR convencional.
- Realizar en los tramos de subrasantes propuestos, ensayos en campo (CBR in situ y densidad in situ), extracción de muestras de suelos, y ensayos de laboratorio (humedad natural, granulometría, límites de consistencia, compactación y CBR).
- Aplicar el programa computacional STATGRAPHICS a los datos de CBR In Situ y CBR convencional, para determinar su correlación.
- Realizar un análisis estadístico correlacional-descriptivo.
- Establecer conclusiones y recomendaciones a partir de todo el proceso realizado en esta investigación según resultados.

1.5 Hipótesis

Si realizo, en diferentes tramos con subrasantes, ensayos de CBR In Situ y luego tomo muestras de suelo para llevarlos al laboratorio y realizar ensayos de CBR convencional, entonces podré correlacionar sus resultados y definir si es confiable o no, aplicar el ensayo de CBR In Situ en nuestro medio.

1.6 Operacionalización de las variables

Las variables independiente y dependiente son:

1.6.1 Variable independiente

- CBR In Situ.

1.6.2 Variable dependiente

- CBR convencional al 100%.
- CBR convencional al 95%.

1.7 Identificación del tipo de investigación

Investigación correlacional.- La investigación correlacional es un tipo de investigación no experimental en la que los investigadores miden dos variables y establecen una relación

estadística entre las mismas (correlación), sin necesidad de incluir variables externas para llegar a conclusiones relevantes.

La investigación correlacional consiste en buscar diversas variables que interactúan entre sí, de esta manera cuando se evidencia el cambio en una de ellas, se puede asumir cómo será el cambio en la otra que se encuentra directamente relacionada con la misma.

Sin embargo, la característica más importante de la investigación correlacional es que las dos variables tratadas son medidas (sin ser manipuladas) y los resultados son ciertos independientemente del tipo de variable (cuantitativa o categórica).

La investigación correlacional tiene sus bases en numerosas pruebas estadísticas que señalan coeficientes de correlación entre las variables. Estos coeficientes son representados numéricamente para indicar la fuerza y dirección de una relación.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestral

Las unidades de estudio y decisión muestral son:

1.8.1 Unidad de estudio

- Suelos

1.8.2 Población

- Subrasantes

1.8.3 Muestra

Se realiza el estudio de 4 tramos de subrasantes de la ciudad de Tarija, los tramos propuestos son:

B./ La Cañada – Z./ Monte Sud

B./ Luis Espinal – B./ Monte Cristo

B./ San Antonio – B./ Medinacelli

Z./ Nueva Terminal – Z./ Pampa Galana

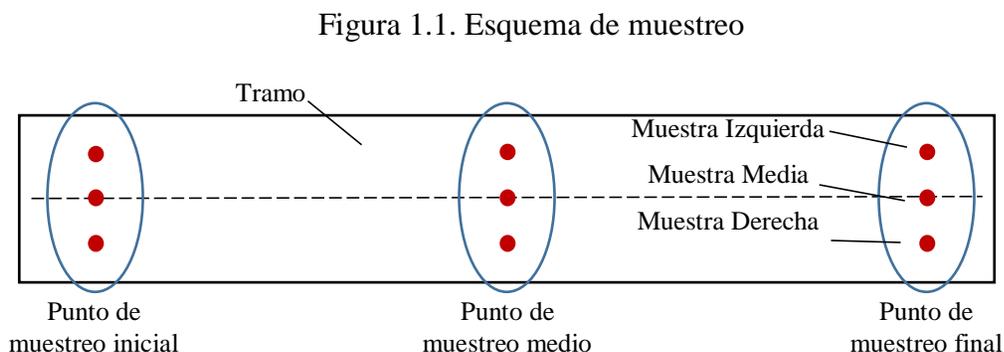
De cada tramo se estudian 3 puntos (inicial, medio y final), y en cada punto se realizan 3 ensayos de CBR propuesto, haciendo un total de 36 muestras, superando las 30 muestras mínimas propuesta por la junta del Departamento de Topografía y Vías de Comunicación.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

La técnica de muestreo seleccionado es por conveniencia, por lo tanto, es un muestreo no probabilístico y no aleatorio.

Este muestreo por conveniencia consiste en seleccionar los tramos de diferentes puntos cardinales de la ciudad de Tarija, es decir son subrasantes que no fueron pavimentados todavía porque no tienen paquete estructural.

En la siguiente figura se detalla el esquema de toma de muestras.



Fuente: Elaboración propia.

A partir de la figura 1.1, se observa que de un tramo de subrasante, se eligen tres puntos de muestreo, uno al inicio, otro al medio y otro al final, y de cada punto de muestreo se obtienen tres muestras, uno del carril derecho, otro del carril medio y otro del carril izquierdo, por lo tanto, finalmente se obtiene el siguiente número de muestras:

Tabla 1.1. Número de muestras

Tramo	Punto de muestreo	Nº de muestra
B./ La Cañada - Z./ Monte Sud	1	1
		2
		3
	2	4
		5
		6
	3	7
		8
		9

B./ Luis Espinal - B./ Monte Cristo	4	10 11 12
	5	13 14 15
	6	16 17 18
B./ San Antonio – B./ Medinacelli	7	19 20 21
	8	22 23 24
	9	25 26 27
Z./ Nueva Terminal - Z./ Pampa Galana	10	28 29 30
	11	31 32 33
	12	34 35 36

Fuente: Elaboración propia.

1.8.5 Parámetros de muestreo

Los parámetros de muestreo son de tipo Cuantitativo - Descriptivo, porque los ensayos a realizar generan valores que describen el comportamiento de las diferentes muestras.

Los datos cuantitativos son la base del análisis estadístico, son datos que se puede medir y verificar, que nos dan información acerca de las cantidades; es decir, información que puede ser medida y escrita con números. En otras palabras, las tablas de contenidos descriptivos describen las características básicas de los datos en términos cuantitativos.

En la tabla 1.2 se muestran los parámetros de muestreo para cada punto en estudio:

Tabla 1.2. Parámetros de muestreo

Punto	Descripción de ensayos de caracterización		N° de muestra	Descripción de ensayos en estudio	
	In Situ	Laboratorio		In Situ	Laboratorio
1	- Densidad in situ.	- Humedad natural.	1	CBR in situ	CBR convencional
	- Extracción de muestras de suelo.	- Granulometría.	2	CBR in situ	CBR convencional
		- Límites de Atterberg. - Clasificación. - Compactación.	3	CBR in situ	CBR convencional

Fuente: Elaboración propia.

1.9 Métodos y técnicas empleadas

Los métodos y técnicas empleadas son los siguientes:

1.9.1 Métodos

Para realizar el presente estudio se aplicaron dos métodos fundamentales:

Método in situ. – Este método de estudio designa el análisis de un fenómeno exactamente en el lugar y condiciones donde el mismo se desarrolla (sin desplazamiento a un medio o lugar especial, y sin modificación de las condicionantes usuales o naturales).

Las investigaciones in situ son esenciales para obtener parámetros y propiedades geológicas-geotécnicas que constituyen el terreno donde se va realizar el estudio.

Los equipos son diseñados para trabajar en campo, soportar las inclemencias climatológicas, y tienen características diferentes a los equipos de laboratorio.

Método en laboratorio. – Este método de estudio se caracteriza por contar con medios necesarios para realizar investigaciones, experimentos, prácticas y trabajos de carácter científico, tecnológico o técnico; está equipado con instrumentos específicos de medida o equipos especializados y calibrados, con los que se realizan experimentos, investigaciones y prácticas diversas.

Estos laboratorios se encuentran dentro de una estructura cerrada, proporcionando un ambiente ideal climatológicamente y en óptimas condiciones de limpieza. En estos

espacios, las condiciones ambientales se controlan y se normalizan para evitar que se produzcan influencias extrañas a las previstas, con la consecuente alteración de las mediciones, y para permitir que las pruebas sean repetibles.

Las pruebas en laboratorio, también funcionan como complemento para un estudio in situ, y varía según la investigación.

1.9.2 Técnicas

Según el método empleado, se utilizaron las siguientes técnicas:

CBR in situ. – El Ensayo CBR In Situ (California Bearing Ratio In Place: Ensayo de Relación de Soporte de California en el Sitio), se lo realiza en el lugar y mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo. Este ensayo se usa para la evaluación de la calidad de la subrasantes, pero también es aplicable a materiales de subbase y base. Se utiliza el ensayo in situ para determinar su CBR con el fin de evaluar y diseñar la estructura de un pavimento. Los parámetros que contribuyen a los resultados son la humedad natural y la densidad in situ.

Densidad in situ. – Esta técnica nos permite conocer la densidad que posee un suelo en terreno o en su estado natural, se realiza para comprobar el grado de compactación en suelos naturales, subrasantes, sub-bases, bases y otros tipos de rellenos compactados artificialmente.

Entre los métodos utilizados, se encuentran el método del cono de arena, el del balón de caucho e instrumentos nucleares entre otros. Para la presente investigación se hizo el uso del cono de arena. Este ensayo representa una forma indirecta de obtener el volumen del agujero utilizando para ello, una arena estandarizada.

CBR convencional. – El ensayo CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California), se lo realiza en laboratorio y mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, sub base y base de pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad. Este es uno de los parámetros necesarios obtenidos en los estudios geotécnicos previos a la construcción, como también lo son el Ensayo Próctor y los análisis granulométricos del terreno.

Compactación próctor modificado. – El ensayo de compactación Próctor es uno de los más importantes procedimientos de estudio y control de calidad de la compactación de un terreno. A través de él es posible determinar la densidad seca máxima de un suelo en relación con su grado de humedad, a una energía de compactación determinada.

Existen dos tipos de ensayo Próctor normalizados; el "Ensayo Próctor Standard", y el "Ensayo Próctor Modificado". La diferencia entre ambos se encuentra en la energía utilizada. Este ensayo Próctor Modificado abarca los procedimientos de compactación usados en Laboratorio, para determinar la relación entre el Contenido de Agua y Peso Unitario Seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 4 ó 6 pulgadas (101,6 ó 152,4 mm) de diámetro con un pisón de 10 lbf (44,5 N), una masa de 4,535 kg que cae de una altura de 18 pulgadas (457 mm), produciendo una Energía de Compactación de 56.000 lb-pie/pie³ (2.700 kN-m/m³).

1.10 Procesamiento de la información

La información obtenida, es decir, datos cuantitativos – descriptivos, de los suelos de las subrasantes en estudio por medio de métodos y técnicas empleadas, se procede a transcribir en planillas Excel, para realizar el análisis estadístico por dos métodos, el primero por el programa Excel y el segundo por el programa STATGRAPHICS, con este último se define la correlación del CBR InSitu con el CBR convencional.

1.11 Alcance de la investigación

El alcance del presente estudio va de acuerdo a la disponibilidad de equipo de CBR convencional en laboratorio y CBR In Situ de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho” se procede a realizar el estudio en las subrasantes de los barrios La Cañada – Monte Sud, Luis Espinal – Monte Cristo, San Antonio – Medinacelli y Nueva Terminal – Pampa Galana, para obtener valores de CBR In Situ y CBR en Laboratorio que permiten determinar la correlación que existe entre ambos.

La investigación se realizó con previa revisión y recopilación bibliográfica de la documentación existente referente a la investigación.

Posteriormente se realiza el desarrollo de la investigación realizando los siguientes pasos:

- Muestro de los suelos, con tres muestras de subrasantes por cada barrio en estudio, haciendo un total de 12 puntos.
- Ensayos en el sitio:
 - CBR in situ
 - Densidad in situ
 - Calicatas
- Ensayos en laboratorio:
 - Caracterización de muestras:
 - Ensayo de contenido de humedad
 - Ensayo de granulometría de los suelos
 - Ensayo de consistencia de los suelos (límites de Atterberg)
 - Clasificación de los suelos mediante los dos métodos SUCS y AASHTO.
 - Compactación T-180
 - CBR convencional
- Con los datos obtenidos de los ensayos se realizaron los cálculos respectivos plasmados en planillas.
- Después se realizó un análisis comparativo los resultados de CBR in situ y CBR convencional, como también de la densidad máxima de laboratorio y densidad in situ.
- Posteriormente se establece la correlación entre CBR in situ y CBR convencional, según la mejor regresión de ajuste de modelos matemáticos.
- Por último, se realizó un análisis de resultados, generando conclusiones y recomendaciones de toda la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

Para conocer a mayor profundidad la importancia del CBR, es necesario tener en claro los conceptos básicos de lo que es un suelo, sus características y definir la diferencia o la correlación de relación de soporte, entre CBR convencional realizado en laboratorio y el CBR In Situ como una alternativa de evaluación directa en el sitio, de los suelos de las subrasantes en estado natural.

Para ello es necesario conocer algunos conceptos relevantes con este estudio.

2.2. Subrasante

Subrasante se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. En la década del 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje. Desde las postrimerías de la década del 50, se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la subrasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos. Ensayos usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR, compresión simple son reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas, que representan mucho mejor lo que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- Propiedades físicas. - Son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
- Propiedades ingenieriles. - Dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el valor soporte del suelo (CBR), el módulo resiliente, el módulo de Poisson y el módulo de reacción de la subrasante.

2.3. Suelo

Una subrasante al estar conformada por suelo, es necesario conocer a gran profundidad el término suelo, como se describe a continuación.

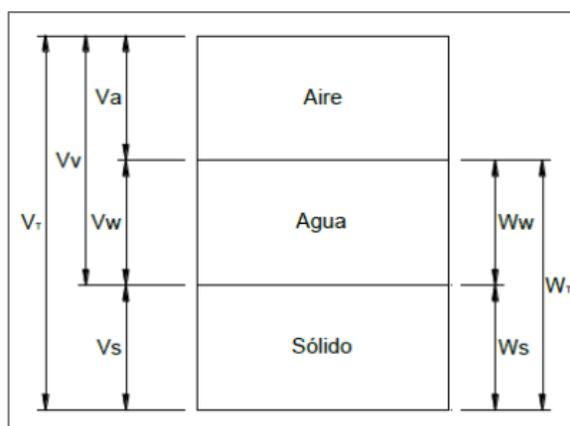
2.3.1. Definición

Desde el punto de vista de la ingeniería, suelo es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas y especialmente las propiedades mecánicas. Desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos se diferencia del término roca al considerarse específicamente bajo este término un sustrato formado por elementos que pueden ser separados sin un aporte significativamente alto de energía. Se considera suelo al sistema multifase formado por:

- Fase sólida, que constituyen el esqueleto de la estructura del suelo
- Fase líquida (generalmente agua)
- Fase gaseosa (generalmente aire) que ocupan los intersticios entre los sólidos.

Como se indica en la siguiente figura:

Figura 2.1. Fases del suelo



Fuente: Bowles, Joseph E., (1981). Manual de Laboratorio de Suelos.

Pueden distinguirse tres grupos de parámetros que permiten definir el comportamiento del suelo ante la obra que en él incide:

- Los parámetros de identificación.
- Los parámetros de estado.
- Los parámetros estrictamente geomecánicos.

Entre los parámetros de identificación son los más significativos la granulometría (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado) y la plasticidad (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua). El tamaño de las partículas va desde los tamaños granulares conocidos como gravas y arenas, hasta los finos como la arcilla y el limo. Las variaciones en la consistencia del suelo en función del contenido en agua diferencian también las mencionadas clases granulométricas principales.

Los parámetros de estado fundamentales son la humedad (contenido en agua del agregado), y la densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes.

En función de la variación de los parámetros de identificación y de los parámetros de estado varía el comportamiento geomecánico del suelo, definiéndose un segundo orden de parámetros tales como la resistencia al esfuerzo cortante, la deformabilidad o la permeabilidad.

La composición química y/o mineralógica de la fase sólida también influye en el comportamiento del suelo, si bien dicha influencia se manifiesta esencialmente en suelos de grano muy fino (arcillas). De la composición depende la capacidad de retención del agua y la estabilidad del volumen, presentando los mayores problemas los minerales arcillosos. Éstos son filosilicatos hidrófilos capaces de retener grandes cantidades de agua por adsorción, lo que provoca su expansión, desestabilizando las obras si no se realiza una cimentación apropiada. También son problemáticos los sustratos colapsables y los suelos solubles.

De manera genérica, es usual hablar de movimiento de suelos incluyendo en el concepto el trabajo con materiales, como rocas y otros, que sobrepasan la definición formal.

2.3.2. Características de los suelos

Las características del suelo son:

2.3.2.1. Tamaño de las partículas del suelo

De acuerdo al tamaño predominante de partículas que contenga el suelo, los suelos generalmente son llamados: grava, arena, limo, arcilla o una mezcla de ellos, según como se demuestra en el cuadro siguiente.

Tabla 2.1. Sistema para identificar el tamaño de la partícula

Nombre de la organización	Tamaño de partículas en mm			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	< 0,002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	< 0,003
American Association of Highway and Transportation (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	< 0,004
Unifield Soil Classification System (US)	75 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (limos y arcillas)	

Fuente: Bowles, Joseph E., (1981). Manual de Laboratorio de Suelos.

Diversas organizaciones que estudian aspectos relacionados con el suelo han elaborado sistemas de clasificación para identificar el tamaño de las partículas de un suelo para sus propósitos específicos. En la Tabla 2.1 se muestra algunos de los sistemas más conocidos empleados por estas organizaciones para identificar las partículas del suelo.

El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ha sido adoptado como el estándar por la American Society for Testing and Materials (ASTM) y el reglamento que esta sociedad ha desarrollado para el análisis y estudio del suelo es aceptado a nivel internacional.

Grava

Según la norma ASTM D2487-00 el tamaño de estas partículas varía de 75 a 4.75 mm, estas a su vez están divididas en dos categorías: grava gruesa que está comprendida entre 75 y 19 mm y grava fina que está comprendida entre 19 y 4.75 mm.

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de roca de textura redondeada, debido al desgaste que sufren las partículas al ser transportadas por las corrientes de los

ríos. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, márgenes, en los conos de deyección de los ríos y en depósitos con grandes cantidades.

Arena

Se llama arena a las partículas granulares de textura variada procedentes de la desintegración de las rocas o de su trituración artificial y cuyo tamaño según la norma ASTM D2487-00 varía entre 4.75 a 0.075 mm, la arena está clasificada en tres categorías: arena gruesa que tiene un tamaño de 4.75 a 2 mm, la arena mediana de un tamaño comprendido entre 2 y 0.425 mm y la arena fina comprendida entre 0.425 y 0.075 mm. El origen y la existencia de la arena es análoga a la de la grava, comúnmente las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. Principalmente está compuesta de cuarzo y otros minerales que dan resistencia mecánica a las partículas.

Limo

El limo es una partícula mineral pequeña de textura granular o escamosa, que suele encontrarse en las canteras y en los ríos. El tamaño de las partículas de limo según la norma ASTM D2487-00 es menor a 0.075 mm. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. El suelo compuesto por limo es relativamente impermeable, fácilmente erosionable.

Arcilla

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas de textura escamosa, compuestas de minerales de arcilla con un tamaño diminuto mucho menor a 0.075 mm. La arcilla químicamente es un silicato hidratado de: aluminio, hierro o magnesio. Las microestructuras que forman las partículas diminutas que componen la arcilla ocasionan que esta sea poco permeable y el contenido de humedad comunica a la masa de suelo la propiedad plástica.

Material coloidal

Existen también partículas muy pequeñas que no pueden llegar a ser vistas fácilmente. Las partículas con tamaño menor a 2 μ m, constituyen la fracción más fina de los suelos.

Que pueden ser distinguidas con la ayuda de un microscopio potente y su estructura molecular puede ser analizada por medio de los rayos X, a este tipo de partículas se las conoce como coloide o ultra-arcilla. Estas partículas debido a su tamaño no suelen considerarse dentro los sistemas de clasificación, pero forman parte de la fracción fina del suelo.

2.3.2.2. Formación

La formación de los suelos es un proceso continuo en el tiempo y que se ve influido por cinco factores, estos son:

- Clima
- Material parental o de origen
- Relieve
- Organismos
- Tiempo cronológico

Estos factores no forman el suelo, pero si controlan a los procesos que intervienen en la formación. Los factores son considerados como variables independientes que interactúan para generar un tipo de suelo específico, con características y propiedades únicas y distintivas.

Clima

Este factor es sin duda uno de los más importantes en la formación del suelo ya que además de influenciar directamente a los procesos que intervienen en la formación de este recurso, afecta directa o indirectamente a los otros factores de formación, como por ejemplo a los organismos. Este factor de formación considera los efectos que principalmente tienen la precipitación y la temperatura (a nivel de regiones climáticas) en el desarrollo del suelo. Es fácil de inferir que los suelos desarrollados en zonas tropicales, en que las temperaturas medias son elevadas y las precipitaciones son cuantiosas, los suelos tendrán un desarrollo y características muy diferentes a la de suelos desarrollados en regiones áridas, mediterráneas o templado húmedas. A mayor precipitación, la vegetación presenta un mayor desarrollo y por lo tanto, existen mayores aportes de material orgánico al suelo. Así mismo, mayores montos de precipitación se ven asociados en cambios de pH en el suelo

debido al efecto de lixiviación de las bases de cambio que provoca el agua en el suelo. Con mayor temperatura y precipitación, los suelos se tornan más rojizos debido al incremento en la formación de arcillas y al incremento en las formas deshidratadas de óxidos de hierro. A un nivel más local, las diferencias en altura también provocan variaciones en el clima.

Aumentos en altitud van asociados a incrementos en las precipitaciones y a disminuciones en las temperaturas, lo cual se refleja necesariamente en el desarrollo de los suelos.

Material parental

Este factor se refiere a los diferentes materiales rocosos y minerales que darán origen al suelo. Diferentes materiales parentales crean diferentes suelos, con diferentes propiedades. En general las rocas que originan el suelo se clasifican en rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas.

Cada uno de estos tres tipos generales de roca presenta una inmensa variedad de subtipos de rocas, cada una de las cuales, presenta sus propias características físicas (ejemplo, dureza), químicas y mineralógicas. Por lo tanto, la formación de los suelos estará en directa relación al o los tipos de roca que conformaron el sustrato original desde el cual un determinado suelo se desarrolló.

Topografía

La topografía, afecta el balance hídrico y la infiltración de agua, el microclima (radiación solar y temperatura), los procesos de erosión y deposición, la vegetación actual y los procesos básicos de formación de suelo. Un claro ejemplo del efecto de la topografía lo podemos ver en los cerros y montañas de la Cordillera. Los suelos desarrollados en exposición sur presentan mayor desarrollo y profundidad que los suelos desarrollados en la exposición norte. Las laderas de exposición sur reciben menor radiación y tienen, por lo tanto, mayor almacenamiento de agua y desarrollo de vegetación.

Organismos

Las plantas son las primeras en ocupar un determinado sitio produciendo cambios en el sustrato o suelo en el cual se desarrollan. Las propiedades del suelo pueden variar en

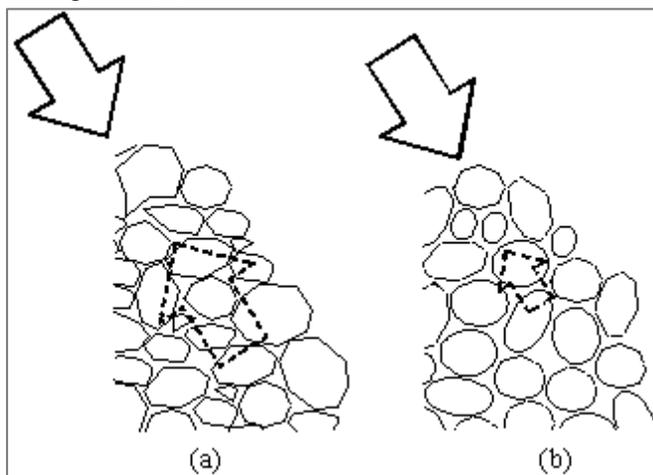
función de la distancia a una planta en particular o bien entre diferentes tipos de vegetación. Además del efecto de las plantas, la fauna del suelo afecta el desarrollo del mismo.

Tiempo

Viene a ser la disposición, arreglo geométrico u ordenación que adoptan las partículas minerales para dar lugar al conjunto llamado suelo. Existen varios factores que influyen en la estructura de suelo como ser: la textura, tamaño, composición mineralógica de las partículas y el contenido de agua del suelo.

Para el caso de suelos compuestos de partículas con forma granular, la trabazón entre partículas origina estructuras granulares simples y la fricción que se origina entre ellas contrarresta el deslizamiento de unas respecto a otras, como se muestra en la figura siguiente. A este comportamiento se lo identifica como la cohesión para el caso de suelos granulares, donde el suelo presenta resistencia contra su disgregación ocasionada por un agente externo.

Figura 1.2. Estructura que dan cohesión a los suelos granulares (a) Partículas con textura angular. (b) Partículas con textura redondeada.



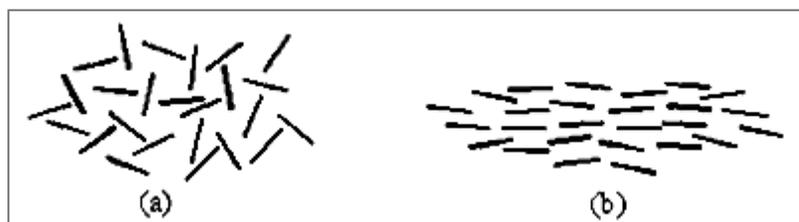
Fuente: Braja M. Das, 1998. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

El grado de cohesión que presentan los suelos granulares, está en función a la textura de las partículas de forma granular. Las partículas con textura angular (Figura 2.2.a) logran

que el suelo tenga cohesión, mientras que las partículas con textura redondeada (figura 2.2.b) no contribuyen a la cohesión del suelo.

La forma de hojuela, el tamaño y la carga eléctrica negativa superficial de las partículas compuestas de minerales de arcilla, da lugar a que estas partículas generen fuerzas de atracción y repulsión entre ellas, originando estructuras que se muestran en la figura 2.3.

Figura 2.2. Estructura de las partículas de arcilla sedimentadas.

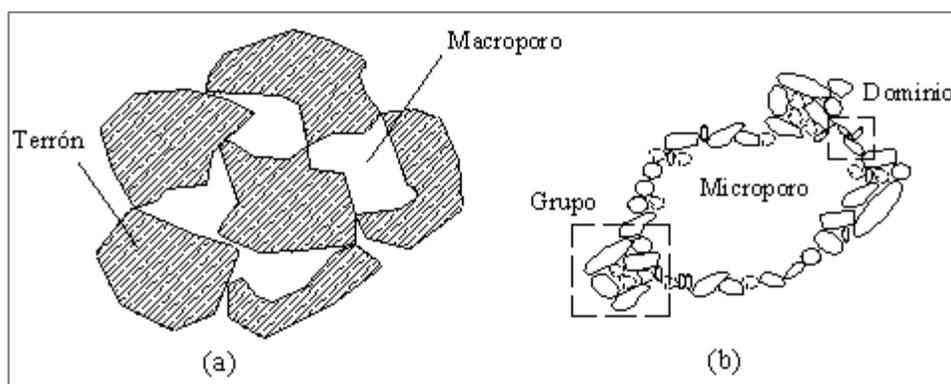


Fuente: Braja M. Das, 1998. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

En un depósito de sedimento compuesto de partículas flocladas de minerales de arcilla, se observa en el Figura 2.4, que se forman diferentes unidades estructurales microscópicas.

Figura 2.3. Estructuras microscópicas que dan cohesión al suelo (a) Macroestructura.

(b) Microestructura



Fuente: Braja M. Das, 1998. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

En la Figura 2.4.b se ve que la unión de una cantidad pequeña de partículas de minerales de arcilla es llamada: dominios, un conjunto de dominios agrupado por las fuerzas

interparticulares es llamado grupo, un grupo de dominios y racimos establecen una microestructura que encierran vacíos llamados microporos. Los racimos en grandes grupos forman un terrón (Figura 2.4.b) que son las unidades más grandes y pueden ser vistos sin un microscopio, estos agrupados en conjunto establecen una macroestructura que forma vacíos llamados macroporos. Por lo general la relación de vacíos con respecto a sólidos en un suelo compuesto de partículas arcillosas es mayor que en el caso de suelos con partículas granulares.

Las partículas de arcilla pueden tener una fuerza repulsiva si presentan cargas positivas en su superficie, por lo que sus bordes cargados se alejaran (Figura 2.4). Debido a la abundante presencia de carbonatos y algunos minerales como el sodio o cuando se agrega una solución salina, las partículas cuya capa de agua adsorbida es doble (gruesa) se repelerán con mayor magnitud. Este comportamiento de las partículas de minerales de arcilla no contribuye a que la masa de suelo tenga cohesión.

2.3.2.3. Contenido de humedad

Esta propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos, por la cantidad de agua que contienen.

El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso de del agua y el peso del suelo seco, esto se expresa en términos de porcentaje.

$$W = \frac{W_w}{W_s} 100$$

Donde:

W = contenido de humedad expresado en %

W_w = peso de agua contenido en el suelo

W_s = peso del suelo seco

2.3.2.4. Granulometría

La granulometría se define como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca.

El tamaño de los granos de un suelo se refiere a los diámetros de las partículas que lo forman, cuando es indivisible bajo la acción de una fuerza moderada. Las partículas mayores son las que se pueden mover con las manos, mientras que las más finas por ser tan pequeñas no pueden ser observadas con un microscopio.

2.3.2.5. Límites de consistencia

El método usado para medir los límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios del siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico. Los límites de Atterberg o límites de consistencia están basados en que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Por ello un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad), es decir, la propiedad que presenta los suelos hasta cierto límite sin romperse.

Límite líquido (LL)

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

Límite plástico (LP)

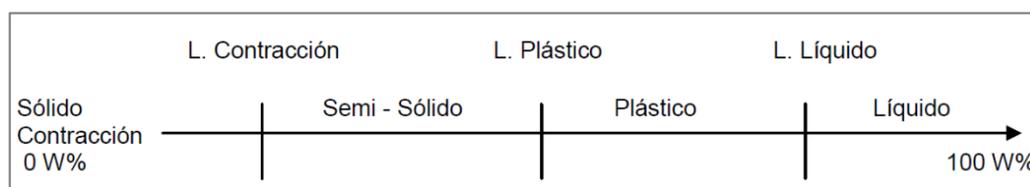
El Límite Plástico LP es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico. En este estado la mezcla se deforma a cualquier forma

bajo ligera presión. Por debajo de éste contenido de humedad la mezcla está en un estado semi sólido. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LP produce un cambio en el volumen del suelo.

Límite de contracción (LC)

El Límite de Contracción es el contenido de de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado semi sólido. Por debajo de éste contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado sólido. Cualquier incremento en el contenido de humedad está asociado con un cambio de volumen pero una reducción en el contenido de humedad no produce un cambio de volumen. Este es el mínimo contenido de humedad que provoca saturación completa del a mezcla suelo-agua. El volumen permanece constante mientras la mezcla pasa del estado seco a LC moviéndose desde saturación 0 % a 100 %. En el lado húmedo de LC el volumen de la mezcla se incrementa linealmente con el contenido de humedad.

Figura 2.4. Límites de Atterberg



Fuente: Bowles, Joseph E., (1981). Manual de Laboratorio de Suelos.

Índice plástico (IP)

El Índice de plasticidad se define como la diferencia numérica entre el Limite Líquido y el Limite Plástico:

$$Ip = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de plasticidad

LL = limite líquido

LP = limite plástico

Un Índice de plasticidad bajo, como por ejemplo del 5%, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la

condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, como por ejemplo del 20%, indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua. El Índice de plasticidad define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico. Este valor permite determinar los parámetros de asentamiento de un suelo y su expansividad potencial.

En suelos no plásticos, no es posible determinar el Índice de plasticidad.

En la siguiente tabla se presenta la calificación del rango de plasticidad del suelo de acuerdo con el valor de IP.

Tabla 2.2. Rangos de índices de plasticidad

Plasticidad	Descripción del suelo	Rango IP
Nula	Limo	0 - 3
Baja	Limo con trazas de arcilla	4 - 15
Media	Limo arcilloso Arcilla limosa Arcillas y limos orgánicos	16 - 30
Alta	Arcilla limosa Arcilla	> 31

Fuente: Holtz & Kovacs, 1999. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice.

Índice líquido (IL)

También conocido como la relación agua-plasticidad, el índice líquido IL es el índice utilizado para medir a escala el contenido de humedad natural de una muestra de suelo, respecto de los límites líquido y plástico (indirectamente sirve para tener una medida aproximada de la resistencia del material), siendo definido como:

$$IL = \frac{w_n - LP}{IP}$$

Donde:

w_n = es el contenido de humedad natural (el encontrado en campo o en estado natural) de la muestra en cuestión.

IP = Índice de plasticidad

LL = limite líquido

El IL compara el contenido natural de humedad que presenta un suelo en el campo con LL y LP, y es un excelente indicador de la historia geológica y las propiedades relativas del suelo.

Tabla 2.3. Rangos de índices de liquidez

IL	Comportamiento del suelo
< 0,0	Demostrará fractura rígida al ser sometido a corte, porque el contenido natural de humedad w_n es menor que el límite plástico LP. En este caso el suelo estará en estado sólido a semi sólido.
0,0 – 1,0	Como un plástico. Rango que comprende la mayoría de las arcillas en estado natural.
> 1,0	Será esencialmente un líquido muy viscoso cuando se somete a corte, porque el contenido natural de humedad w_n es mayor que el límite líquido LL. Tales suelos pueden ser extremadamente sensibles al colapso de la estructura del suelo. Mientras no sean alterados de manera alguna pueden ser relativamente fuertes, pero si por alguna razón son sometidos a corte (remoldeo) y la estructura del suelo colapsa, entonces literalmente pueden fluir como un líquido viscoso. Hay depósitos de arcillas ultra sensibles (licuables o rápidas) en Canadá oriental y Escandinavia.

Fuente: Holtz & Kovacs. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice.

2.3.2.6. Densidad

Mediante la determinación de la densidad se puede obtener la porosidad total del suelo. Se refiere al peso por volumen del suelo. Existen dos tipos de densidad, real y aparente. La densidad real, de las partículas densas del suelo, varía con la proporción de elementos constituyendo el suelo y en general está alrededor de 2,65. Una densidad aparente alta indica un suelo compacto o tenor elevado de partículas granulares como la arena. Una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido para el crecimiento de las plantas.

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 Próctor.)

2.3.3. Clasificación de suelos

Los suelos se pueden clasificar por dos métodos: AASTHO y SUCS.

2.3.3.1. Sistema de clasificación AASHTO

El sistema de clasificación American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (Designación ASTM D-3282; método AASHTO M145) es uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos, desarrollado por Terzaghi y Hogentogler en 1928. Este sistema pasó por varias revisiones y actualmente es usado para propósitos ingenieriles enfocados más en el campo de las carreteras como la construcción de los terraplenes, subrasantes, sub bases y bases de las carreteras. Sin embargo, es necesario recordar que un suelo que es bueno para el uso de sub-rasantes de carreteras puede ser muy pobre para otros propósitos.

Este sistema de clasificación está basado en los resultados de la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un índice de grupo, que es un valor calculado a partir de una ecuación empírica. El comportamiento geotécnico de un suelo varía inversamente con su índice de grupo, es decir que un suelo con índice de grupo igual a cero indica que es material “bueno” para la construcción de carreteras, y un índice de grupo igual a 20 o mayor, indica un material “muy malo” para la construcción de carreteras.

Los suelos clasificados dentro los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares de los cuales 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200. Los suelos que

tienen más del 35% de partículas que pasan a través del tamiz N° 200 se clasifican dentro de los grupos de material fino A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos suelos son principalmente limo y materiales de tipo arcilla.

El sistema de clasificación AASHTO presenta las siguientes características:

- Características del sistema de clasificación AASHTO (ASTM D-3282)
- Procedimiento de clasificación AASHTO
- Cálculo del índice de grupo

En esta clasificación los suelos se clasifican en siete grupos (A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7), según su granulometría y plasticidad. Más concretamente, en función del porcentaje que pasa por los tamices N° 200, 40 y 10, y de los Límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz N° 40. Estos siete grupos se corresponden a dos grandes categorías de suelos, suelos granulares (con no más del 35% que pasa por el tamiz N° 200) y suelos limo-arcillosos (más del 35% que pasa por el tamiz N° 200). La categoría de los suelos granulares; gravas, arenas y zahorras; está compuesta por los grupos A-1, A-2 y A-3, y su comportamiento en explanadas es, en general, de bueno a excelente, salvo los subgrupos A-2-6 y A-2-7, que se comportan como los suelos arcillosos debido a la alta plasticidad de los finos que contiene, siempre que el porcentaje de estos supere el 15%.

Suelos granulares

Los grupos incluidos por los suelos granulares son los siguientes:

- A-1: Corresponde a una mezcla bien graduada de gravas, arenas (gruesa y fina) y finos no plásticos o muy plásticos. También se incluyen en este grupo las mezclas bien graduadas de gravas y arenas sin finos.
- A-1-a: Incluye los suelos con predominio de gravas, con o sin material fino bien graduado.
- A-1-b: Incluye suelos constituidos principalmente por arenas gruesas, con o sin material fino bien graduado.
- A-3: Corresponde, típicamente, a suelos constituidos por arena fina de playa o de duna, de origen eólico, sin finos limosos o arcillosos o con una pequeña cantidad

de limo no plástico. También incluyen este grupo, los depósitos fluviales de arena fina mal graduada con pequeñas cantidades de arena gruesa o grava.

- A-2: Este grupo comprende a todos los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz N° 200 y que no pueden ser clasificados en los grupos A-1 y A-3, debido a que el porcentaje de finos o la plasticidad de estos (o ambas cosas) están por encima de los límites fijados para dichos grupos. Por todo esto, este grupo contiene una gran variedad de suelos granulares que estarán entre los correspondientes a los grupos A-1 y A-3 y a los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.
- A-2-4 y A-2-5: En estos subgrupos se incluyen los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz N° 200 y cuya fracción que pasa por el tamiz N° 40 tiene las características de los grupos A-4 y A-5, de suelos limosos. En estos subgrupos están incluidos los suelos compuestos por grava y arena gruesa con contenidos de limo o índices de plasticidad por encima de las limitaciones del grupo A-1, y los suelos compuestos por arena fina con una proporción de limo no plástico que excede la limitación del grupo A-3.
- A-2-6 y A-2-7: En estos subgrupos se incluyen suelos como los descritos para en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto que los finos contienen arcilla plástica con tienen las características de los grupos A-6 y A-7.

La categoría de los suelos limo-arcillosos está compuesta por los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, cuyo comportamiento en explanadas va de regular a malo. En esta categoría los suelos se clasifican en los distintos grupos atendiendo únicamente a su límite líquido y a su índice de plasticidad, según las zonas del siguiente gráfico de plasticidad. De esta forma se clasifican también los suelos del grupo A-2 en los distintos subgrupos.

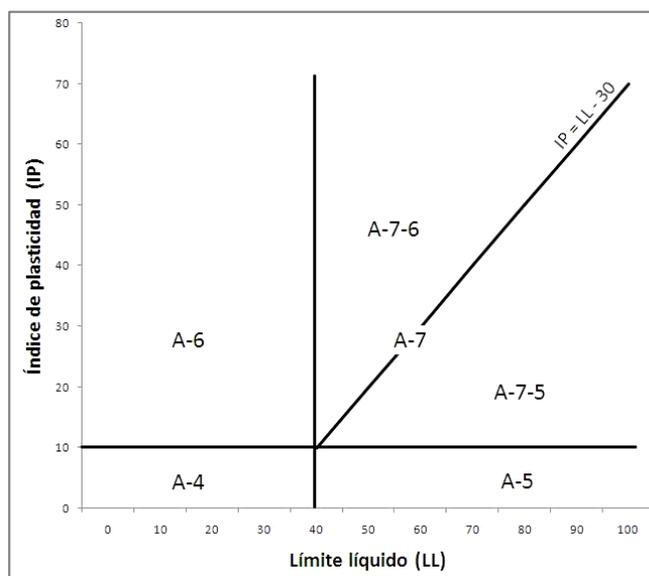
Suelos Finos

Los grupos incluidos en los suelos finos son los siguientes:

- A-4: El suelo típico de este grupo es un suelo limoso no plástico o moderadamente plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz N° 200. También se incluyen en este grupo los suelos constituidos por mezclas de suelo fino limosos y hasta un 64% de gravas y arenas.

- A-5: El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-4, salvo que suele tener carácter diatomáceo o micáceo, y pueden ser muy compresibles, como indica su elevado límite líquido.
- A-6: El suelo típico de este grupo es un suelo arcilloso plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz N° 200. También se incluyen en este grupo las mezclas de suelo fino arcilloso y hasta un 64% de gravas y arenas. Estos suelos, experimentan generalmente grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.
- A-7: El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-6, salvo que tiene las características de elevado límite líquido del grupo A-5, y puede ser elástico y estar sujeto a grandes cambios de volumen
- A-7-5: Se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad moderado en relación con el límite líquido y que pueden ser altamente compresibles, además de estar sujetos a importantes cambios de volumen
- A-7-6: Se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad elevado en relación con el límite líquido y que están sujetos a cambios de volumen muy importantes.

Figura 2.5. Carta de plasticidad AASHTO



Fuente: Bowles, Joseph E., (1981). Manual de Laboratorio de Suelos.

Índice de grupo (IG)

La clasificación realizada de esta manera se complementa con el índice de grupo, que permita caracterizar mejor cada suelo dentro de los grupos, ya que estos admiten suelos con porcentajes de finos y plasticidad muy diferentes. El índice de grupo se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$IG = (F - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde:

F = Porcentaje en peso que pasa por el tamiz N° 200 del material inferior a 75 mm, expresado en número entero.

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

El índice de grupo se expresa en números enteros positivos (un número negativo se expresará como IG = 0) y se escribe entre paréntesis a continuación de los símbolos de grupo o subgrupo correspondientes, por ejemplo, A-2-4 (0). Generalmente cuanto menor es el IG de un suelo, mejores son las cualidades del suelo como explanada o capa de asiento del firme. Los suelos de los grupos A-1, A-3, A-2-4 y A-2-5, que pueden calificarse de buenos a excelentes, tienen un IG = 0. Un IG = 20 o mayor corresponde a un suelo de muy mala calidad, en condiciones medias de drenaje y compactación. El valor crítico de finos es F = 35 con independencia de la plasticidad, y si el índice de plasticidad es superior a 10 este valor será F = 15. Los valores críticos del límite líquido y del índice de plasticidad serán, respectivamente, 40 y 10. Por último, hay que señalar que para calcular el IG de los subgrupos A-2-6 y A-2-7 sólo se considera el segundo sumando de la expresión.

Tabla 1.4. Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz N° 200)							Materiales limo arcillosos (más de 35% pasa el tamiz N° 200)			
Clasificación de grupo	A - 1		A - 3 ^A	A - 2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
N° 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
N° 40 (425 m)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
N° 200 (75 m)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	37 mín.	38 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	40 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limo arcillosos				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^A La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2

^B El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30

Fuente: Norma AASHTO.

2.3.3.2. Sistema de clasificación SUCS

La determinación y cuantificación de las diferentes propiedades de un suelo, efectuadas mediante los ensayos vistos anteriormente, tienen como objetivo último el establecimiento de una división sistemática de los diferentes tipos de suelos existentes atendiendo a la similitud de sus caracteres físicos y sus propiedades geomecánicas.

Una adecuada y rigurosa clasificación permite al ingeniero de carreteras tener una primera idea acerca del comportamiento que cabe esperar de un suelo como cimiento del firme, a partir de propiedades de sencilla determinación; normalmente, suele ser suficiente conocer la granulometría y plasticidad de un suelo para predecir su comportamiento mecánico. Además, facilita la comunicación e intercambio de ideas entre profesionales del sector, dado su carácter universal.

Fue Casagrande quien en 1942 ideó este sistema genérico de clasificación de suelos, que fue empleado por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los EE.UU. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial.

Diez años más tarde, y vista la gran utilidad de este sistema en Ingeniería Civil, fue ligeramente modificado por el Bureau of Reclamation, naciendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados.

Dicha clasificación se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades.

En el siguiente esquema se muestran dichos símbolos y su significación:

Tabla 2.5. Prefijos y sufijos del suelo

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien gradada	W
Arena	S	Mal gradada	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

Fuente: Braja M. Das, 1998. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo:

Tabla 2.6. Combinaciones en función de los prefijos y sufijos del suelo

Símbolo	Características generales		
GW	Gravas (>50% en tamiz N°4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien gradada
GP			Mal gradada
GM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW	Arenas (<50% en tamiz N°4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien gradada
SP			Mal gradada
SM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	Limos	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	Arcillas	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	Suelos orgánicos	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	Turba	Suelos altamente orgánicos	

Fuente: Braja M. Das, 1998. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

Como puede deducirse de la anterior Tabla, existe una clara distinción entre tres grandes grupos de suelos:

- Suelos de grano grueso (G y S).- Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, empleando el tamiz N° 200 ASTM
- Suelos de granos fino (M y C).- Formados por suelos con al menos un 50% que pasa el tamiz N° 200, de contenido en limos y arcillas
- Suelos orgánicos (O, Pt).- Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno de cimentación

Los suelos gruesos a su vez se dividen en dos grandes grupos: gravas (G), y arenas (S). El criterio para separarlos es otra vez granulométrico: si más del 50% de la fracción gruesa

se retiene en el tamiz N° 4, es una grava y si el 50% o un porcentaje mayor de la fracción gruesa para el tamiz N° 4, es una arena.

Asimismo, dentro de la tipología expuesta pueden existir casos intermedios, empleándose una doble nomenclatura; por ejemplo, una grava bien gradada que contenga entre un 5% y 12% de finos se clasificará como GW-GM.

Los suelos finos, atendiendo a sus condiciones de plasticidad (directamente relacionada con las propiedades mecánicas del suelo fino) y a su contenido orgánico (también influyente en su comportamiento) se dividen en otros tres grandes grupos. El primero está constituido por los suelos no plásticos o poco plásticos llamados Limos (prefijo M, del sueco mo a mjala); el segundo incluye los suelos plásticos denominados Arcillas (prefijo C, de clay), y el tercero corresponde a los suelos orgánicos (prefijo O, de organic).

Establecidos así los seis grandes grupos: gravas, arenas, limos, arcillas, orgánicos y muy orgánicos, pasamos a detallar la conformación de los siguientes grupos:

Clasificación de gravas

Para el caso en que el contenido de finos sea menor al 5% y mayor al 12%, se pueden tener 4 posibles dobles símbolos:

- GW-GM, grava bien gradada con limo
- GW-GC, grava bien gradada con arcilla
- GP-GM, grava mal gradada con limo
- GP-GC, grava mal gradada con arcilla

Bien gradada si: Cu 4, 1 Cc 3 y mal gradada si no cumplen con estos requisitos.

Los correspondientes ensayos de granulometría y plasticidad permitirán definir cuál de estos dobles símbolos es el correcto para un cierto suelo analizado.

Clasificación de arenas

Se sigue un procedimiento análogo al de las gravas. Así, si la fracción fina es del 5% o menos, ésta ya no tiene influencia, pero si es mayor al 12%, la influencia es decisiva. Nacen los grupos de arenas limpias y arenas sucias.

- SW-SM, arena bien gradada con limo
- SW-SC, arena bien gradada con arcilla
- SP-SM, arena mal gradada con limo
- SP-SC, arena mal gradada con arcilla

Arenas bien gradadas si: $C_u \geq 6$, $C_c \leq 3$ y arenas mal gradadas si no cumplen con estos requisitos.

Igualmente, los ensayos de granulometría y plasticidad ejecutados sobre la fracción fina del suelo analizarán permitirán definir cuál de estos doble símbolos es el correcto para cada caso.

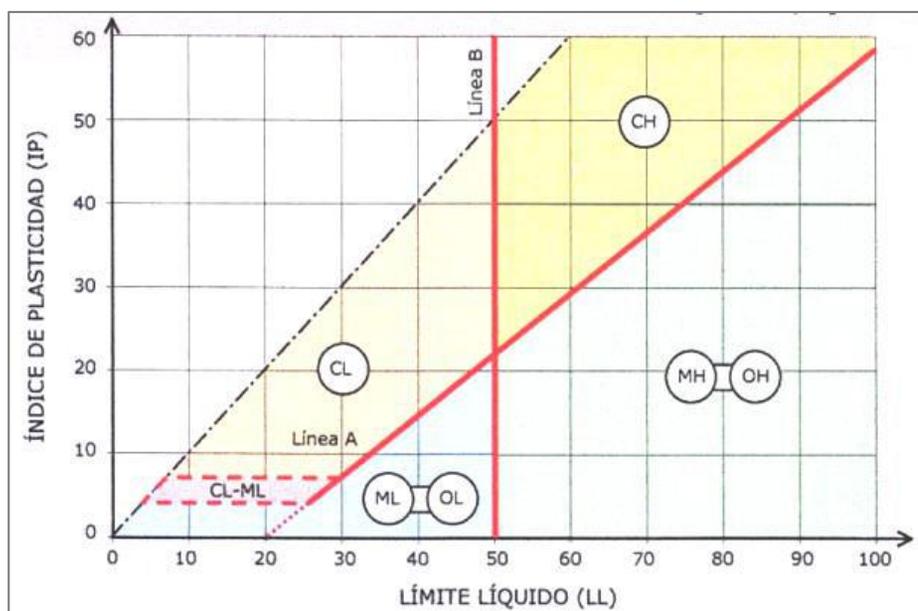
Clasificación de los suelos finos: La carta de plasticidad de Casagrande

Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de Casagrande de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:

Línea A: $IP = 0.73 (LL - 20)$

Línea B: $LL = 50$

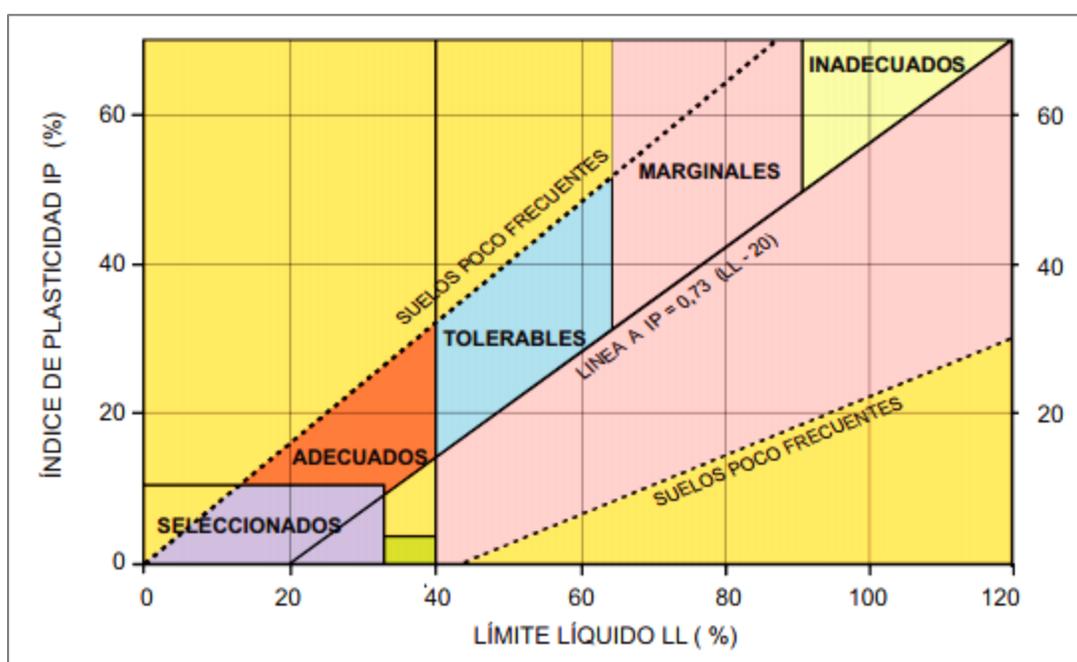
Figura 2.6. Carta de plasticidad Casagrande



Fuente: Cárdenas y Donoso, 2008. Facultad de Ingeniería. Universidad de Magallanes.

Si un suelo grueso, grava o arena, tiene una fracción fina cuyo porcentaje oscile entre 5% y 12%, y además los ensayos indican que esta fracción fina cae en la zona CL-ML, el segundo símbolo será el de una arcilla (GC o SC), y la condición de frontera se indicará en el nombre. Por ejemplo, una arena más gradada con 10% de finos, cuyo límite líquido es 20% y su índice de plasticidad es 6%, se clasificará como SP-SC y se llamará arena mal gradada con arcilla limosa. Recuérdese siempre que en el SUCS no existe triple símbolo ni otros dobles símbolos aparte de los ya indicados.

Figura 2.7. Características de los suelos



Fuente: Cárdenas y Donoso, 2008. Facultad de Ingeniería. Universidad de Magallanes.

2.4. Compactación de suelos

Se entiende por compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar artificialmente las características de resistencia, compresibilidad y el comportamiento esfuerzo – deformación de los mismos. En general implica una reducción de los vacíos y, como consecuencia de ello, en el suelo ocurren cambios volumétricos de importancia ligados a la pérdida de aire, porque por lo común no se presenta expulsión de agua.

Normalmente el esfuerzo de compactación le imparte al suelo un aumento de la resistencia al corte, un incremento en la densidad, una disminución de la contracción, una disminución de la permeabilidad y una disminución de la compresibilidad. Habitualmente esta técnica se aplica a rellenos artificiales, como terraplenes para caminos o ferrocarriles, bases o subbases para pavimentos, estabilizados, presas de tierra, etc. Sin embargo, en no pocas ocasiones se hace necesario compactar el terreno natural a fin de mejorar su capacidad portante. Un equipo vial típico empleado para compactar suelos cohesivos (arcillas-limos) es el rodillo “pata de cabra”.

Figura 2.9. Técnica de compactación en obra



Fuente: Captura de imagen tomada de www.icc.ucv.cl

La compactación es un medio importante para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los suelos, ya que facilita el acomodo de las partículas. Existen varios métodos de compactación de suelos en el laboratorio, ya que pueden ser dinámicos, estáticos, hidráulicos, por amasados o por vibración. En el caso que nos compete, estamos hablando del método dinámico, es por eso que decimos que el Próctor es una compactación dinámica, así como existen otros ensayos de este tipo.

Se utiliza en el proceso de densificación de un material mediante medios mecánicos, al aplicarse determinadas cargas a un suelo su densidad aumenta pues se disminuyen la cantidad de aire que se encuentra en los espacios vacíos que se encuentra en el material, manteniendo el contenido de humedad relativamente constante.

Beneficios de la compactación:

- Aumento de la capacidad portante del suelo.- A mayor unión entre partículas, mayor resistencia del conjunto, algo que es fundamental especialmente en firmes de carretera que van a estar sometidos a las importantes cargas del tráfico.
- Dificulta la penetración de agua.- Esto es fundamental, ya que el agua puede provocar un arrastre de partículas. Además, la acumulación de agua en el interior de capas granulares, puede ser muy perjudicial, especialmente en zonas de frecuentes heladas, ya que al congelarse, el agua aumenta su volumen, y esto puede producir graves deterioros en la capa de suelo.
- Reduce el esponjamiento y la contracción de suelos.- Cuando hay oquedades en el suelo, el agua puede penetrar y acumularse con mayor facilidad.
- Impide el hundimiento del suelo.- Un suelo mal compactado (o con una compactación insuficiente) puede dar lugar a asientos diferenciales, y a hundimientos localizados en el firme, lo que a la larga producirá la aparición de patologías.

2.4.1. Curva de compactación

La curva de compactación nos permite determinar de un modo gráfico y sencillo, cuál es la densidad seca que se puede alcanzar para un determinado valor de humedad. A continuación se verá cómo es una curva de compactación.

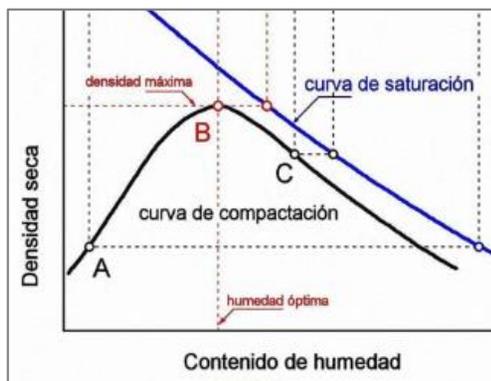
La representación gráfica de la relación densidad seca – humedad, da lugar a lo que habitualmente se denomina “curva de compactación” o “curva Proctor”.

La primera parte ascendente se denomina “rama seca”. El punto máximo superior es un punto singular, del cual se obtiene el valor de la “densidad seca máxima” y la “humedad óptima”.

La parte descendente se conoce como “rama húmeda”.

Para un mismo suelo compactado con diferentes energías de compactación, los puntos correspondientes a las densidades máximas, se ordenan sobre una línea marcadamente paralela a la curva de saturación. Además sus respectivas ramas húmedas, exhiben una considerable coincidencia y paralelismo con la curva de saturación.

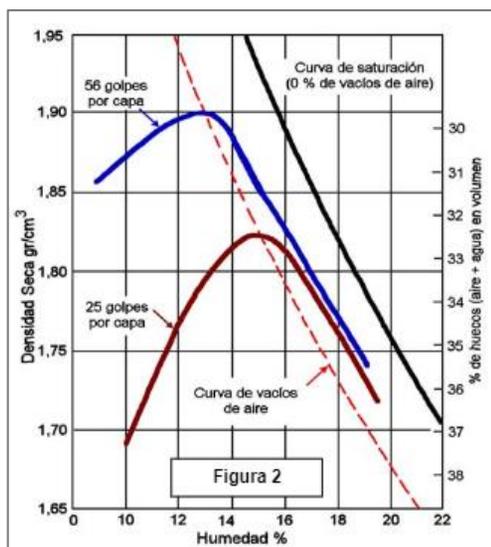
Figura 2.10. Curva de compactación y curva de saturación



Fuente: Escuela de Ingeniería Civil, 2002. Compactación de suelos y materiales estabilizados. Universidad nacional del Rosario, Argentina.

La figura 2.11 muestra las curvas de compactación para dos energías diferentes. A mayor trabajo mecánico de compactación, se obtiene una mayor densidad seca máxima y una menor humedad óptima.

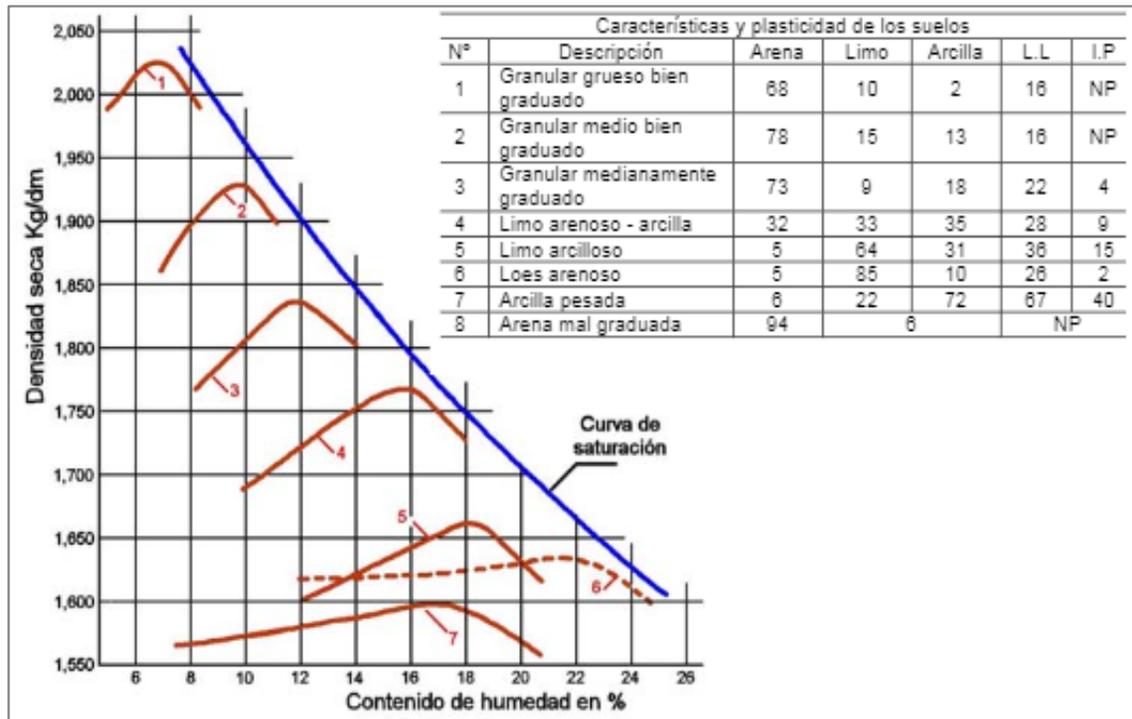
Figura 2.11. Curva de compactación según energía de compactado



Fuente: Escuela de Ingeniería Civil, 2002. Compactación de suelos y materiales estabilizados. Universidad nacional del Rosario, Argentina.

Las curvas típicas de compactación para diferentes tipos de suelos, se muestran en la siguiente figura.

Figura 2.12. Curvas típicas de compactación



Fuente: Escuela de Ingeniería Civil, 2002. Compactación de suelos y materiales estabilizados. Universidad nacional del Rosario, Argentina.

2.4.2. Método de compactación Próctor

Mediante el método Próctor se pretende obtener un dato teórico de la relación entre la humedad y el peso unitario de los suelos compactados en un molde, lo cual ayudará a obtener en un futuro un grado de compactación. Este ensayo, además, trata de simular las condiciones a las que el material está siendo sometido en determinada construcción bajo ciertas cargas estática; y, los cálculos del mismo suministran información muy valiosa para que en Ingeniería Civil se disponga en los movimientos de tierra cuales son las condiciones que se deben emplear en la compactación del material, empleando por su puesto su humedad óptima.

Dos de los ensayos más conocidos y utilizados dentro del ámbito de la compactación de suelos son el ensayo Proctor estándar y el ensayo Proctor modificado. Estos ensayos se rigen por las siguientes normas:

- Ensayo Próctor estándar.- ASTM D-698 y UNE 103-500-94.
- Ensayo Próctor modificado.- ASTM D-1557 y UNE 103-501-94.

Según la norma AASHTO, el método Próctor estándar (T-99), se emplea para los movimientos de tierra que vayan a soportar cargas estáticas como viviendas, tanques, parques, etc.; y método Próctor modificado (T-180), se emplea más que todo para obras de más alta envergadura como aeropuertos, vialidades, edificios, etc.

Estos ensayos están basados en la compactación dinámica creada por el impacto de un martillo metálico de una masa específica que se deja caer libremente desde una altura determinada, el suelo se compacta en un número de capas iguales y cada capa recibe el mismo número de golpes. Los resultados obtenidos a partir del ensayo proporcionan una curva, en la cual el pico más alto dicta el contenido de humedad óptima a la cual el suelo llega a la densidad máxima seca.

Luego de calcular estos parámetros en un laboratorio, se debe ir al sitio de la obra para determinar los porcentajes de compactación del material que se esté colocando. Esto se logra con densímetros nuclear o eléctrico, a los cuales se le introduce el valor de “densidad máxima seca” y, automáticamente, determina los valores de compactación en porcentaje; o también, se pueden determinar por otros métodos, menos empleados ya por ser considerados como obsoletos y de más largo proceso, como es, por ejemplo, el método del cono y la arena.

El sistema AASHTO. recomienda, que en los terraplenes de construcción, al momento de determinar el porcentaje de compactación, los suelos alcancen una densidad no menor del 95% de la de “densidad máxima seca” obtenida en el laboratorio.

2.4.1.1. Próctor estándar

El objetivo del ensayo es obtener la densidad máxima de un suelo y la humedad óptima que es necesaria aportar para alcanzar dicha densidad.

Para la realización de este ensayo utilizaremos un molde cilíndrico con una capacidad de 1.000 cm³, el cual es rellenado con tres capas de material granular debidamente compactado con una maza tipo de 2,5 kg de peso, la cual se deja caer libremente 25 veces sobre una altura de 305 mm.

Es fundamental que el material a utilizar sea previamente desecado y pasado por el tamiz 20 mm humedeciéndolo posteriormente con distintas humedades (una para cada muestra que sea necesaria).

Figura 2.13. Equipo de compactación próctor estándar y modificado.

(a) Equipo Próctor estándar. (b) Equipo Próctor modificado.



Fuente: ELE Internacional Ltda., 1993.

2.4.1.2. Próctor modificado

El procedimiento a seguir en el ensayo Próctor modificado es prácticamente idéntico al que acabamos de describir para el ensayo Próctor estándar, aunque modificando algunos parámetros fundamentales. Utilizaremos un molde metálico con una capacidad de 2.320 cm^3 y una maza de $4,535 \text{ kg}$, la cual se dejará caer en este caso desde una altura mayor (457 mm), dando lugar a una energía de compactación mayor. Además, en lugar de 3 capas de material granular, se dispondrán 5 capas, dando a cada una de ellas un total de 25 golpes.

Una vez que se ha compactado el material siguiendo el procedimiento expuesto, se enrasa el molde y se toma una muestra de la zona central, la cual será utilizada para medir la densidad y la humedad. Lo habitual es repetir este ensayo 5 o 6 veces, obteniendo la densidad para distintos valores de humedad, representando estos valores en un gráfico, y obteniendo así la denominada “curva de compactación”. Sobre esta curva podemos

obtener de un modo gráfico cual es la densidad máxima del suelo, y cual es la humedad óptima con la que alcanzar dicha densidad.

2.5. Densidad In Situ

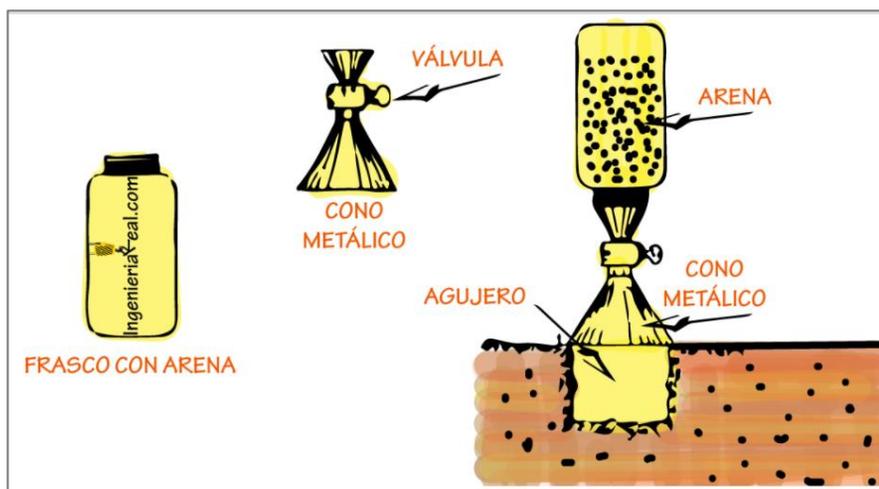
El ensayo tiene como objetivo determinar “in situ” la densidad de un suelo por el método del “cono de arena”.

La prueba se utiliza para determinar la densidad de los suelos compactos en terraplenes, bases, subbases y subrasantes de tramos viales, respecto un porcentaje dado de la densidad máxima obtenida en el ensayo de compactación Próctor correspondiente al tipo de suelo que se ensaya.

El ensayo de densidad in situ por el método del “cono de arena”, también permite obtener la densidad de terreno a cierta humedad natural, y así verificar los resultados obtenidos en trabajos de compactación de suelos, y compararlos con las especificaciones técnicas en cuanto a la humedad, la densidad y el grado de compactación del suelo evaluado, y así poder determinar la calidad del suelo donde se vayan o se están ejecutando proyectos de ingeniería.

Este método está normado por la norma AASHTO T-191.

Figura 2.14. Equipo cono de arena



Fuente: www.ingeniería-real.com/cono-de-arena

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.

En terreno, se excava un agujero de aproximadamente 12-15 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 W_T ; su humedad, w , deberá ser determinada para obtener el peso total seco W_s .

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

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:

$$W_3 = W_1 - W_2$$

Donde:

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

W_1 = peso total de la arena normalizada (gr).

W_2 = peso de la arena sobrante en el cono (gr).

El volumen del hueco excavado se determina ahora como:

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

Donde:

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

γ_d (arena) = peso unitario seco de la arena normalizada (gr/cm³).

V_{hueco} : Volumen del hueco (cm³).

Los valores de W_c y $\gamma_d(\text{arena})$ 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:

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

Donde:

γ_{hum} = peso unitario húmedo del suelo in situ (gr/cm^3).

W_T : Peso del suelo húmedo (gr)

V_{hueco} : Volumen del hueco (cm^3)

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

$$\gamma_{seca} = \frac{\gamma_{hum}}{1 + \omega}$$

Donde:

γ_{seca} = peso unitario seco del suelo in situ (gr/cm^3).

γ_{hum} = peso unitario húmedo del suelo in situ (gr/cm^3).

ω = humedad natural del suelo in situ (gr/cm^3).

2.6. CBR (California Bearing Ratio)

Este ensayo permite establecer el Índice de Soporte California (CBR) de la subrasante, sub base o base, de muestras elaboradas en laboratorio o ensayadas en campo.

2.6.1. Antecedentes

El ensayo de relación de soporte de California fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter del departamento de carreteras de California. Desde esa fecha tanto en Europa como en América, el método CBR se ha generalizado y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base o sub – base en la construcción de carreteras, como así también en la ejecución de terraplenes y capas de rodadura granulares.

2.6.2. Generalidades

El ensayo CBR es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad cuidadosamente controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo. El CBR se expresa en porcentaje como la razón de carga unitaria que se requiere para introducir un pistón dentro de una muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas, con respecto a la carga unitaria patrón requerida para introducir el mismo pistón a la misma profundidad en una muestra tipo de material triturado.

De esta fórmula se puede observar que el CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica, el símbolo de porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por un número entero.

Los valores de carga unitaria para las diferentes profundidades de penetración dentro de la muestra patrón están determinados. El CBR que se usa para proyectar, es el valor que se obtiene para una penetración de 0,1” o de 0,2”. Se elige el que sea más grande de los dos. Para la mayoría de los suelos el valor para la penetración de 0,1” da mayor CBR.

El ensayo de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y subrasantes bajo el pavimento de carreteras y aeropistas, la siguiente tabla da una clasificación típica:

Tabla 2.7. Número de CBR para suelos clasificados según SUCS y AASHTO

C.B.R.	Clasificación General	Usos	Sistema de Clasificación	
			Unificado	AASHTO
0 - 3	Muy Pobre	Subrasante	OH,CH,MH,OL	A5,A6,A7
3 - 7	Pobre a Regular	Subrasante	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6,A7
7 - 20	Regular	Sub – base	OL,CL,ML,SC, SM,SP	A2,A4,A6,A7
20 - 50	Bueno	Base, Sub – base	GM,GC,SW,SM, SP,GP	A1b,A2-5,A3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW,GM	A1a,A2-4,A3

Fuente: Joseph E. Bowles, 1981. Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil.

Con el resultado del C.B.R. se puede clasificar el suelo usando la tabla siguiente:

Tabla 2.8. Clasificación del suelo de acuerdo al CBR

C.B.R.	Clasificación
0 – 5	Subrasante muy mala
5 – 10	Subrasante mala
10 – 20	Subrasante regular a buena
20 – 30	Subrasante muy buena
30 – 50	Sub - base buena
50 – 80	Base buena
80 – 100	Base muy buena

Fuente: Crespo Villalaz, Mecánica de suelos y cimentaciones.

2.6.3. Tipos de CBR

Debido a que el comportamiento del suelo varía con su grado de alteración, normalmente se distinguen dos tipos de CBR, en laboratorio y en el sitio, como se detalla a continuación:

2.6.3.1. CBR en laboratorio

Este tipo de CBR se lo realiza bajo especificaciones normadas dentro de un laboratorio, con equipo especializado y condiciones de ensayo.

2.6.3.1.1. CBR para suelos perturbados y remoldados

Estos ensayos son ejecutados en laboratorio, se puede realizar a muestras de suelo sueltas extraídas de una capa subrasante, base o subbase y luego son compactadas en laboratorio, este método de ensayo es aplicado a todo tipo de suelo, como ser: suelos no cohesivos, suelos cohesivos de baja plasticidad y poco o nada expansivos, y suelos cohesivos y expansivos. Y se hacen uso de moldes de especiales para compactación CBR.

Figura 2.15. Molde para ensayo CBR en laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

2.6.3.1.2. CBR para suelos inalterados

Mediante este método, se determina el CBR de un suelo cohesivo en estado natural. Se diferencia del anterior sólo en la toma de muestras, ya que los pasos para determinar las propiedades expansivas y la resistencia a la penetración son similares.

Se tomarán tres muestras inalteradas, empleando para ello moldes CBR armados en los extremos de su respectivo collarín. Para facilitar el hinchamiento del molde, el collarín que se apoya sobre la superficie del terreno tendrá sus bordes cortantes.

El procedimiento consiste en ir comprimiendo o hincando el molde contra la superficie del terreno y al mismo tiempo retirando el suelo de alrededor del molde, hasta que la muestra de suelo entre en el collarín superior por lo menos 25 mm., cuidando reducir al mínimo las perturbaciones de la muestra.

Finalmente, se retira el molde realizando un movimiento como cortando el suelo, se retira el collarín superior, se enrasan ambas caras de la muestra y se les vierte parafina sólida derretida con el fin de evitar pérdidas de humedad en el traslado al laboratorio. El peso unitario y la humedad deberán ser determinados por medio del ensayo de densidad “in situ”, eligiendo un lugar próximo a aquel desde donde se obtuvieron las muestras.

Figura 2.16. Molde para muestra de suelo inalterada.



Fuente: ELE International, Soil Testing, In-Situ Sampling and Preparation.

2.6.3.2. CBR en el sitio

Es un método adecuado para determinar la capacidad de soporte de un material en el lugar donde será sometido a las solicitaciones de la estructura que soportará. Debería realizarse cuando se presenten materiales dudosos y en movimientos de tierra importantes. Básicamente la fase de penetración de este ensayo es similar a la descrita anteriormente. Lo usual es determinar primero la densidad “in situ” del material en el lugar de ensayo, el cual puede ser usado bajo cualquiera de las siguientes condiciones:

- Cuando “in situ” la muestra del suelo no tenga piedras mayores a 3/4",
- Cuando el material es de granos gruesos y su cohesión es tal que no se vea afectado por cambios en la humedad, o,
- Cuando el material ha estado en el lugar por varios años. En estos casos La humedad no es constante pero fluctúa dentro de rangos estrechos y el ensayo C.B.R. “in situ” se considera como un indicador satisfactorio de la capacidad de soporte del suelo.

Por lo general, se elige un lugar donde haya piedras menores a 3/4", deberá removerse el material suelto y nivelar la superficie, luego se coloca un sistema de reacción montando “un gato”, con anillo dinamométrico y pistón, en forma vertical, aplicando la reacción con un vehículo cargado u otro sistema. En caso de que el pistón sea colocado en forma horizontal, la reacción será dada por la pared contraria del pozo construido para este efecto.

Figura 2.17. Ensayo de CBR In Situ.



Fuente: Ensayo CBR In situ. www.slideplayer.es.

Se colocan los anillos de sobrecarga directamente al suelo y se carga el pistón al suelo con una fuerza menor que 4,54 Kg. Se debe instalar un dial comparador para registrar las lecturas de deformaciones, en un punto que permanezca constante e inmóvil (por ejemplo una viga empotrada al suelo en poyos de hormigón).

La penetración se realiza en forma similar al ensayo tradicional y el ensayo se repite en otros dos puntos escogidos con anterioridad. La forma de expresar los resultados también es idéntica al método de laboratorio, es decir, trazando la curva tensión contra penetración, corrigiendo la curva si fuese necesario y calculando el CBR “in situ”, usando los valores de penetración de 0,1" y 0,2".

En resumen, los ensayos CBR pueden ser hechos en la obra o en laboratorio, éstos últimos se llevarán a cabo tanto sobre muestras inalteradas como en las compactadas en éste.

Los ensayos en el lugar se hacen solamente sobre el suelo con el contenido de humedad existente, pero los ensayos de laboratorio se pueden hacer sobre muestras saturadas o no saturadas. Siempre que sea posible, el ensayo se hace en suelo inalterado. Cuando es con miras a proyectar, hay que ensayar muestras compactadas en laboratorio, las cuales, pueden no reproducir las condiciones de humedad y densidad obtenidas en la compactación en obra. Por lo tanto, deben realizarse ensayos “in situ” o ensayos sobre muestras inalteradas de suelos compactados en obra, durante el período de construcción. Si los resultados no concordasen con los datos preliminares que se usaron para proyectar, el proyecto debe ser modificado o el procedimiento de compactación en obra cambiado, para producir el CBR requerido.

2.7. Ensayo CBR convencional

Este ensayo evalúa la resistencia de suelos que tienen un diámetro máximo de 3/4 de pulgada. Está normado por la norma AASHTO T 193-13 y ASTM D 1883.

Todo el material o la muestra del material deben tener un diámetro menor o igual a 3/4 de pulgada, de lo contrario el método de prueba contempla una modificación en la graduación del mismo. Esta forma de preparación de la muestra previa al ensayo, ha sido usado para evitar errores que pueden ocurrir en la aplicación de la carga por interferencia directa de material muy grueso en el momento de la penetración, lo que desemboca en resultados inaceptables. De todas formas, a pesar de que la muestra ensayada en laboratorio puede diferir por habersele retirado la fracción gruesa superior a los 3/4 de pulgada, esto puede considerarse como un factor de seguridad adicional. Si se realizara un grupo de ensayos con partículas de diámetros superiores a los 3/4 de pulgada, habrá mucha variación en los resultados del CBR, debido a la ubicación de las partículas gruesas. El ensayo CBR se realiza en una muestra en la cual se ha obtenido la humedad óptima y la densidad seca máxima en un ensayo de compactación previo conocido como Próctor modificado. A menos que el solicitante del ensayo CBR no disponga lo contrario, toda muestra deberá ser sumergida en agua previamente al proceso de penetración, lo cual someterá a la muestra a las condiciones más desfavorables. Este ensayo es usado para evaluar la resistencia que tienen las partes de una estructura multicapa, ya sea la subrasante, sub base, base o materiales reciclados reconvertidos y compactados, con aditivos o sin ellos, que se usen principalmente en carreteras o aeropuertos. El valor del CBR obtenido mediante este ensayo es imprescindible en la mayoría de métodos de diseño de pavimentos flexibles. Para la preparación de muestras con materiales cementantes, deben realizarse investigaciones geotécnicas específicas, las mismas que pueden establecer los mejores resultados de acuerdo a sus progresos en el tiempo y en las condiciones de humedad.

Materiales

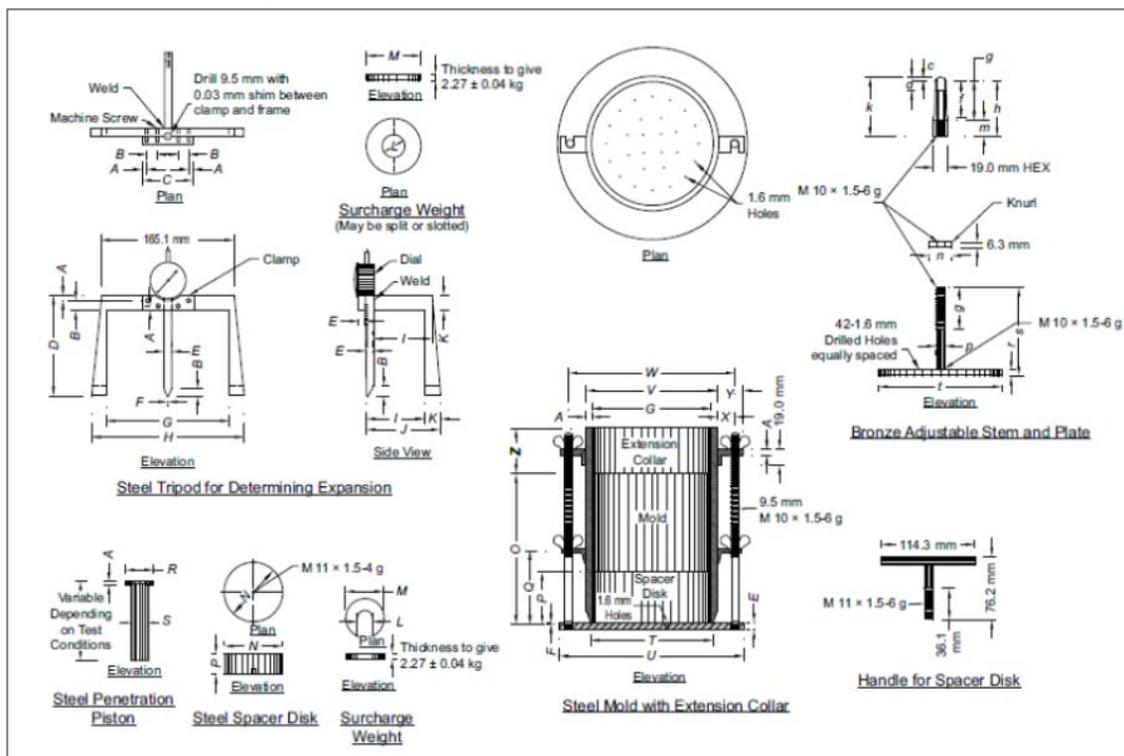
El ensayo CBR requiere de los siguientes elementos, para completar la prueba, los mismos que están normados en la especificación AASHTO T193-13:

- Molde, el mismo que debe ser de área cilíndrica, hecho de metal, con un diámetro interno de $152,40 \text{ mm} \pm 0,66 \text{ mm}$ y una altura de $177,80 \text{ mm} \pm 0,46 \text{ mm}$, provisto

con una extensión tipo collarín de altura de 50 mm aproximadamente. El molde debe poseer una base perforada ajustable con el collarín. Para obtener una curva que permita identificar claramente los valores del CBR en función del porcentaje de compactación, se recomienda tener tres moldes para este ensayo.

- Disco espaciador, hecho de metal de $150.80 \text{ mm} \pm 0.8 \text{ mm}$ de diámetro y de $61.37 \text{ mm} \pm 0.25 \text{ mm}$ de alto.
- Martillo, que debe ser el mismo con el cual se haya realizado el Próctor Modificado, para la obtención de la densidad seca máxima y la humedad óptima.
- Aparato para la medición de la expansión o hinchamiento, el cual consiste en una placa de hinchamiento con un vástago ajustable y un trípode que soporta un deformímetro. La placa de hinchamiento debe ser de metal de $149,20 \text{ mm} \pm 1.6 \text{ mm}$ de diámetro y perforada con huecos de 1.6 mm de diámetro. El trípode que se usa para sujetar el deformímetro únicamente se asienta en el collarín del molde.
- Deformímetros, uno para medir el hinchamiento y otro para medir la deformación en el momento de aplicación de la carga.
- Pesas de sobrecarga de metal, una de forma anular con un orificio en el centro de aproximadamente 54 mm de diámetro y otra con un orificio central, ambos con un diámetro de $149,20 \text{ mm} \pm 1.6 \text{ mm}$ y con una masa $2.27 \text{ kg} \pm 0,04 \text{ kg}$.
- Pistón de penetración metálico, de sección circular de $49.63 \text{ mm} \pm 0.13 \text{ mm}$ de área = 1935 mm^2 y no menos de 102 mm de longitud.
- Dispositivo de carga, que debe ser un aparato de compresión capaz de aplicar incrementos de carga uniformes en la muestra a una velocidad de 1.3 mm/min.
- Tanque de remojo, en el que se debe mantener las muestras con un nivel de agua de 25 mm sobre la cima de la misma.
- Horno de secado, con control de temperatura capaz de mantener a $110 \pm 5 \text{ C}$ para secado de muestras húmedas. Tarros para muestras húmedas.
- Herramientas varias como tazones de mezclado, cucharas, reglas, papel filtro, balanza, etc.

Figura 2.18. Partes del molde CBR y sus accesorios.



Fuente: AASHTO. (2013). AASHTO Standard test CBR. AASHTO Publisher (Washington). 12pp. EEUU.

Preparación de la muestra de acuerdo a la norma

La muestra deberá ser elaborada de acuerdo al proceso de compactación que fue utilizado para obtener la densidad seca máxima en un molde de 152.4 mm de diámetro. Si todo el material pasa el tamiz 3/4 de pulgada, la graduación del material puede ser usada directamente para preparar la muestra y compactarla sin modificación. Si hay material retenido en el tamiz 3/4 de pulgada, este material deberá ser reemplazado en igual cantidad por material pasante el tamiz de 3/4 de pulgada y retenido en el tamiz #4, para lo que se debe contar con una cantidad adicional del mismo material pero intacto, es decir no sobrantes.

Con las condiciones antes mencionadas y teniendo el contenido de agua óptimo, se preparan fundas de 7 kg para cada molde.

Procedimiento de ensayo

El procedimiento del ensayo tiene tres etapas:

- Etapa de elaboración de los moldes.
- Etapa de remojo.
- Etapa de penetración.

Elaboración de los moldes

Los Se preparan tres moldes con 12, 25 y 56 golpes en 5 capas respectivamente, utilizando el martillo del Próctor modificado. Algunos laboratorios prefieren probar un solo ejemplar que se compacta en 5 capas, con 56 golpes por capa, normado en el ensayo Próctor modificado, pero para permitir a los diseñadores establecer el CBR de acuerdo a sus necesidades se realizan tres moldes.

Se sujeta el molde a la placa base, se coloca el collarín y se pesa con precisión de 5 g más cercano. Se inserta el disco separador en el molde y se coloca un papel de filtro grueso en la parte superior del disco.

Se realiza la mezcla de cada una de las fundas de 7 kg preparada con agua suficiente para obtener el contenido de humedad óptimo.

Al compactar las muestras del suelo en el molde, se utilizan cinco capas iguales con 12, 25 y 56 golpes, respectivamente, para dar una altura total compactada de alrededor de 125 mm.

Se debe determinar el contenido de humedad del material que está siendo compactado al principio y al final del procedimiento de compactación (dos muestras). Cada muestra de humedad tendrá una masa de al menos 100 g para suelos de grano fino y 500 g para suelos de grano grueso.

Se retira el collarín, y usando una regla, se conforma el suelo compactado con la parte superior del molde. Las irregularidades de la superficie deben ser parchadas con material de tamaño pequeño. Al retirar el disco espaciador, se coloca un filtro de papel grueso en la placa base perforada, se invierte el molde con el suelo compactado, y se coloca un papel de filtro por lo que el suelo compactado queda en contacto con el papel de filtro. Se sujeta la placa base perforada con el molde y se coloca el collarín. Para finalizar se determina el peso del molde con la muestra, con una precisión de 5 g.

Remojo

Se coloca la placa de medición del hinchamiento de vástago ajustable en la muestra de suelo en el molde y se aplica suficientes pesos anulares para producir una intensidad de carga igual a la masa de la sub-base, las capas de base y de la capa de rodadura. La masa total debe tener un mínimo de 4,54 kg. Se añade la masa adicional en incrementos de 2.26 kg.

Se coloca el trípode con el indicador de cuadrante en la parte superior del molde y se encera la lectura para proceder al remojo.

Se sumerge el molde en agua para permitir el libre acceso de la misma al inicio y al final de la muestra. Durante el remojo es necesario mantener el nivel de agua en el molde aproximadamente 25 mm por encima de la parte superior de la muestra, y remojar la muestra por 96 horas (4 días).

Un periodo de inmersión más corto, que no puede ser menor de 24 horas, se puede considerar para materiales que drenan fácilmente, si el ensayo demuestra que el período más corto no afecta a los resultados de la prueba. Para algunos suelos de arcilla, puede ser necesario un período de remojo mayor que 4 días. Se deben registrar los hinchamientos parciales cada 24 horas.

Al final de las 96 horas, se hace una lectura final sobre las muestras remojadas y se calcula el porcentaje de hinchamiento con respecto a la altura inicial de la muestra, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ hinchamiento} = \frac{\text{hinchamiento en milímetros}}{\text{altura inicial de la muestra en milímetros}} * 100$$

Se retira las muestras del tanque de remojo, se derrama el agua de la parte superior y se deja escurrir hacia abajo durante 15 minutos. Se debe tener cuidado de no molestar la superficie de las muestras durante la extracción del agua. Después del drenaje, se retira los pesos, placas perforadas y papel de filtro superior. El peso de las muestras se puede determinar después de drenar cuando se desea determinar la densidad húmeda promedio del material empapado y drenado.

Figura 2.19. Dispositivo de carga para CBR de laboratorio



Fuente: Normativa de carreteras, 2014. Ensayo CBR. España.

Penetración

En la etapa de penetración se coloca la pesa con orificio central en el molde y luego se asienta el pistón de penetración con una carga de no más de 44 N (10 libras). Después de asentar el pistón de penetración, se coloca el resto de los pesos alrededor del pistón. La cantidad total de pesos de suplemento debe ser igual al peso utilizado durante el remojo. En este instante se encera el indicador de penetración y el indicador de carga.

La aplicación de la carga por medio del pistón de penetración se realiza a una tasa uniforme de 1,3 mm/min. Se debe registrar la carga cuando la penetración ha alcanzado las siguientes deformaciones en altura: (0.025-0.050-0.075-0.1-0.15-0.2 y 0.3 pulgadas). Lecturas de carga de penetración de (0,4 y 0,5 pulgadas) se pueden obtener si se desea. El contenido de humedad se puede determinar después de las pruebas, si se desea.

Cálculos

Principalmente se debe obtener la curva Esfuerzo - Deformación con los datos que se han registrado en el ensayo. En algunos casos, la penetración inicial tiene lugar sin un incremento proporcional a la resistencia a la penetración, y la curva puede ser cóncava hacia arriba. Para obtener las verdaderas relaciones de tensión deformación, se debe corregir la curva, que tiene una forma cóncava hacia arriba cerca del origen, mediante el ajuste de la ubicación del origen, por una extensión de la porción de línea recta de la curva de tensión - deformación hasta que corta el eje de abscisas.

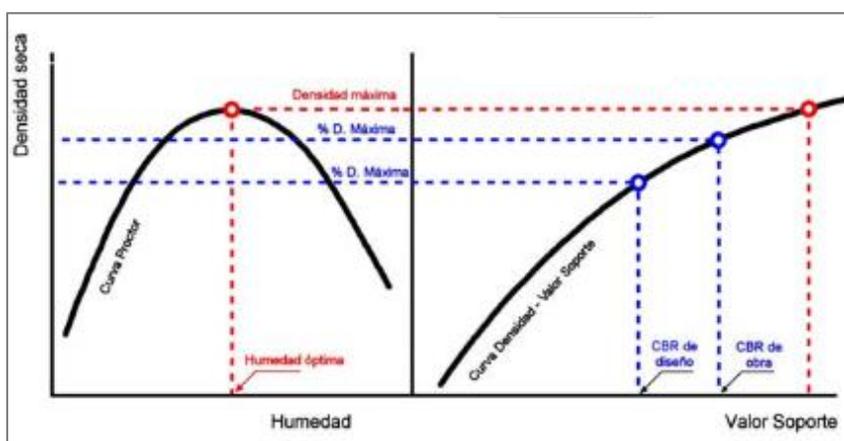
Los valores de carga corregidos se determinarán para cada muestra en 0.10 y 0.20 pulgadas de penetración. Valores del soporte California se obtienen en porcentaje al dividir los valores de carga corregidos en 0,10 y 0,20 pulgadas para las cargas del patrón CBR de 1000 y 1500 PSI respectivamente, y la multiplicación de estas relaciones por 100.

$$\text{CBR} = \frac{\text{valor de carga corregida}}{\text{carga estándar}} * 100$$

El CBR se selecciona generalmente a 0,1 pulgadas de penetración. Si la relación de penetración 0.2 pulgadas es mayor, deberá volver a efectuarse la prueba. Si la prueba de verificación da un resultado similar, se utilizará la relación de penetración de 0.2 pulgadas. Utilizando los datos obtenidos de las tres muestras, se obtiene la gráfica Densidad Seca - CBR mediante la cual se puede obtener el CBR de acuerdo al porcentaje de compactación requerido.

Gráficamente se puede observar la importancia e influencia de la curva de compactación en el resultado de CBR.

Figura 2.20. Relación de la curva de CBR con la curva de compactación



Fuente: Escuela de Ingeniería Civil, 2002. Compactación de suelos y materiales estabilizados. Universidad nacional del Rosario, Argentina.

Una vez finalizado el ensayo, el informe de la prueba correspondiente consta de los siguientes elementos:

- Esfuerzo de compactación (número de golpes por capa)
- Densidad seca
- Humedad
- % Hinchamiento
- % CBR

2.8. Ensayo CBR In Situ

La relación de soporte del suelo en el terreno (CBR In Situ), establece el procedimiento que se debe seguir para determinar la relación de soporte (comúnmente llamada CBR = California Bearing Ratio), de un suelo ensayado “In Situ” mediante la comparación entre la carga de penetración del suelo y la del material estándar de referencia. Está normado por la ASTM D 4429.

Este método de ensayo cubre la evaluación de la calidad relativa de los suelos de la subrasante, pero también es aplicable a materiales de subbase y base.

Cualquier actividad de construcción, tal como nivelación o compactación, efectuada después del ensayo de relación de soporte, probablemente invalidará los resultados del ensayo.

Los ensayos de campo pueden ser utilizados para diseñar bajo condiciones determinadas de humedad, densidad y características generales del material ensayado.

Sin embargo, cualquier alteración significativa por compactación, maniobra o cambio de humedad puede afectar la resistencia del suelo y dejar sin validez los resultados del ensayo efectuado previamente, conduciendo a la necesidad de un nuevo ensayo y nuevos análisis.

El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores 6.35 mm (1/4 pulgada), casi siempre, y usada como agregado de arena triturada, o procesada hasta tamaños máximos de 0.60 mm (No. 30).

3.8.1. Metodología de ensayo CBR In Situ

Para el ensayo de CBR In Situ se aplicó la siguiente metodología práctica, basada en la norma ASTM D 4429: Método de prueba estándar para CBR (California Bearing Ratio) de suelos en su lugar.

Objetivo

Establece el procedimiento que se debe seguir para determinar la relación de soporte CBR in situ, mediante la comparación entre la carga de penetración del suelo y la de un material estándar de referencia.

Finalidad y alcance

- Se utiliza el ensayo in situ para determinar su CBR con el fin de evaluar y diseñar la estructura de un pavimento flexible, tales como base y sub-base gruesas y subrasantes y también para otras aplicaciones (como caminos no pavimentados), para los cuales el CBR es el parámetro de resistencia indicado. Si el CBR del campo es usado directamente para la evaluación o diseño, sin considerar la variación ocasionada por cambios en el contenido de agua, el ensayo debe llevarse a cabo bajo una de las siguientes condiciones:
 - Si el grado de saturación (porcentaje de vacíos llenos de agua) es de 80 % o más.
 - Si el material es de grano grueso y sin cohesión, de modo que no se ve afectado en forma significativa por los cambios en el contenido de agua.
 - Si el suelo no ha sido modificado por actividades de construcción durante los dos años anteriores al ensayo.

En este último caso, el contenido de agua no es realmente constante, sino que generalmente fluctúa dentro de un margen bastante reducido. Por lo tanto, los datos del ensayo en campo, pueden utilizarse satisfactoriamente para indicar el promedio de la capacidad de carga.

Referencias normativas

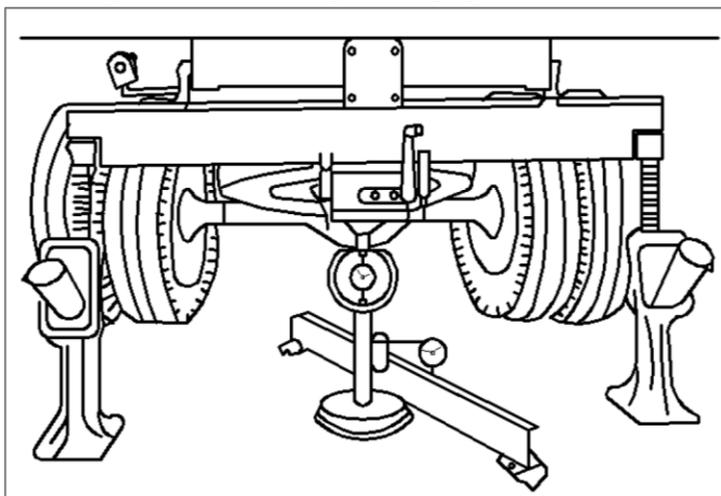
ASTM D 4429: Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place.

Equipos y materiales

- Gata mecánica de tornillo, manualmente operado, equipado con un dispositivo giratorio especial de manivela para aplicar la carga al pistón de penetración y diseñado con las siguientes especificaciones:
 - Capacidad mínima de 2700 kg (5950 lb).
 - Elevación mínima: 50 mm (2").
 - Manubrio desmontable 150 mm (6") de radio.
 - Relación de velocidad alta, aproximadamente 2,4 revoluciones para 1 mm (0,04") de penetración.
 - Relación de velocidad media, aproximadamente 5 revoluciones para 1 mm (0,04") de penetración.
 - Relación de velocidad baja, aproximadamente 14 revoluciones para 1 mm (0,04") de penetración.
 - Pueden usarse otras relaciones de velocidad, cuando esto sea más conveniente.
 - También se pueden usar otros gatos mecánicos, con la misma carga mínima y altura de elevación, siempre y cuando se obtenga con ellos una relación uniforme de penetración carga de 1,3 mm (0,05") por minuto.
- Anillos de carga, dos en total, debidamente calibrados, uno de ellos con amplitud de carga de 0 a 8,8 kN (0 - 1984 lbf) y el otro de 0 a 22,6 kN (0 - 5070 lbf) aproximadamente.
- Pistón de penetración, de $50,8 \pm 0,1$ mm ($2 \pm 0,004$ ") de diámetro (3 pulg² = 19,35cm³ de área) y aproximadamente 102 mm (4") de longitud. Debe constar, además, de un adaptador de pistón y de extensiones de tubo de rosca interna con conectores.
- Diales, deben existir dos diales: uno para medir deformaciones del anillo de carga con lecturas de 0,0025 mm (0,0001") y recorrido de aproximadamente 6,4 mm (0,25") y otro para medir penetraciones del pistón con lecturas de 0,025 mm (0,001") y recorrido de aproximadamente 25 mm (1"), equipado con un soporte o abrazadera de extensión para ajustar la posición del dial.
- Soporte para el dial de penetración, o puente de aluminio, hierro o madera de 76 mm (3") de altura y longitud aproximada de 1,5 m (5 pies).

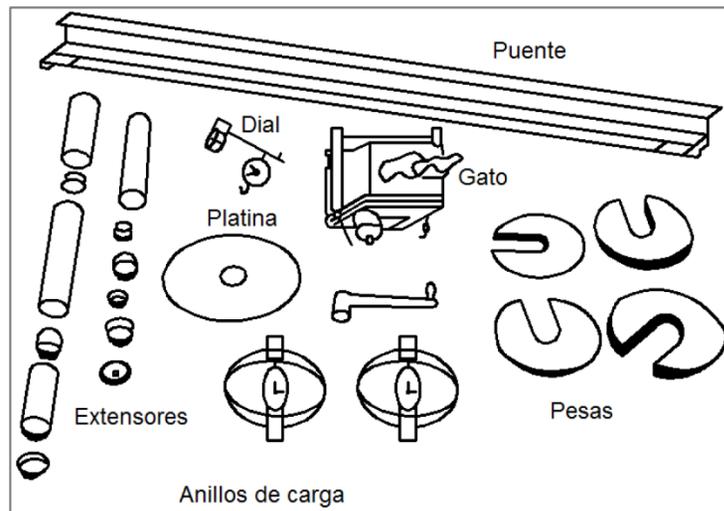
- Platina de sobrecarga, circular, de acero, de $254 \pm 0,5$ mm ($10 \pm 0,02$ ") de diámetro, con un agujero central circular de $51 \pm 0,5$ mm ($2 \pm 0,02$ "). La platina debe pesar $4,54 \pm 0,01$ kg.
- Pesas de sobrecarga. Dos pesas anulares de sobrecarga de $4,54 \pm 0,01$ kg, de 216 ± 1 mm ($8,5 \pm 0,04$ ") de diámetro total, y dos pesas similares de las mismas dimensiones, pero de $9,08 \pm 0,01$ kg cada una.
- Vehículo de carga (reacción). Un vehículo (o pieza de equipo pesado) de carga suficiente para proveer una reacción de aproximadamente 31 kN (6970 lb). El vehículo debe estar equipado con una viga metálica debidamente acondicionada en la parte posterior del chasis que ofrezca una reacción adecuada para forzar la penetración del pistón en el suelo. El vehículo se debe suspender suficientemente para eliminar la influencia de los resortes traseros y permitir que el ensayo de penetración se efectúe sin movimiento ascendente del chasis del vehículo. Para efectuar el ensayo se requiere disponer de un espacio vertical libre de aproximadamente 0,6 m (2 pies).
- Gatas, dos gatas tipo camión, de 14 Mg (15 toneladas) de capacidad, de doble acción combinada y descenso automático.
- Equipo misceláneo. Envases de muestras para determinación de humedad y peso unitario, espátula, regla de enrase, cucharones para excavar, etc.

Figura 2.21. Montaje del equipo CBR in situ



Fuente: Manual de ensayos de mecánica de suelos. Norma Peruana

Figura 2.22. Materiales y accesorios del equipo CBR in situ



Fuente: Manual de ensayos de mecánica de suelos. Norma Peruana

Figura 2.83. Equipo CBR In Situ



Fuente: www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/suelos

Muestra

Materiales de sub rasantes.

Procedimiento

- Prepárese el área de la superficie que va a ser ensayada, retirando el material suelto y superficial que no sea representativo del suelo que se va a ensayar. Asimismo, un área

de ensayo tan uniforme y horizontal como sea posible. Cuando se trate de materiales de base no plásticos, se debe tener especial cuidado para no alterar la superficie de ensayo. El espaciamiento de los ensayos de penetración debe ser tal, que la operación en un punto no altere el suelo del siguiente punto que va a ser penetrado. Esta separación debe ser como mínimo de 175 mm (7") en suelos plásticos y de 380 mm (15") en suelos granulares gruesos.

- b. Localícese el vehículo en tal forma que el dispositivo de reacción quede directamente sobre la superficie por ensayar. Instálese el gato mecánico debajo de la viga o dispositivo de reacción, con la manivela hacia afuera. Colóquense los gatos de camión a cada lado del vehículo y levántese para que no exista peso alguno sobre los resortes posteriores; cerciórese de que el vehículo está nivelado en la parte trasera.
- c. Ubíquese el gato mecánico en la posición correcta y conéctese el anillo de carga al extremo del gato. Conéctese el adaptador del pistón al extremo inferior del anillo, adiciónese el número necesario de extensiones hasta alcanzar una altura menor de 125 mm (4,9") sobre la superficie de ensayo y conéctese el pistón de penetración. Sujétese el gato en su sitio. Compruébese el nivel del montaje del gato para asegurarse su verticalidad y háganse los ajustes que sean necesarios.
- d. Colóquese la platina de sobrecarga de 4,5 kg debajo del pistón de penetración, de tal forma que cuando baje el pistón, éste pase a través del agujero central.
- e. Asíéntese el pistón bajo una carga inicial de aproximadamente 21 kPa (3 lb/pulg²). Para una rápida colocación, úsese la relación de alta velocidad del gato. Para materiales de base con una superficie irregular, colóquese el pistón sobre una delgadísima capa de polvo de trituración de piedra caliza (tamices No. 20 – N° 40) o de yeso.
- f. Si es necesario para lograr una superficie uniforme, levántese la platina de carga mientras todavía está actuando la carga inicial sobre el pistón y espolvoréese uniformemente arena fina, en un espesor de 3 a 6 mm (0,12 a 0,24"), sobre la superficie cubierta con la platina. Esto sirve para distribuir uniformemente el peso de la sobrecarga.
- g. Adiciónense a la platina un número de pesos de sobrecarga tal, que transmita una presión equivalente a la intensidad de carga, producida por las capas de pavimento,

que se colocarán sobre la subrasante, la base o ambos, excepto que la mínima pesa aplicada será la de 4,5 kg más una pesa de sobrecarga de 9 kg.

- h. Fíjese el soporte del dial de penetración al pistón y sujétese el dial a dicho soporte.
- i. Colóquense en cero las lecturas de ambos diales.
- j. Aplíquese la carga al pistón de penetración de tal manera que la velocidad aproximada de penetración sea de 1,3 mm (0,05") por minuto. Utilizando la relación de baja velocidad del gato durante el ensayo se puede mantener una rata uniforme de penetración por parte del operador.
- k. Regístrense las lecturas del anillo de carga para cada 0,64 mm (0,025") de incremento de penetración hasta una profundidad final de 12,70 mm (0,500"). En suelos homogéneos las profundidades de penetración mayores de 7,62 mm (0,300") frecuentemente se pueden omitir.
- l. Calcúlese la relación de soporte en porcentaje (véase el numeral 6 para los cálculos).
- m. Al finalizar el ensayo, obténgase una muestra en el punto de penetración y determínese su humedad. También debe determinarse el peso unitario en un sitio localizado de 100 a 150 mm (4" a 6") desde el punto de penetración. El peso unitario debe determinarse de acuerdo con los métodos de ensayo (método del cono de arena), o (métodos nucleares). La humedad debe determinarse de acuerdo con los métodos de ensayos correspondientes o nucleares.

Figura 2.24. Instalación típica del ensayo en el terreno



Fuente: Normativa de carreteras. Ensayo CBR. España.

Cálculos

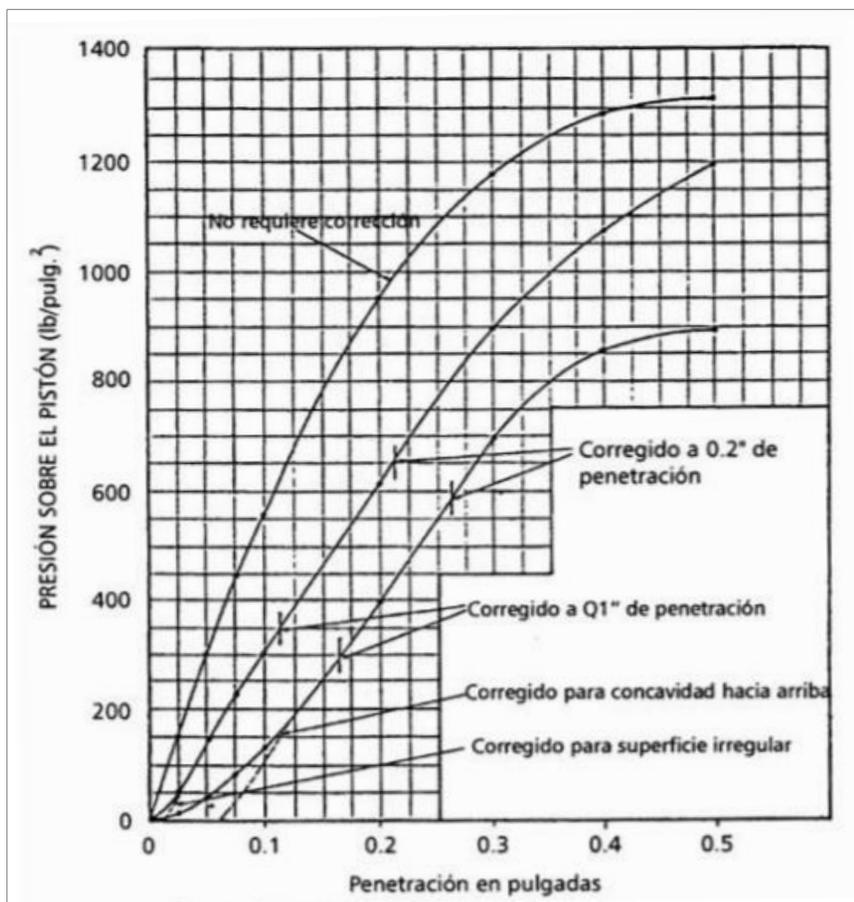
- Curva de esfuerzo-penetración. Calcúlese el esfuerzo de penetración para cada incremento de penetración, dividiendo la fuerza aplicada entre el área del pistón. Dibújese la curva de esfuerzo vs. Penetración para cada incremento de penetración.
- En ocasiones, la curva de esfuerzo vs penetración puede en su parte inicial resultar cóncava hacia arriba, debido a irregularidades de la superficie u otras causas y, en tales casos, el punto cero se debe ajustar.
- Relación de soporte. De la curva tómanse los valores de esfuerzo para penetraciones de 2,54 mm (0,100") y 5,08 mm (0,200") y calcúlese las relaciones de soporte para cada uno dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia de 6,9 MPa (1000 lb/ pulg²) y 10,3 MPa (1500 lb/pulg²), respectivamente, y multiplíquese por 100. Calcúlese adicionalmente las relaciones de soporte para el máximo esfuerzo si la penetración es menor de 5,08 mm (0,200"), interpolando el esfuerzo de referencia. La relación de soporte reportada para el suelo es normalmente la de 2,54 mm (0,100") de penetración. Cuando la relación a 5,08 mm (0,200") de penetración resulta ser mayor, repítase el ensayo. Si el ensayo o probación da un resultado similar, úsese la relación de soporte para 5,08 mm (0,200") de penetración.
- Si los valores de relación de soporte para penetraciones de 7,62; 10,16 y 12,7 mm (0,300", 0,400" y 0,500") son requeridos, los valores de esfuerzo corregidos para estas penetraciones deben dividirse por los esfuerzos de referencia para 13,1; 15,9 y 17,9 MPa (900, 2300 y 2600 lb/pulg²), respectivamente, y multiplicarse por 100.

Cálculo curva Esfuerzo – Penetración

Se calcula el esfuerzo de penetración para cada incremento de penetración, dividiendo la fuerza aplicada por el área del pistón. Se dibuja la curva de Esfuerzo vs. Penetración para cada incremento de penetración, como se muestra en la figura siguiente.

En ocasiones, la curva de Esfuerzo vs. Penetración puede en su parte inicial resultar cóncava hacia arriba, debido a irregularidades de la superficie u otras causas y, en tales casos, el punto cero se debe ajustar como se indica en la siguiente figura.

Figura 2.25. Corrección de Curvas Esfuerzo – Penetración.



Fuente: Norma Chilena 1852.Of81.

Cálculo relación de soporte (CBR In Situ)

De la curva corregida se toman los valores de esfuerzos para penetraciones de 2.54 mm (0.100") y 5.08 mm (0.200") y se calculan las relaciones de soporte de cada uno dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia de 6.9 Mpa (1000 Lb/Pulg²) y 10.30 Mpa (1500 Lb/Pulg²) respectivamente y se multiplica por 100. Se calcula adicionalmente las relaciones de soporte reportada para el suelo es normalmente la de 2.54 mm (0.100") de penetración.

Cuando la relación a 5.08 mm (0.200") de penetración resulta ser mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, se usa la relación de soporte determinada para 5.08 mm (0.200")

Si los valores de relación de soporte para penetraciones de 7.62, 10.16 y 12.7 mm (0.300", 0.400" y 0.500") son requeridos, los valores de esfuerzo corregidos para estas penetraciones se deben dividir por los esfuerzos de referencia para 13.1, 15.9 y 17.9 Mpa (1900, 2300 y 2600 lb/pulg²) respectivamente y multiplicarse por 100.

En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua. Posteriormente, ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN Y CORRELACIÓN DE CBR IN SITU Y CBR CONVENCIONAL

CAPITULO III

APLICACIÓN Y CORRELACIÓN DE CBR IN SITU Y CBR CONVENCIONAL

3.1 Introducción

La finalidad, que determina las condiciones de soporte de cualquier tipo de suelo, subrasantes en este caso, son determinadas a partir del ensayo CBR, para lo cual existen dos maneras de realizar, una es la más comúnmente utilizada, que la llamamos en este proyecto como CBR convencional y la otra es con un dispositivo particular (relativamente nuevo) que nos permite realizarla en el sitio de requerimiento (CBR In Situ).

Es de gran necesidad el conocer la capacidad portante del suelo (CBR), para de esta manera realizar el diseño estructural correspondiente a partir de este dato, pero la metodología convencional es un tanto meticulosa, para este detalle de tiempo diseñaron un dispositivo que nos permite hacer este ensayo en el lugar de requerimiento, es decir, en el sitio (In Situ – en inglés), con una mayor facilidad y menos tiempo invertido. Pero cabe la duda de su fiabilidad, por falta de experiencia en su uso.

3.2. Laboratorios empleados

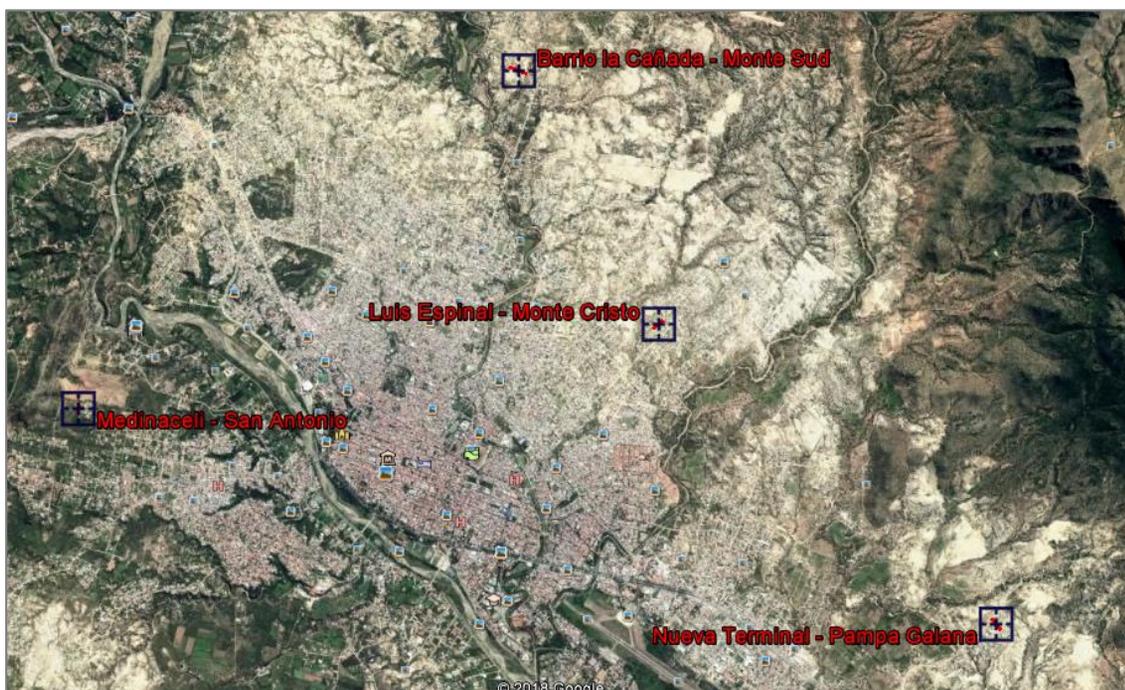
Para el presente proyecto se empleó los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, de la ciudad Tarija.

En los laboratorios de la UAJMS se realizaron todos los ensayos de clasificación de suelos, compactaciones, CBR's convencionales, más algunos procedimientos necesarios para determinar la densidad In Situ.

3.3. Ubicación de las muestras de aplicación

Para llevar a cabo la presente investigación se hizo el estudio en 4 tramos de subrasantes de la Ciudad de Tarija, los tramos estudiados son: B./ La Cañada – Z./ Monte Sud, B./ Luis Espinal – B./ Monte Cristo, B./ San Antonio – B./ Medinacelli, y Z./ Nueva Terminal – Z./ Pampa Galana.

Figura 3.1. Ubicación de las subrasantes.



Fuente: Elaboración propia – Google Earth.

Tabla 3.1. Ubicación de la toma de muestras.

Sitios	Latitud	Longitud
Barrio la Cañada – Monte Sud	21°29'43,11''	64°43'12,99''
Barrio Luis Espinal – Monte Cristo	21°31'10,70''	64°42'20,23''
Barrio San Antonio – Medinaceli	21°31'39,89''	64°45'58,06''
Barrio Nueva Terminal – Pampa Galana	21°32'54,49''	64°40'12,01''

Fuente: Elaboración propia.

Las coordenadas del cuadro anterior, ubican los sitios de las sub rasante en los que se realizaron los ensayos respectivos para determinar la clasificación del suelo, las compactaciones, los CBR's convencionales, Densidad In Situ y el CBR In Situ correspondientes para concluir satisfactoriamente el proyecto.

Figura 3.2. Ubicación tramo La Cañada – Monte Sud.



Fuente: Elaboración propia – Google Earth.

Figura 3.3. Ubicación tramo Luis Espinal – Monte Cristo.



Fuente: Elaboración propia – Google Earth.

Figura 3.4. Ubicación tramo San Antonio – Medinaceli.



Fuente: Elaboración propia – Google Earth.

Figura 3.5. Ubicación tramo Nueva Terminal – Pampa Galana.



Fuente: Elaboración propia – Google Earth.

Se decidió realizar el proyecto en base a estos cuatro lugares, debido a que en estos se tiene suelos con características cercanas, y favorecen al proyecto. Ya que se decidió trabajar en suelos de grano más pequeño (finos-coluviales), es decir, mantenerse en un rango de aplicación.

3.4. Trabajo en campo

En cada punto de los tramos de las subrasantes, se procedió a realizar los ensayos en el sitio, como ser: CBR In Situ, Densidad In Situ y extracción de muestra para el contenido de humedad natural después de realizar los ensayos.

3.4.1. Toma de muestras

Para el estudio de las subrasantes, extrajo muestras para los ensayos en laboratorio como ser, clasificación del suelo, compactación Próctor modificado y CBR convencional.

En cada tramo ubicado en los sitios antes mencionados, se procedió a hacer el levantamiento de la información necesaria para realizar este proyecto, a nivel de la sub rasante, estos sitios cuentan con las características necesarias para encajar con el objetivo del proyecto que se elabora. Estos son: mantenerse en un rango de tipo de suelo (fino-coluvial), calles sin tratamiento alguno, es decir; sin ni siquiera ripiado, donde tengamos una sub rasante bastante consolidada para poder realizar apropiadamente las prácticas.

Identificados los puntos para realizar las prácticas, y toma de muestras representativas del lugar considerando todos cuidados para elaborar y proceder de la mejor manera con los ensayos posteriores a la toma de muestras.

Figura 3.6. Extracción muestra.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. CBR In Situ

Previo a la extracción de muestras para los ensayos en laboratorio, se realiza el ensayo de CBR In Situ, en los puntos establecidos por el presente estudio. De acuerdo la metodología del ensayo se tiene que dicho ensayo consiste en los siguientes pasos básicamente:

- Ubicar el lugar de ensayo
- Retirar el material suelto de la superficie
- Alinear el vehículo para la reacción
- Instalar el equipo de CBR in situ
- Aplicar la carga del pistón
- Extraer una muestra del punto de ensayo.

Figura 3.7. Realización del ensayo CBR In Situ.



Fuente: Elaboración propia.

Este ensayo se realizó, en cuatro tramos elegidos intencionalmente para este proyecto, en dichos tramos se consideró tres puntos alejados unos de otros de entre 15-20 metros, el cada uno de los puntos establecidos se procedió a realizar la práctica a tres muestras por punto, con una distancia aproximada de 1m. de una muestra a otra. Es decir, para cada tramo establecido se realizaron 9 ensayos de CBR In Situ. Teniendo un total de 36 ensayos y con ellos estamos encima del límite mínimo para establecer una correlación (mínima 30 muestras).

Los resultados obtenidos de todos los ensayos CBR que se realizó para este proyecto, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Resultados de CBR In Situ.

Lugar	Barrio La Cañada – Monte Sud								
Punto	1			2			3		
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CBR (%)	6,45	6,88	6,69	6,11	6,97	6,48	4,79	4,33	4,02
Lugar	Barrio Luis Espinal – Monte Cristo								
Punto	4			5			6		
Muestra	10	11	12	13	14	15	16	17	18
CBR (%)	6,33	6,79	6,76	6,57	7,06	6,85	6,60	6,97	6,76
Lugar	Barrio San Antonio – Medinacelli								
Punto	7			8			9		
Muestra	19	20	21	22	23	24	25	26	27
CBR (%)	6,51	6,97	6,79	6,91	6,69	6,45	6,94	6,60	6,54
Lugar	Zona Nueva Terminal – Pampa Galana								
Punto	10			11			12		
Muestra	28	29	30	31	32	33	34	35	36
CBR (%)	7,53	7,68	7,40	7,65	7,56	7,46	8,14	8,02	7,89

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Densidad In Situ

Luego de realizados los ensayos de CBR In Situ, se realizó el ensayo de Densidad In Situ, justo en el mismo lugar. La densidad al ser un valor que no influye en la correlación del presente estudio, al igual que la clasificación de los suelos, sólo se realizó una muestra por punto con su respectivo contenido de humedad natural.

Figura 3.8. Ensayo densidad in situ.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9. Muestras suelo para el contenido de humedad en el horno.



Fuente: Elaboración propia.

Luego de aplicar la metodología correspondiente para la determinación de la humedad del suelo en estado natural y la densidad In Situ, tenemos los siguientes resultados:

Tabla 3.3. Densidad y humedad In Situ

Tramo	Punto	Densidad (gr/cm³)	Humedad (%)
La cañada – Monte Sud	1	1,64	2,52
	2	1,60	2,24
	3	1,66	3,16
Luis Espinal – Monte Cristo	4	1,74	3,04
	5	1,77	2,66
	6	1,80	3,79
San Antonio – Medinacelli	7	1,56	2,37
	8	1,59	2,16
	9	1,51	1,58
Nueva Terminal - Pampa Galana	10	1,62	2,95
	11	1,66	2,25
	12	1,56	2,37

Fuente: Elaboración propia

3.5. Trabajo en laboratorio

Los ensayos realizados en laboratorio a las muestras de las subrasantes, son: clasificación (con previos ensayos adjuntos en anexos), compactación Próctor T-180 y CBR convencional.

3.5.1. Clasificación de los suelos subrasantes

A partir de los resultados de granulometría y límites de Atterberg (ver anexos), se procede a realizar la clasificación de los suelos de las subrasantes.

Figura 3.10. Ensayo clasificación de suelos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.11. Tamices para la clasificación de suelos.



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente cuadro se muestra el tipo de suelo de los cuatro sitios de prácticas para este proyecto, a partir de los ensayos necesarios se obtiene:

Tabla 3.4. Clasificación de las muestras de las subrasantes: La cañada – Monte Sud y Luis espinal – Monte Cristo.

Lugar	La cañada - Monte Sud			Luis espinal - Monte Cristo		
	1	2	3	4	5	6
Muestra						
% que pasa N° 10 (2,00 mm)	100	99,97	99,96	99,27	99,81	99,73
% que pasa N° 40 (0,425 mm)	99,54	99,89	99,82	96,29	97,03	98,91
% que pasa N° 200 (0,075 mm)	97,89	99,12	99,20	74,91	86,67	96,47
Límite líquido	34	46	43	46	30	48
Índice de plasticidad	13	15	17	10	9	2
Clasificación AASHTO	A-6 (10)	A-6 (11)	A-7-5 (10)	A-4 (11)	A-4 (11)	A-5 (11)
Clasificación SUCS	CL	CL	CH	ML	ML	ML

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5. Clasificación de las muestras de las subrasantes: San Antonio – Medinacelli y Nueva Terminal – Pampa Galana.

Lugar	San Antonio - Medinacelli			Nueva terminal - Pampa Galana		
	7	8	9	10	11	12
Muestra						
% que pasa N° 10 (2,00 mm)	67,90	33,74	35,93	99,05	99,54	98,91
% que pasa N° 40 (0,425 mm)	53,58	19,83	25,12	93,17	95,82	95,75
% que pasa N° 200 (0,075 mm)	34,91	1,16	14,45	69,92	77,33	72,88
Límite líquido	24	0	0	41	30	43
Índice de plasticidad	8	0	0	5	9	21
Clasificación	A-2-6 (0)	A-2-5 (0)	A-2-5 (0)	A-4 (9)	A-4 (11)	A-4 (10)
Clasificación SUCS	GC	SM	SM	ML	ML	ML

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Compactación Próctor modificado (T-180)

Aplicando la metodología especificada para la compactación por el método Próctor modificado T-180, determina la densidad máxima seca y la humedad óptima de compactación, de los cuatro tramos de subrasantes establecidos en el proyecto, a partir de las muestras extraídas del sitio, obtenemos el siguiente cuadro resumen de resultados:

Tabla 3.6. Resultados de densidad (Próctor modificado T-180).

Tramo	Punto	Densidad (gr/cm ³)	Humedad (%)
La cañada – Monte Sud	1	2,18	14,81
	2	2,17	14,38
	3	2,13	13,72
Luis Espinal – Monte Cristo	4	2,01	11,57
	5	2,04	12,43
	6	2,05	13,48
San Antonio – Medinacelli	7	2,02	10,26
	8	2,00	9,87
	9	1,99	9,83
Nueva Terminal - Pampa Galana	10	1,95	13,21
	11	1,91	13,99
	12	1,93	13,73

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.12. Realizando el ensayo de compactación.



Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. CBR (Convencional)

Se realiza el procedimiento de acuerdo a la normativa establecida, para la elaboración del ensayo, para realizar un buen ensayo se debe tener estricto control con los procedimientos que se realiza desde la toma de las muestras, preparación de las muestras, elaboración de los especímenes, la inmersión de los mismos, la penetración y los cálculos correspondientes.

Figura 3.13. Prensa hidráulica y moldes CBR listos para romper.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.14. Lectura de expansión de CBR convencional.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7. CBR al 100% (Convencional).

Lugar	Tramo La Cañada – Monte Sud								
Muestra	1			2			3		
Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CBR (%)	6,92	7,53	7,20	7,00	7,90	7,38	5,26	4,72	4,65
Lugar	Tramo Luis Espinal – Monte Cristo								
Muestra	4			5			6		
Ensayo	10	11	12	13	14	15	16	17	18
CBR (%)	8,16	9,43	8,84	8,41	8,83	9,17	8,25	8,57	7,83
Lugar	Tramo San Antonio – Medinacelli								
Muestra	7			8			9		
Ensayo	19	20	21	22	23	24	25	26	27
CBR (%)	11,16	11,61	10,80	12,25	11,75	12,29	11,29	12,88	12,86
Lugar	Tramo Nueva Terminal – Pampa Galana								
Muestra	10			11			12		
Ensayo	28	29	30	31	32	33	34	35	36
CBR (%)	7,20	8,74	8,68	8,83	8,08	8,24	7,10	7,85	7,28

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8. CBR al 95% (Convencional).

Lugar	Tramo La Cañada – Monte Sud								
Punto	1			2			3		
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CBR (%)	6,47	6,72	6,82	6,38	6,61	6,95	4,89	4,48	4,36
Lugar	Tramo Luis Espinal – Monte Cristo								
Punto	4			5			6		
Muestra	10	11	12	13	14	15	16	17	18
CBR (%)	7,66	8,98	8,44	7,99	8,41	8,68	7,85	8,19	8,34
Lugar	Tramo San Antonio – Medinacelli								
Punto	7			8			9		
Muestra	19	20	21	22	23	24	25	26	27
CBR (%)	10,65	10,99	9,62	11,18	7,16	10,18	7,96	10,38	12,31
Lugar	Tramo Nueva Terminal – Pampa Galana								
Punto	10			11			12		
Muestra	28	29	30	31	32	33	34	35	36
CBR (%)	6,64	8,32	8,29	7,73	7,72	7,81	6,77	7,51	6,81

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Tratamiento estadístico

Para poder realizar las correlaciones, primero es indispensable realizar un tratamiento estadístico descriptivo, a través de las medidas de tendencia central y medidas de dispersión. Para ello primero se determinan los valores de frecuencia.

La nomenclatura que se maneja en algunos cuadros es la siguiente:

(CBR1) = CBR al 100%

(CBR2) = CBR al 95%

(CBRis) = CBR In Situ

3.6.1. Frecuencia

Para el cálculo de la frecuencia, se realiza un análisis de números repetidos y luego se los acumula, llegando al total del número de muestras.

A continuación, el análisis de frecuencias para los datos de CBR1 y CBR2.

Tabla 3.9. Medidas de tendencia central – CBR convencional al 100%.

CBR al 100% (CBR1) (xi)	Frecuencia (fi)	Frecuencia acumulada (Fi)
4,65	1	1
4,72	1	2
5,26	1	3
6,92	1	4
7	1	5
7,1	1	6
7,2	2	8
7,28	1	9
7,38	1	10
7,53	1	11
7,83	1	12
7,85	1	13
7,9	1	14
8,08	1	15
8,16	1	16
8,24	1	17
8,25	1	18
8,41	1	19

8,57	1	20
8,68	1	21
8,74	1	22
8,83	2	24
8,84	1	25
9,17	1	26
9,43	1	27
10,8	1	28
11,16	1	29
11,29	1	30
11,61	1	31
11,75	1	32
12,25	1	33
12,29	1	34
12,86	1	35
12,88	1	n = 36

Fuente: Elaboración propia.

Tablada 3.10. Medidas de tendencia central – CBR convencional al 95%.

CBR al 95% (CBR2) (xi)	Frecuencia (fi)	Frecuencia acumulada (Fi)
4,36	1	1
4,48	1	2
4,89	1	3
6,38	1	4
6,47	1	5
6,61	1	6
6,64	1	7
6,72	1	8
6,77	1	9
6,81	1	10
6,82	1	11
6,95	1	12
7,16	1	13
7,51	1	14
7,66	1	15
7,72	1	16
7,73	1	17
7,81	1	18
7,85	1	19

7,96	1	20
7,99	1	21
8,19	1	22
8,29	1	23
8,32	1	24
8,34	1	25
8,41	1	26
8,44	1	27
8,68	1	28
8,98	1	29
9,62	1	30
10,18	1	31
10,38	1	32
10,65	1	33
10,99	1	34
11,18	1	35
12,31	1	n = 36

Fuente: Elaboración propia.

Tablada 3.11. Medidas de tendencia central – CBR In Situ.

CBR In Situ (CBRis) (x_i)	Frecuencia (f_i)	Frecuencia acumulada (F_i)
4,02	1	1
4,33	1	2
4,79	1	3
6,11	1	4
6,33	1	5
6,45	2	7
6,48	1	8
6,51	1	9
6,54	1	10
6,57	1	11
6,6	2	13
6,69	2	15
6,76	2	17
6,79	2	19

6,85	1	20
6,88	1	21
6,91	1	22
6,94	1	23
6,97	3	26
7,06	1	27
7,4	1	28
7,46	1	29
7,53	1	30
7,56	1	31
7,65	1	32
7,68	1	33
7,89	1	34
8,02	1	35
8,14	1	n = 36

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2. Medidas de tendencia central

La media de tendencia central trata de describir un conjunto de datos por medio de la identificación del centro de éstos. Para ello estudiamos la media aritmética, la mediana, la moda, el rango

3.6.2.1. Media aritmética

La ecuación de la media aritmética es:

$$\bar{X} = \frac{x_1f_1 + x_2f_2 + \dots + x_mf_m}{n} = \frac{\sum_i^m x_i f_i}{n}$$

Tabla 3.12. Resultados de la media aritmética.

Media (\bar{X})	
CBR convencional al 100 %	8,748
CBR convencional al 95 %	7,951
CBR In Situ	8,384

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.2. Mediana

La media es el valor central de la muestra de datos

$$Me = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}$$

$$\frac{n}{2} < F_j$$

Tabla 3.13. Resultados de la mediana

Mediana (Me)	
CBR convencional al 100 %	8,33
CBR convencional al 95 %	7,83
CBR In Situ	7,40

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.3. Moda

La moda es el valor que ocurre con mayor frecuencia. De tal manera tenemos que para ninguno de los casos CBR1 y CBR2, hay datos que se repitan con mayor frecuencia, sin embargo, para CBRis, sí existe un valor que se repite tres veces.

Tabla 3.14. Resultados de la moda.

Parámetro	Moda (Mo)
CBR convencional al 100 %	-
CBR convencional al 95 %	-
CBR In Situ	6,97

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.4. Rango

Rango es aquel valor que se encuentra entre los valores máximo y mínimo de CBR1 y CBR2, respectivamente. Su fórmula de cálculo es:

$$R = X_{max} - X_{min}$$

Tabla 3.15. Resultados del rango

Parámetro	Máximo	Mínimo	Rango Δ
CBR convencional al 100 %	12,88	4,65	8,23
CBR convencional al 95 %	12,31	4,36	7,95
CBR In Situ	8,14	4,02	4,12

Fuente: Elaboración propia.

Al observar el resultado de la diferencia de los datos máximos y mínimos, se puede observar que existe dispersión entre los datos, para que los datos sean homogéneos los valores extremos deben ser similares. Por lo tanto, el CBR convencional al 100% tiene mayor dispersión.

3.6.3. Medidas de dispersión

Las medidas de dispersión son importantes porque nos hablan de la variabilidad que encontramos en una determinada muestra o población. Cuando hablamos de muestra, esta dispersión es importante porque condiciona el error que vamos a tener a la hora de hacer inferencias para medidas de tendencia central, como la media.

Las medidas de dispersión aplicadas al estudio son: la desviación media, varianza poblacional, varianza muestral y desviación estándar.

3.6.3.1. Desviación media

Para calcular la desviación media aplicamos la siguiente fórmula:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{j=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n}$$

Tabla 3.16. Resultados de la desviación media.

Parámetro	Desviación media ($\bar{\sigma}$)
CBR convencional al 100 %	1,5944
CBR convencional al 95 %	1,3187
CBR In Situ	2,5645

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.2. Varianza poblacional

La varianza se interpreta como como una medida de cuán diversos son los datos obtenidos.

Para calcular la varianza poblacional aplicamos la siguiente expresión:

$$S^2 = \frac{\sum_1^m (X_i - \bar{X})^2 f_i}{n}$$

Tabla 3.17. Resultados de la varianza poblacional.

Parámetro	Varianza poblacional (S ²)
CBR convencional al 100 %	14,5585
CBR convencional al 95 %	9,2441
CBR In Situ	12,6126

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.3. Varianza muestral

Para calcular la varianza muestras aplicamos la siguiente ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^m (X_i - \bar{X})^2 f_i}{n - 1}$$

Tabla 3.18. Resultados de la varianza muestral.

Parámetro	Varianza muestral (σ ²)
CBR convencional al 100 %	14,9744
CBR convencional al 95 %	9,5083
CBR In Situ	13,0631

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.4. Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza poblacional, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Tabla 3.19. Resultados de la desviación estándar.

Parámetro	Desviación estándar muestral (σ)
CBR convencional al 100 %	3,8697
CBR convencional al 95 %	3,0835
CBR In Situ	3,6143

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el error estándar es de 3.8697, 3.0835 y 1.2146 respectivamente, estos valores permiten conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media, cuándo no se explica que varianza se utiliza, se toma el valor de la varianza muestral.

3.6.3.5. Coeficiente de variación

Dado que la desviación típica es una medida que está expresada en las mismas unidades que la variable, si queremos comparar dispersiones a escalas distintas necesitamos un parámetro adimensional. En estas situaciones usaremos el coeficiente de variación que se expresa tanto de forma decimal como en tanto por ciento, y nos expresaría la desviación típica como porcentaje con respecto a la media. Se calcula con la siguiente expresión:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100\%$$

Tabla 3.20. Resultados de la desviación estándar.

Parámetro	Coefficiente de variación (CV)
CBR convencional al 100 %	44,2334 %
CBR convencional al 95 %	38,7799 %
CBR In Situ	43,1087 %

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4. Depuración de datos

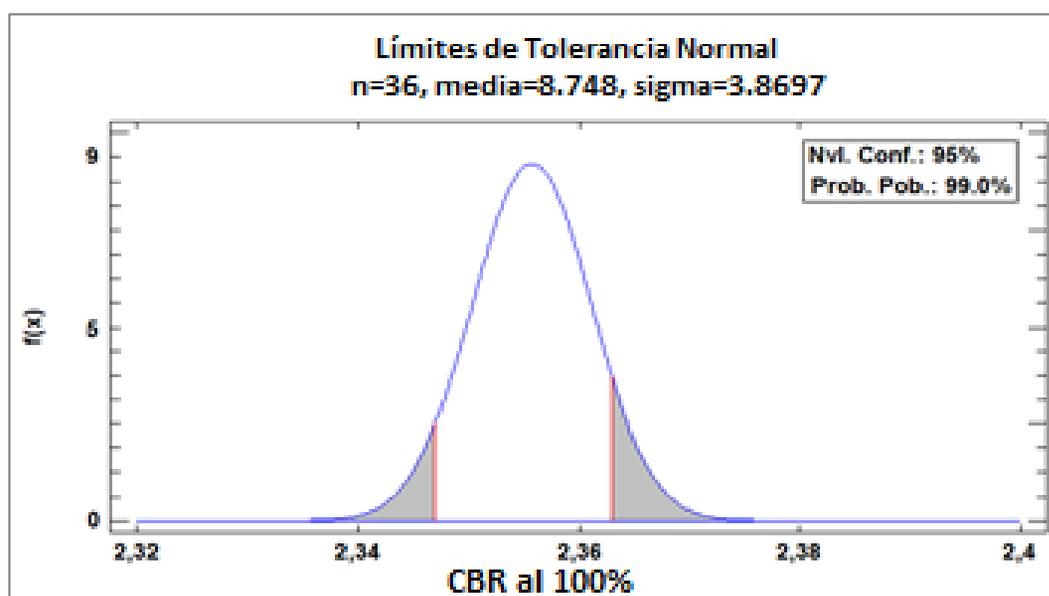
La depuración de datos para una adecuada correlación se hizo en función a las variables dependientes CBR1 y CBR2, ya que la variable independiente CBRis se mantiene constante en las dos combinaciones.

- CBR convencional al 100% (CBR1) vs. CBR In Situ (CBRis).
- CBR convencional al 95% (CBR2) vs. CBR In Situ (CBRis).

3.6.4.1. Depuración de datos de CBR convencional al 100%

Para la depuración de datos del CBR convencional al 100%, se procede a realizarlo a través de los límites de tolerancia normal, como se muestra en la siguiente gráfica:

Gráfico 3.1. Límites de tolerancia – CBR al 100%



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

Límites de tolerancia estadística:

- Tamaño de muestra = 36
- Media de la muestra = 8.748
- Desviación estándar de la muestra = 3.8697
- Intervalos de tolerancia del 95,0% para 99,0% de la población.

Los valores CBR1 marcados de color rojo son los datos depurados y, por consiguiente, su par de CBRis también es eliminado, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.21. Depuración de datos – CBR al 100%

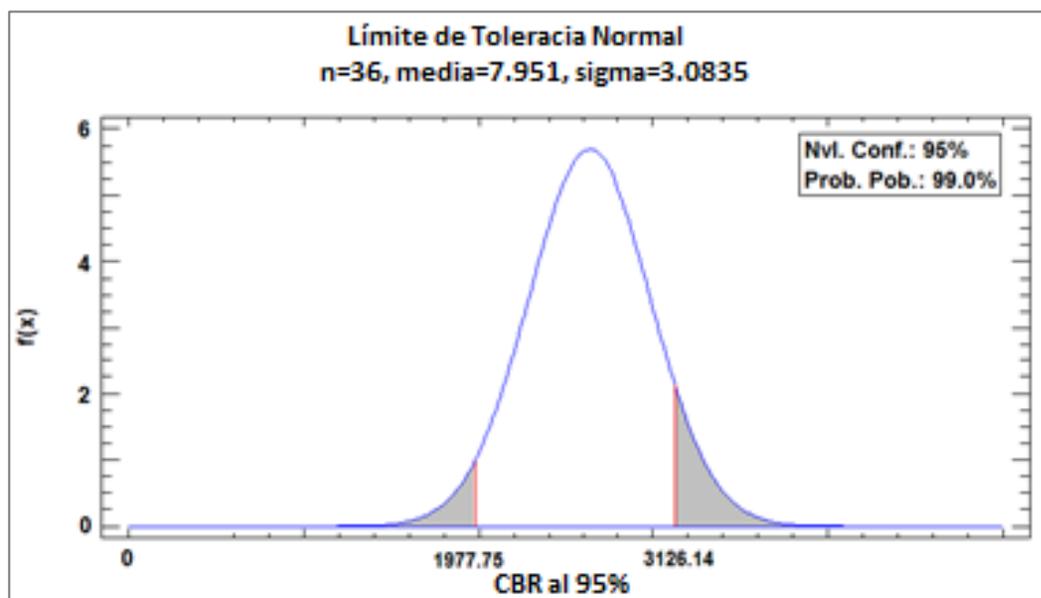
CBR al 100% (CBR1)	CBR In Situ (CBRis)
6,92	6,45
7,53	6,88
7,2	6,69
7	6,11
7,9	6,97
7,38	6,48
5,26	4,79
4,72	4,33
4,65	4,02
8,16	6,45
9,43	6,88
8,84	6,69
8,41	6,57
8,83	7,06
9,17	6,85
8,25	6,6
8,57	6,97
7,83	6,76
8,08	6,51
11,61	6,97
8,24	6,79
7,2	6,91
8,74	6,69
7,85	6,45
11,29	6,94
7,28	6,6
7,1	6,54
12,25	7,53
11,75	7,68
8,68	7,4
8,83	7,65
11,16	7,56
10,8	7,46
12,86	8,14
12,29	8,02
12,88	7,89

Fuente: Elaboración propia

3.6.4.2. Depuración de datos del CBR convencional al 95%

Para la depuración de datos del CBR convencional al 95%, se procede a realizarlo a través de los límites de tolerancia normal, como se muestra en la siguiente gráfica:

Gráfico 3.2. Límites de tolerancia – CBR al 95%



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

Límites de tolerancia estadística:

- Tamaño de muestra = 36
- Media de la muestra = 7.951
- Desviación estándar de la muestra = 3.0835
- Intervalos de tolerancia del 95,0% para 99,0% de la población.

Los valores CBR2 marcados de color rojo son los datos depurados y, por consiguiente, su par de CBRis también es eliminado, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.22. Depuración de datos – CBR al 95%

CBR al 95% (CBR2)	CBR In Situ (CBRis)
6,47	6,45
6,72	6,88
6,82	6,69
6,38	6,11
6,61	6,97
6,95	6,48
4,89	4,79
4,48	4,33
4,36	4,02
7,66	6,45
8,98	6,88
8,44	6,69
7,99	6,57
8,41	7,06
8,68	6,85
7,85	6,6
8,19	6,97
8,34	6,76
7,72	6,51
10,99	6,97
7,81	6,79
6,64	6,91
8,32	6,69
7,51	6,45
7,96	6,94
6,81	6,6
6,77	6,54
11,18	7,53
7,16	7,68
8,29	7,4
7,73	7,65
10,65	7,56
9,62	7,46
12,31	8,14
10,18	8,02
10,38	7,89

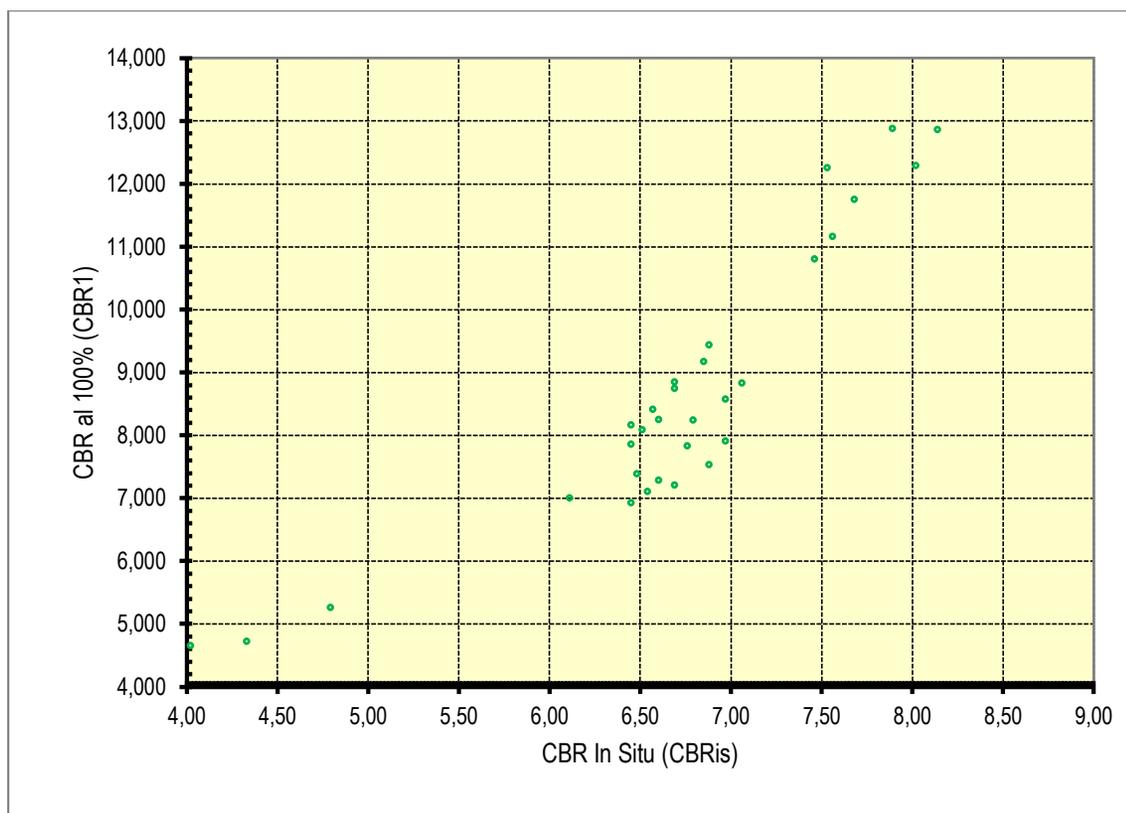
Fuente: Elaboración propia

3.7. Dispersión de puntos

En la gráfica de dispersión de datos se debe ordenar la variable independiente (CBR In Situ) en el eje x o eje de abscisas, y la variable dependiente (CBR al 100% o CBR al 95%) en el eje y o eje de las ordenadas.

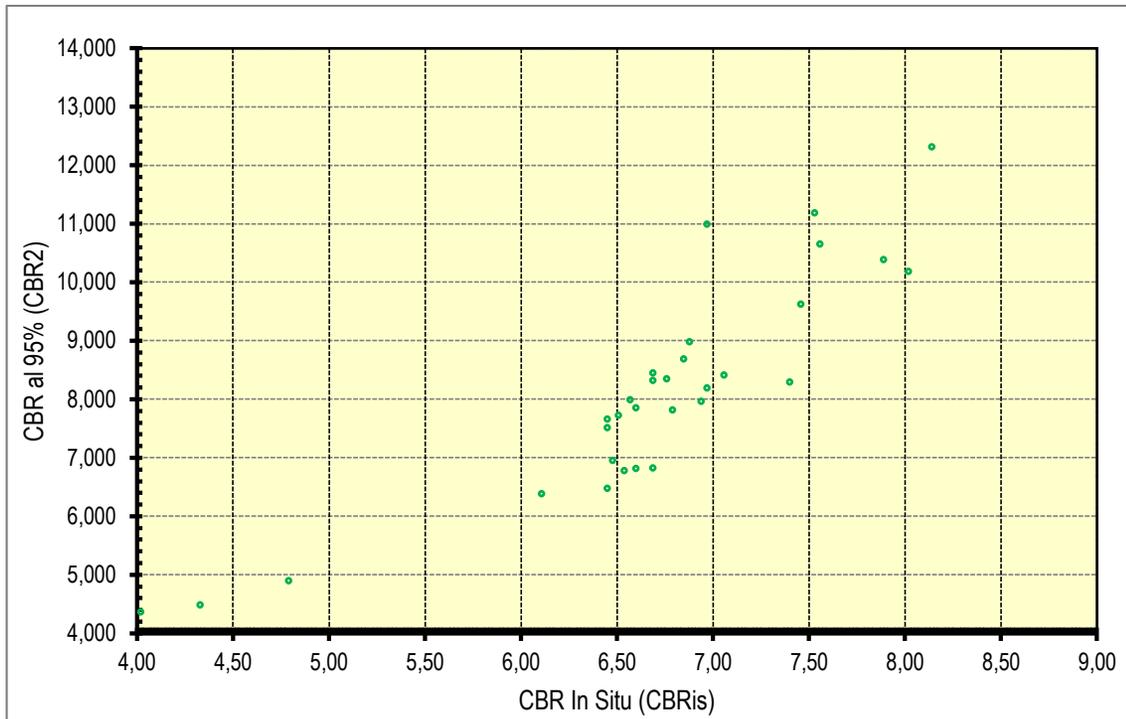
Al conjunto de puntos que se forman se lo llama nube de puntos. En la nube de puntos formada con los datos del CBR In Situ (CBR_{is}) y el CBR al 100 % (CBR₁) se puede ver que tiene una pendiente positiva, lo que quiere decir que a medida que X es mayor, Y es también mayor. Lo que paso totalmente igual con la gráfica del CBR In Situ (CBR_{is}) y el CBR al 95% (CBR₂) que se muestran a continuación:

Gráfico 3.3. Dispersión de puntos – CBR al 100%



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4. Dispersión de puntos – CBR al 95%.



Fuente: Elaboración propia.

3.8. Definición y tipos de modelos matemáticos

Un modelo matemático se define como una descripción desde el punto de vista de las matemáticas de un hecho o fenómeno del mundo real, desde el tamaño de la población, hasta fenómenos físicos como la velocidad, aceleración o densidad. El objetivo del modelo matemático es entender ampliamente el fenómeno y tal vez predecir su comportamiento en el futuro.

El proceso para elaborar un modelo matemático es el siguiente:

- Encontrar un problema del mundo real.
- Formular un modelo matemático acerca del problema, identificando variables (dependientes e independientes) y estableciendo hipótesis lo suficientemente simples para tratarse de manera matemática.
- Aplicar los conocimientos matemáticos que se posee para llegar a conclusiones matemáticas.

- Comparar los datos obtenidos como predicciones con datos reales. Si los datos son diferentes, se reinicia el proceso.

Es importante mencionar que un modelo matemático no es completamente exacto con problemas de la vida real, de hecho, se trata de una idealización.

Hay una gran cantidad de funciones que representan relaciones observadas en el mundo real; las cuales se analizarán en los párrafos siguientes, tanto algebraicamente como gráficamente.

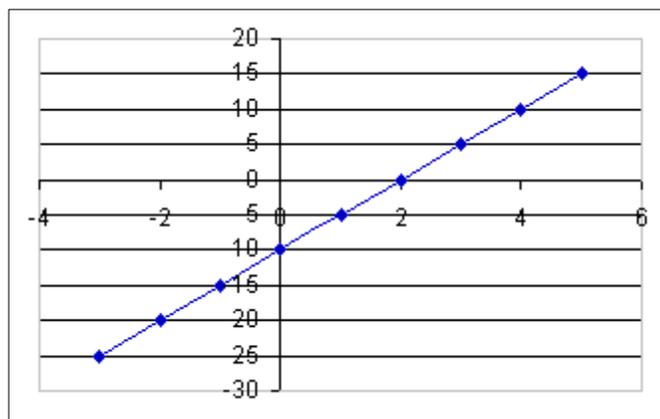
3.8.1. Modelo Lineal

Se dice que una función es lineal cuando su gráfica es una línea recta; y por consecuencia tiene la forma:

$$y = f(x) = mx + b$$

Donde m representa la pendiente de la recta y b la ordenada al origen (el punto en el que la recta interfecta al eje de las "y"). Es importante mencionar que este tipo de funciones crecen a tasa constante; y su dominio e imagen son todos los números reales.

Gráfico 3.5. Modelo lineal



Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

3.8.2. Modelo polinómico

Una función es polinomio si tiene la forma:

$$P(x) = ax^n + a_{n-1}x^{n-1} + \dots + a_2x^2 + a_1x + a_0$$

Donde n representa un entero negativo y los números $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$, son constantes llamadas coeficientes del polinomio. El dominio de todos los polinomios son todos los números reales $(-\infty, \infty)$.

Los polinomios se nombran de acuerdo al grado del primer término. Los polinomios de grado uno y son funciones lineales y tienen la siguiente forma:

$$P(x) = mx + b$$

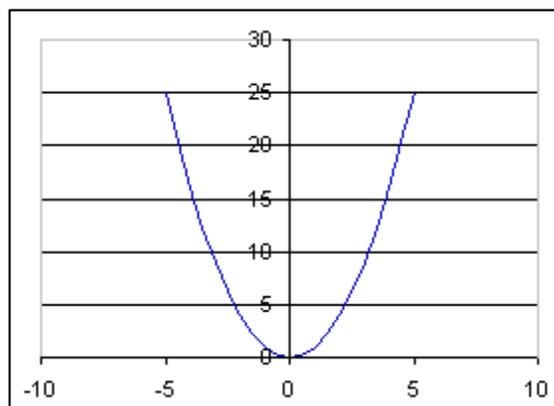
Los polinomios de segundo grado son llamados funciones cuadráticas y presentan la forma parabólica:

$$P(x) = ax^2 + bx + c$$

Una función de tercer grado, es llamada función cúbica, y tiene la forma:

$$P(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

Gráfico 3.6. Modelo polinómico de segundo grado.



Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

3.8.3. Modelo potencial

Una función es llamada potencia, cuando tiene la forma:

$$f(x) = x^a$$

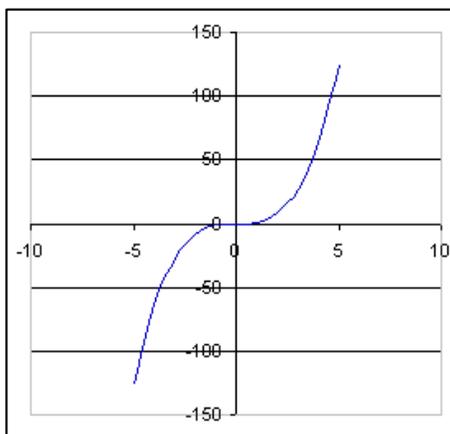
Donde a es constante.

Este modelo es más complejo porque abarca muchos casos, como ser:

- La forma general de la gráfica depende si n es par o impar; si n es par, la gráfica de f es similar a la parábola $y = x^2$; de lo contrario, la gráfica se parecerá a la función $y = x^3$.

- Es importante mencionar, que en cualquiera que sea el caso, cuando n crece, la gráfica se vuelve más plana cerca de 0.

Gráfico 3.7. Modelo potencial de tercer grado.



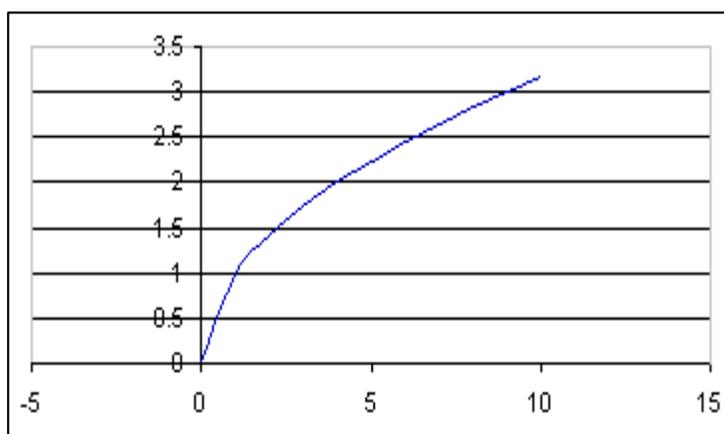
Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

- Cuando $a=n$, n es un entero positivo, como la siguiente función:

$$f(x) = x^{1/n}$$

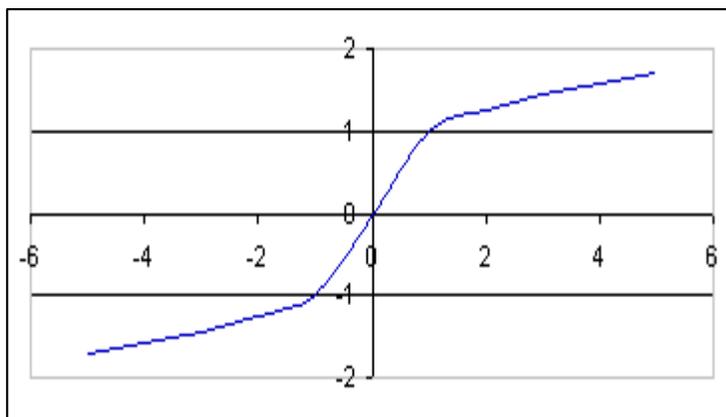
es una función raíz. Al igual que en el caso anterior, su gráfica depende de n , ya que si n es par su gráfica será similar al de raíz cuadrada; y si n es impar su gráfica será similar al de raíz cúbica.

Gráfico 3.8. Modelo potencial, raíz cuadrada.



Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

Gráfico 3.9. Modelo potencial, raíz cúbica.

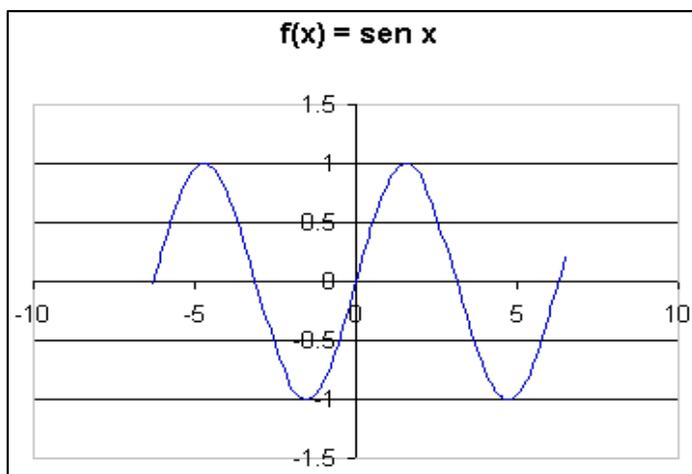


Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

3.8.4. Modelo trigonométrico

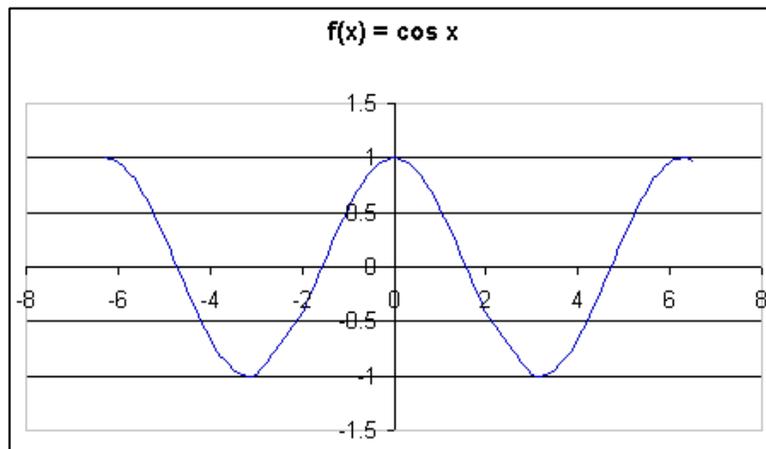
En el caso de éstas funciones, es conveniente utilizar la medida de radianes; es importante mencionar que cada función tiene una gráfica específica. En el caso específico del seno y coseno, su dominio es $(-\infty, \infty)$ y su imagen $[-1, 1]$. Veamos en las gráficas.

Gráfico 3.10. Modelo trigonométrico, función seno.



Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

Gráfico 3.11. Modelo trigonométrico, función coseno.



Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

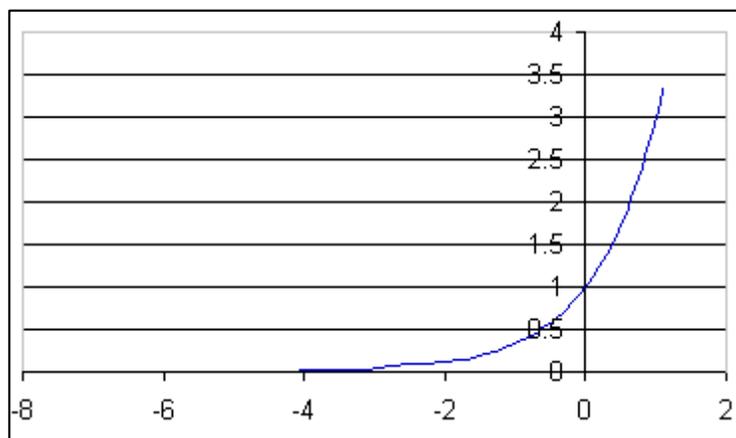
3.8.5. Modelo exponencial

Se les llama modelos o funciones exponenciales a aquellas que tienen la forma:

$$f(x) = a^x$$

Donde la base a es una constante positiva. Su dominio es $(-\infty, \infty)$ y su imagen $(0, \infty)$. Es importante mencionar que si la base de la función exponencial es mayor a 1, la gráfica será ascendente, y si la base se encuentra entre 0 y 1 la gráfica será descendente (pero en el cuadrante contrario).

Gráfico 3.12. Modelo exponencial.



Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

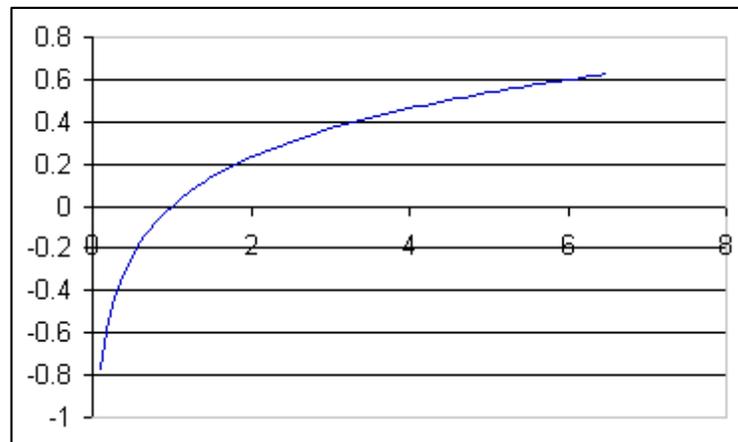
3.8.6. Modelo logarítmico

Los modelos logarítmicos son funciones que tienen la forma:

$$f(x) = a \log(x)$$

Donde la base a es una constante positiva; es importante mencionar que son las funciones inversas a las exponenciales; por lo tanto, su dominio es $(0, \infty)$ y su imagen $(-\infty, \infty)$. Por ejemplo:

Gráfico 3.13. Modelo logarítmico.



Fuente: Esquivias Celedón, Emanuel. Modelos matemáticos, monografía.

Como podemos observar en las dos gráficas anteriores, a medida que la base del logaritmo es mayor, la gráfica de éste se apega más al eje y .

3.9. Elección del modelo matemático

Un modelo de regresión, es una manera de expresar dos ingredientes esenciales de una relación estadística:

- Una tendencia de la variable dependiente Y a variar conjuntamente con la variación de la o las X de una manera sistemática.
- Una dispersión de las observaciones alrededor de la curva de relación estadística.

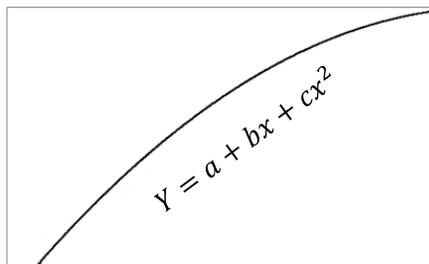
Estas dos características están implícitas en un modelo de regresión, postulando que:

- En la población de observaciones asociadas con el proceso que fue muestreado, hay una distribución de probabilidades de Y para cada nivel de X .
- Las medias de estas distribuciones varían de manera sistemática al variar X .

Suele suceder que al dibujar la nube de puntos correspondiente a n observaciones, se observa una tendencia no rectilínea, pero a la cual se le puede ajustar un modelo teórico conocido.

Dentro de la familia de modelos, es de aplicación común el ajuste regresivo polinómico de grado S « $S \geq 2$ »

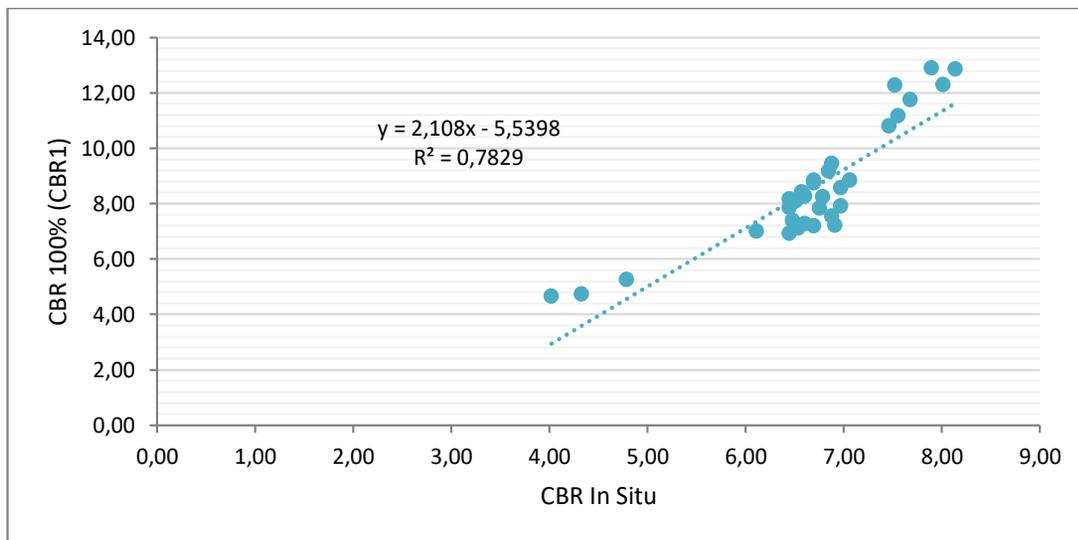
Gráfico 3.14. Modelo Polinómico



Fuente: Statgraphics

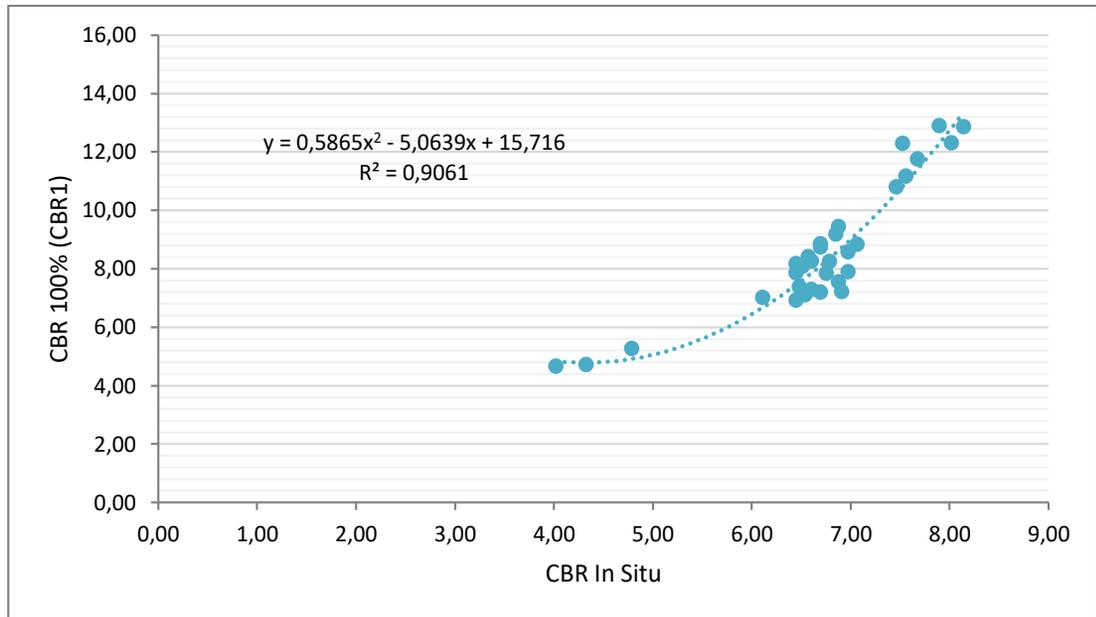
Al fijarse en nuestra nube de puntos se puede notar que se debe realizar un ajuste no lineal. A partir de ello se busca el mejor ajuste que nos propone el programa Excel por ser más práctico para elegir el modelo matemático más adecuado para la presente correlación. En los gráficos se muestran los ajustes a los diferentes modelos matemáticos, de los valores de CBR al 100% con el CBR In Situ.

Gráfico 3.15. Ajuste al modelo Lineal de CBR al 100% con el CBR In Situ.



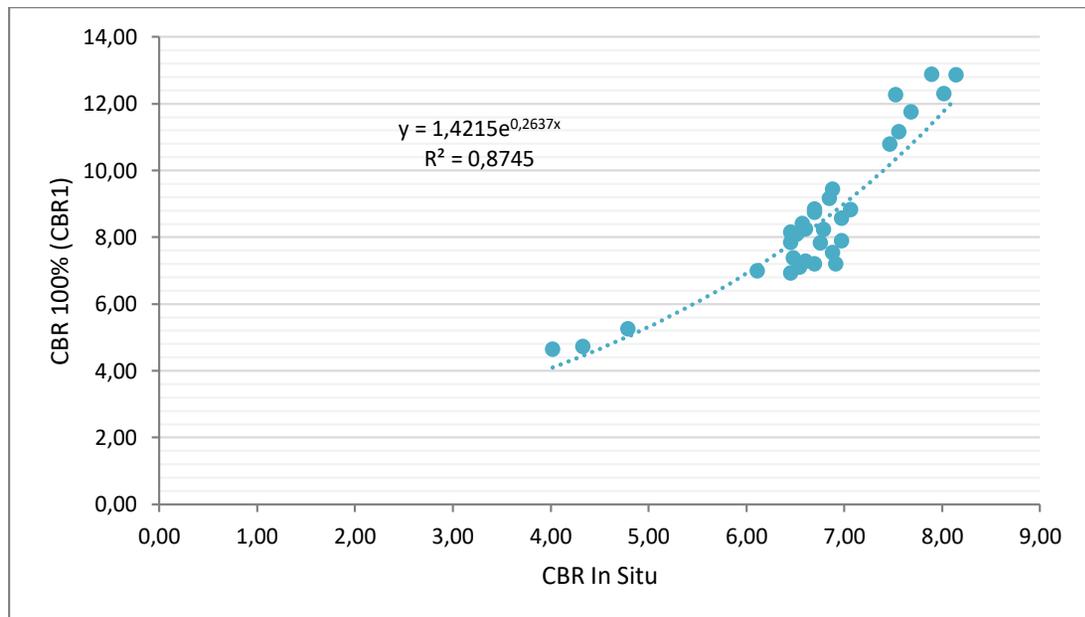
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.16. Ajuste al modelo Polinómico de CBR al 100% con el CBR In Situ.



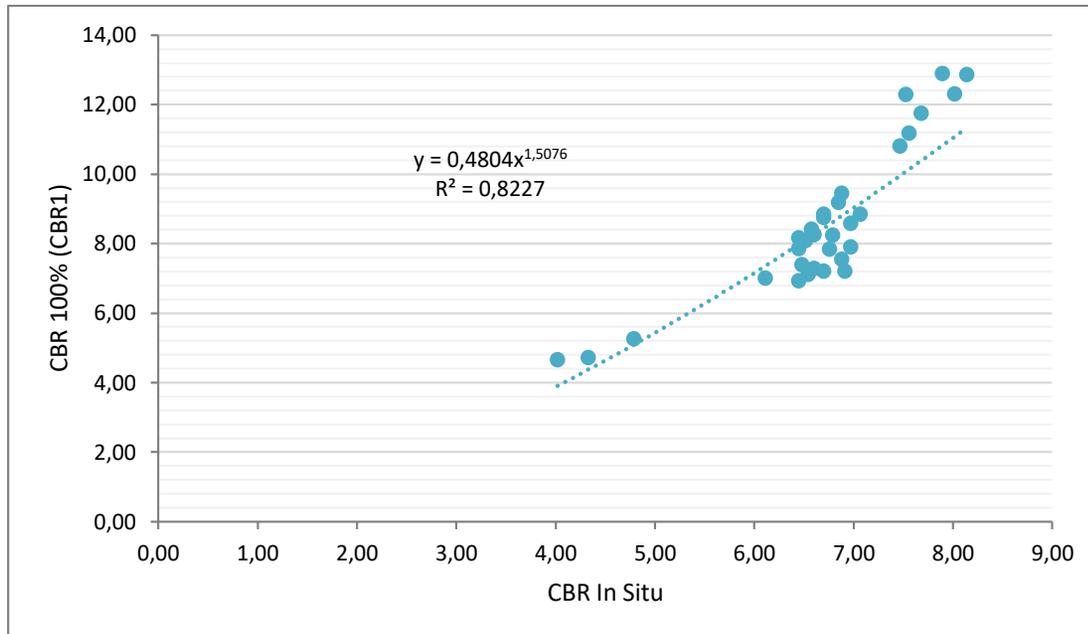
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.17. Ajuste al modelo Exponencial de CBR al 100% con el CBR In Situ.



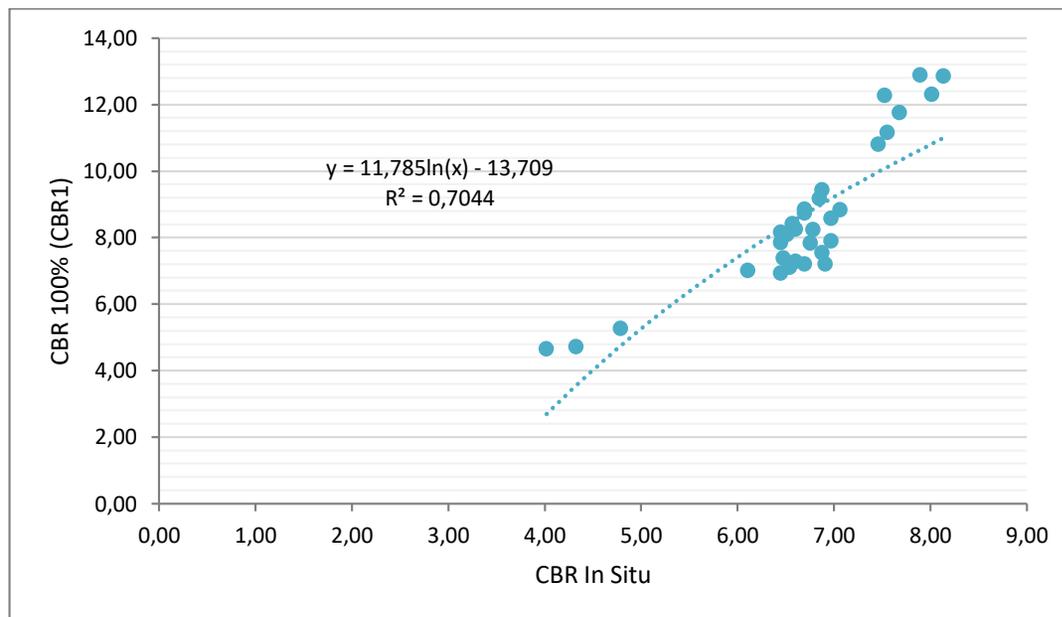
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.18. Ajuste al modelo Potencial de CBR al 100% con el CBR In Situ.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.19. Ajuste al modelo Logarítmico de CBR al 100% con el CBR In Situ.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observan en los gráficos, el modelo que mejor se ajusta por tener un coeficiente de determinación más alto es el Modelo Polinómico, por lo tanto, para nuestros valores se

procede a realizar el ajuste a un modelo de regresión polinómico, por medio del método de mínimos cuadrados, en donde el modelo de la ecuación será la siguiente:

$$y = a + bx + cx^2$$

3.10. Elección del modelo estadístico

Según las necesidades para llevar a cabo la correlación entre el CBR In Situ y el CBR convencional, se aplicó el programa STATGRAPHICS, porque es un software que está diseñado para facilitar el análisis estadístico de datos.

Statgraphics destaca especialmente por su aplicación para realizar un análisis descriptivo de una o varias variables, utilizando gráficos que expliquen su distribución o calculando sus medidas características. Entre sus muchas prestaciones, también figuran el cálculo de intervalos de confianza, contrastes de hipótesis, análisis de regresión, análisis multivariantes, así como diversas técnicas aplicadas en control de calidad.

Por sus capacidades para la representación gráfica de todo tipo de estadísticas y el desarrollo de experimentos, previsiones y simulaciones en función del comportamiento de los valores. En definitiva, se trata de una completa herramienta para el estudio, análisis y aprendizaje de cualquier rama de la estadística.

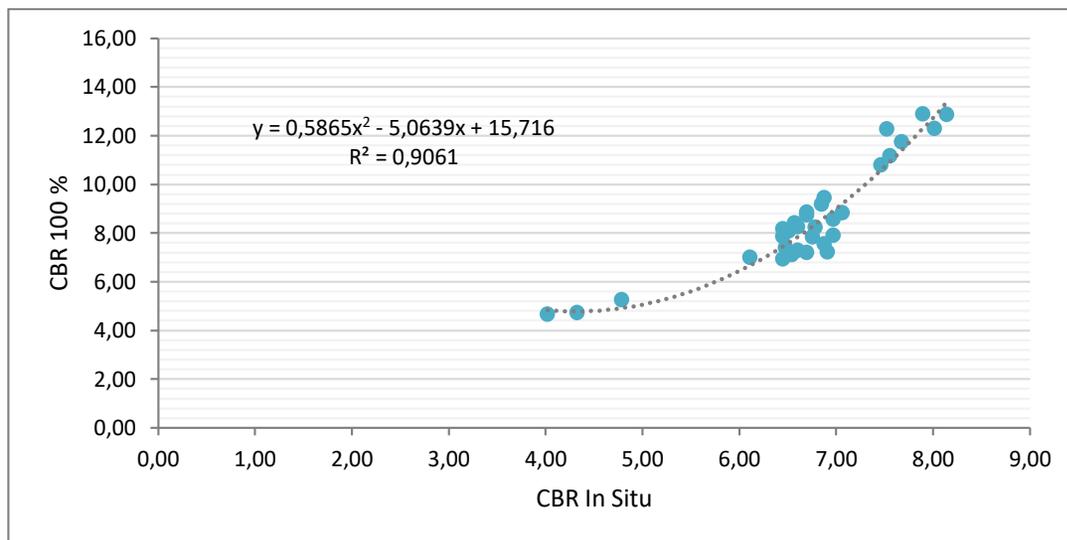
La estadística descriptiva se ocupa de presentar, de forma resumida, la información más importante de un conjunto de datos. Para ello se calculan sus medidas centrales (media, mediana...) y se da una medida de cómo están los datos dispersos en torno a esos valores centrales (varianza, desviación típica, rango...). Asimismo, tras un análisis descriptivo, se dispondrá de una representación de los datos en forma de gráficos, de forma que sea posible detectar valores atípicos, tendencias o agrupaciones.

Este programa aplica la estadística descriptiva, y permite correlacionar las variables, ya que, los coeficientes de correlación miden la fuerza de la relación lineal entre dos variables en una escala de -1 a $+1$. Entre mayor sea el valor absoluto de la correlación, más fuerte es la relación lineal entre las dos variables. STATGRAPHICS presenta los coeficientes de correlación como una matriz, por eso hace la correlación más precisa.

Sin embargo, existen muchos programas para realizar un tratamiento estadístico y una correlación, entre las más comunes está aplicando el programa Excel, siento este menos preciso que el programa STATGRAPHICS. A continuación, se demuestra la presente

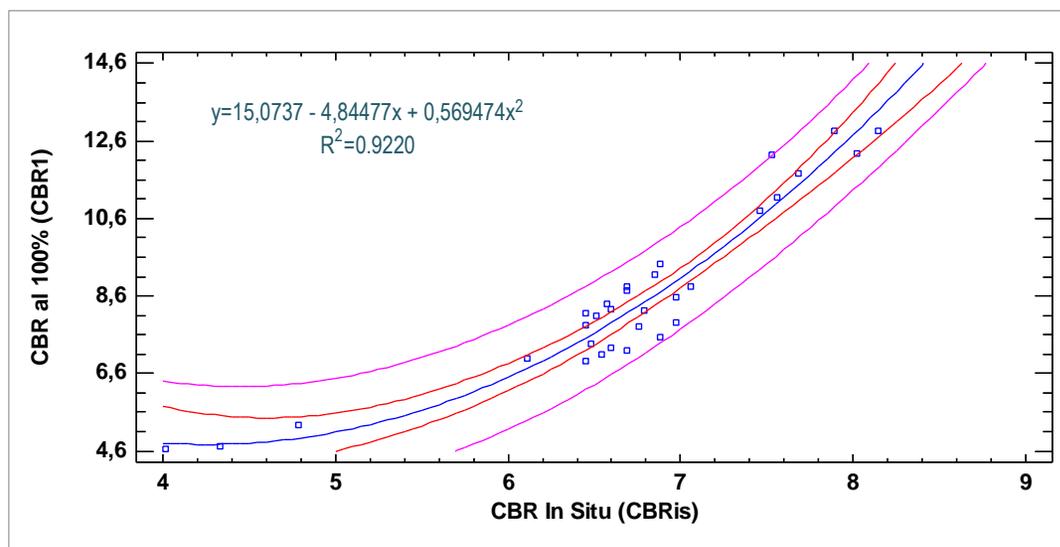
afirmación. Ambos programas se ajustan al modelo matemático polinómico de segundo grado como se muestra en los siguientes gráficos:

Gráfico 3.20. Correlación CBR In Situ y CBR Convencional al 100% con programa Excel.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.21. Correlación CBR In Situ y CBR Convencional al 100% con programa STATGRAPHICS.



Fuente: Elaboración propia.

De las gráficas obtenemos los coeficientes de determinación, que nos permite encontrar los coeficientes de correlación, quedando de la siguiente manera:

Tabla 3.23. Coeficientes de correlación por Statgraphics y Excel

Programa	Coefficiente de determinación (r²)	Coefficiente de correlación (r)
Excel	0,9061	0,9519
Statgraphics	0,9220	0,9602

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta tabla se llega a la conclusión que más preciso es la correlación con el programa STATGRAPHICS, por tener una correlación de 0,9602, sin embargo, con el programa Excel se obtuvo una menor correlación igual a 0,9519.

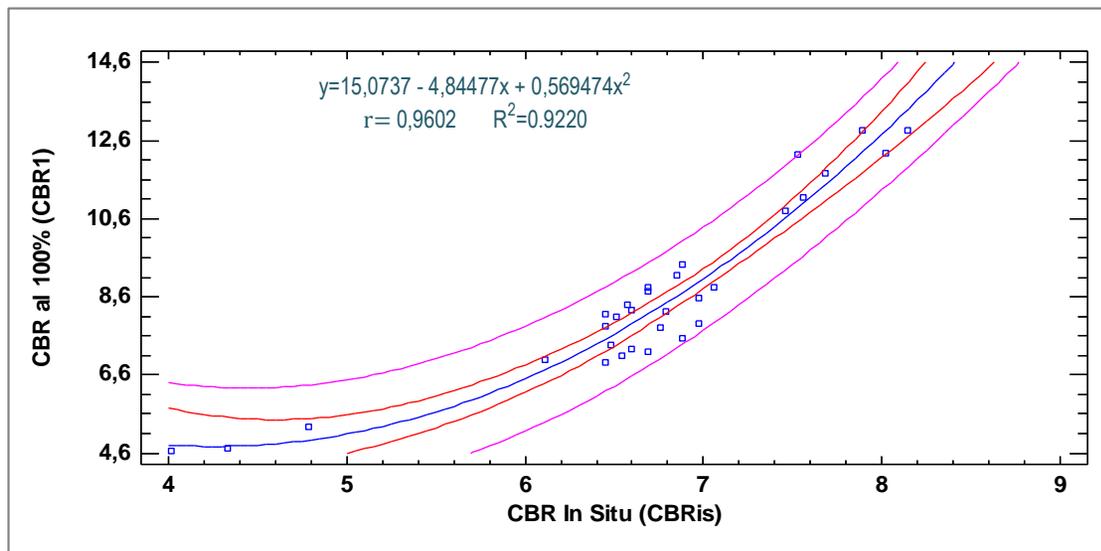
3.11. Correlación del CBR In Situ con el CBR convencional.

En el presente proyecto se realizaron dos correlaciones; CBR al 100 % convencional con el CBR In Situ y CBR al 95 % convencional con el CBR In Situ.

3.11.1. Aplicación del modelo estadístico

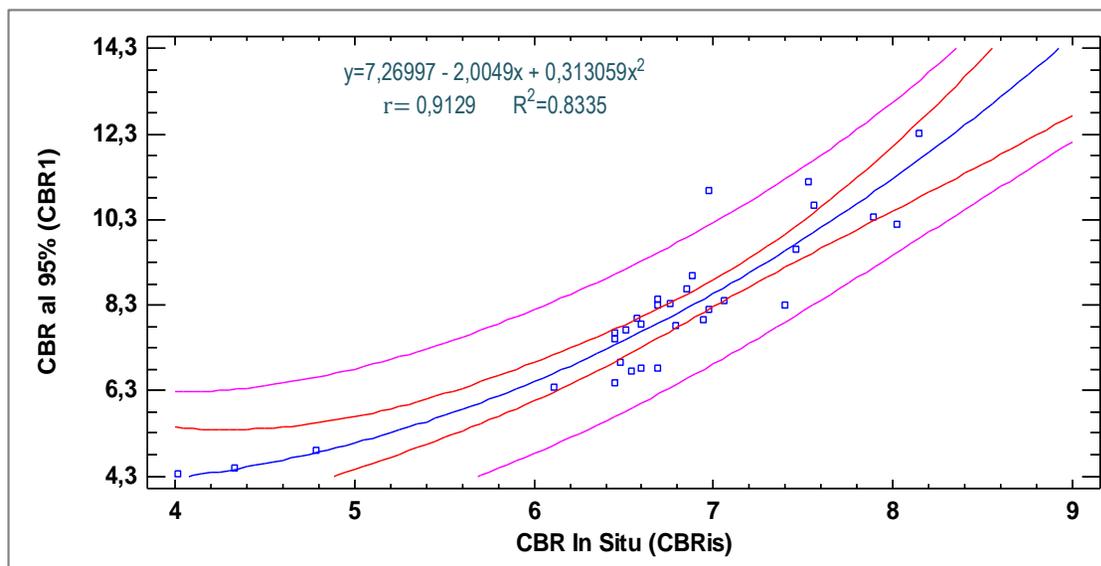
Aplicando el modelo estadístico con el modelo matemático seleccionado se obtienen las correlaciones del CBR_{is} vs. CBR₁ y CBR₂, como se muestran en los siguientes gráficos:

Gráfico 3.22. Modelo de regresión ajustado – CBR al 100% (CBR1)



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

Gráfico 3.23. Modelo de regresión ajustado – CBR al 95% (CBR2)



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

De la aplicación del programa computacional STATGRAPHICS, tenemos los siguientes resultados:

Tabla 3.24. Constantes de las ecuaciones correlacionadas

Constante	Valores de las constantes de las ecuación	
	CBR al 100% (CBR1)	CBR al 95% (CBR2)
a	15,0737	7,26997
b	-4,84477	-2,0049
c	0,569474	0,313059

Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

Las ecuaciones resultantes de la regresión polinómica se muestran en el cuadro a continuación:

Tabla 3.25. Ecuaciones correlacionadas

Parámetro	Ecuación
CBR al 100% (CBR1)	$CBR1 = 15,0737 - 4,84477 * CBR_{is} + 0,569474 * CBR_{is}^2$
CBR al 95% (CBR2)	$CBR2 = 7,26997 - 2,0049 * CBR_{is} + 0,313059 * CBR_{is}^2$

Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

3.11.2. Análisis correlacional - descriptivo

Este estudio muestra, un análisis correlacional – descriptivo de muestras de suelos de subrasantes, de la variable CBR Convencional al 95% y 100% de grado de compactación en laboratorio, con la variable CBR In Situ al grado de compactación In Situ.

En las abscisas (eje x), ver gráfico 3.22 y 3.23, se observa la variable CBR In Situ, determinado en el lugar de aplicación, que tiene valores complementarios propios de humedad, densidad y grado de compactación.

En la ordenada 1 (eje y), ver gráfico 3.22, se observa la variable CBR Convencional, determinado en laboratorio, que tiene valores propios del grado de compactación al 100% y que comparte valores de humedad y densidad con el CBR al 95%.

En la ordenada 2 (eje y), ver gráfico 3.23, se observa la variable CBR Convencional, determinado en laboratorio, que tiene valores propios del grado de compactación al 95% y que comparte valores de humedad y densidad con el CBR al 100%.

Sin embargo, al estudiar los dos tipos de ensayos, in situ y en laboratorio, para cada tipo de muestra, se denota una relación interna de los componentes de las variables.

Para mejorar el ajuste de los datos a la curva polinómica de segundo grado se hizo una depuración de puntos, dichos puntos al encontrarse más alejados de la línea de tendencia, de tal manera éstos puntos más dispersos son identificados y eliminados de la nube puntos haciendo que la correlación aumente permitiendo que su ajuste este dentro del límite mínimo del 75 % lo cual favoreció al ajuste de cada una de las ecuaciones ajustadas.

3.12. Análisis de los parámetros de correlación

A partir de este análisis descriptivo – correlacional, podemos observar y entender claramente la correlación que existe entre sí, a través de los siguientes parámetros que fueron determinados gráficamente.

3.12.1. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación es un número que varía entre -1 y +1, se usa para medir el grado de relación existente entre las variables, también se lo expresa en porcentaje.

Tabla 3.26. Coeficientes de correlación obtenidos.

Parámetro	r (adimensional)	r (%)
CBR In Situ vs. CBR al 100% (CBR1)	0,9602	96,02
CBR In Situ vs. CBR al 95% (CBR2)	0,9129	91,29

Fuente: Elaboración propia.

Una correlación excelente debe un coeficiente de correlación entre 0,9 a 1,0. Por lo tanto, ambas correlaciones son buenas, sin embargo, se observa mejor correlación con el 0,9602 entre el CBR In Situ con el CBR al 100 %. Es decir que, si se realiza un CBR In Situ, el

resultado tiene 96,02 % de confiabilidad en comparación de un CBR convencional al 100 % de grado de compactación.

Por otra parte, existe una correlación del 0,9129 entre el CBR In Situ con el CBR al 95 %, se observa que es un poco más bajo que el anterior, sin embargo, al tener el 91,29% de confiabilidad, está dentro del rango de una buena correlación, al ser superior a 0,90.

3.12.2. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación, es un número positivo que varía entre 0 y 1, permite indicar el grado de certeza con que una variable depende de la otra, este coeficiente multiplicado por 100 y redondeado, es la certeza de: en qué porcentaje los valores de Y dependen de los valores de X.

Para nuestro estudio se tiene un coeficiente de determinación:

Tabla 3.27. Coeficientes de determinación obtenidos.

Parámetro	R ² (adimensional)	R ² (%)
CBR al 100% (CBR1)	0,9220	92,20
CBR al 95% (CBR2)	0,8335	83,20

Fuente: Elaboración propia.

Lo que nos indica los coeficientes de determinación para CBR1 y CBR2, es que el modelo de ajuste es muy bueno y bueno respectivamente ya que el valor se encuentra más próximo a 1 (adimensional) o al 100 (porcentaje). Por lo tanto, estos son los porcentajes que determinan o validan los resultados del CBR In Situ.

3.13. Aplicación de la correlación de CBR convencional con CBR In Situ

Las correlaciones obtenidas para los suelos de las subrasantes estudiadas (suelos finos), nos permite aplicar las ecuaciones de correlación de manera directa y rápida, durante un estudio o una ejecución de obra vial.

Las ecuaciones son:

Ecuación 1:

$$\text{CBR1} = 15,0737 - 4,84477 * (\text{CBRis}) + 0,569474 * (\text{CBRis})^2$$

Ecuación 2:

$$\text{CBR2} = 7,26997 - 2,0049 * (\text{CBRis}) + 0,313059 * (\text{CBRis})^2$$

Por lo tanto, si en obra, se hace uso del equipo CBR In Situ, obtenemos un resultado (CBRis), dicho resultado se lo introduce a las ecuaciones 1 y 2, y determinamos de manera fácil y directa el valor de CBR de laboratorio al 100% o al 95%, respectivamente. Con este resultado se puede clasificar un suelo de subrasante (ver tablas 2,7 y 2,8) y diseñar el paquete estructural de un pavimento.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- De acuerdo a lo planteado al inicio del proyecto, se investigó toda la literatura referente a la metodología sobre la toma de los datos y el equipo utilizado para medición del Índice de Soporte de California (CBR) “in situ”, como así también para el CBR Convencional.
- Se realizó el ensayo de CBR convencional tomando muestras de los sitios de ensayo para poder realizar la comparación con CBR in situ en las subrasantes de los barrios de La Cañada – Monte Sud, Luis Espinal – Monte Cristo, San Antonio – Medinacelli y Nueva Terminal – Pampa Galana.
- El ajuste de los ensayos realizados (CBR Convencional y CBR In Situ) a una curva se encontró que el modelo polinómico de segundo grado es el que mejor se ajusta a la nube de puntos graficados, de acuerdo a las variables, en eje Y se encuentran las variables dependientes (CBR al 100% y CBR al 95%) y en el eje X se encuentra la variable independiente (CBR In Situ).
- Se aplicó la metodología estadística con el programa STATGRAPHICS para el análisis descriptivo de datos cuantitativos, para llevar a cabo una correcta comparación y correlación de resultados entre el CBR In Situ y los CBR Convencional al 100% y 95%.
- Se comprueba la correlación que existe entre el CBR In Situ y los CBR Convencional al 100% y 95%, con resultados de correlación de 0,9602 y 0,9129 respectivamente, por lo tanto, existe una correlación muy buena por encontrarse en el rango de 0,9 - 1. Es decir que los valores que proporciona el CBR In Situ van acorde a los ensayos estandarizados en laboratorio.
- Con la aplicación de esta metodología se abre una enorme brecha para futuras investigaciones que permita abarcar todas las clasificaciones de suelos, para establecer curvas de ajuste tipo y ponerlas a disposición de la población en general. Estas curvas tipo se usarían como ajuste para trasladar los resultados obtenido del ensayo de CBR

In Situ al necesario, que es el CBR al 95% en la mayoría de los casos y el 100% en el restante, según la necesidad.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda hacer uso de las ecuaciones de correlación a los siguientes tipos de suelos involucrados, como ser según la clasificación AASHTO: A-2-5, A-2-6, A-4, A-5, A-6 y A-7-5. Pero cabe mencionar que posiblemente exista algún tipo de variación con los resultados si se aplicaría a otras subrasantes, fuera de los que conforman este proyecto, ya que para establecer un parámetro mucho más válido se tendría que hacer una investigación monumental, es decir, mucho más grande. Y que a partir de ella haya más confianza en su aplicación.
- Realizar una buena recolección de información para que el tema de investigación se encuentre sustentado.
- Asegurarse de realizar la toma de muestras de suelos, verificando y cumpliendo las especificaciones según la metodología correspondiente.
- Usar la protección necesaria para realizar los trabajos durante el proceso de ejecución de los ensayos para evitar cualquier lesión.
- Para obtener buenos resultados en cualquier investigación es necesario la correcta y minuciosa ejecución de todos los ensayos necesarios. Y aun así se tendrán errores, es decir que se minimizaran los errores con una buena ejecución durante los ensayos.