

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los áridos degradables son materiales derivados de la fragmentación de rocas sedimentarias que se descomponen por medio de un determinado agente que puede ser la degradabilidad (meteorabilidad) de los agregados como por ejemplo el agua.

Las características que tienen son: suelos heterogéneos, tienen asentamiento, no sufren de transporte (suelo no compacto), son permeables. Son suelos que se forman en el sitio por procesos de meteorización física y química, es un suelo derivado de la meteorización y descomposición de la roca in situ, el cual no ha sido transportado de su localización original.

Son conocidos también como suelos residuales porque no cumplen con todos los requerimientos normales de la especificación y que son rechazados. Sin embargo, el empleo aceptable de áridos degradables depende de un buen juicio técnico y la evaluación de la calidad.

Este tipo de material fue estudiado para la estabilización en taludes, terraplenes y en estudio de combinación de árido degradable para las bases por lo cual en la actualidad se busca analizar el efecto de este tipo de material en suelo subrasante.

Se tomó como referencia el proyecto de Marco Antonio Torrez T. (Tarija – 2008), quien realizó una “Influencia de la utilización de áridos degradables tipo maicillo en el comportamiento de las bases para pavimentos flexibles”. Este trabajo se analizó materiales granulares normalmente utilizados al mezclar con un porcentaje de material con maicillo.

Lo que el autor propone es analizar el comportamiento del árido degradable en una subrasante que cumpla todas las especificaciones de un suelo óptimo en tres diferentes porcentajes, aplicando CBR en ciclos continuos de saturación y secado para conocer cómo afecta el árido degradable al suelo subrasante.

1.2. Situación problemática

En la actualidad una carretera debe ser diseñada de tal manera que soporte las cargas impuestas por el tránsito y no se generen deformaciones. Los métodos de diseño de pavimentos suponen que la mayor parte de la acumulación de la deformación permanente ocurre en la subrasante. El suelo estudiado fue del tramo Iscayachi-Copacabana, siendo un árido degradable.

Es ahí, que el presente proyecto analizó en diferentes ensayos de laboratorio al árido degradable en presencia de un suelo subrasante natural para conocer el comportamiento de este tipo de árido, de cuánto puede afectar a otro tipo de suelo después de ser expuestos a tres ciclos continuos de saturación y secado en 10%, 20% y 30% de suelo combinado.

La ineficacia de ciertos materiales utilizados como subrasante en la estructura de un pavimento ocasiona que las carreteras carezcan de resistencia, estabilidad y durabilidad.

El hacer un estudio previo del tipo de suelo donde construiremos, arroja información sobre las características de éste, que a su vez ayudará a conocer la estabilidad del suelo y su comportamiento funcional que determina el desempeño del material, situado dentro de las profundidades de influencia de los esfuerzos que se generan.

1.2.1. Problema

¿Cuál es el comportamiento del CBR en subrasante combinado con árido degradable, según los ciclos de saturación y desecación?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

En la actualidad cuando se diseña un pavimento ya sea rígido o flexible se encuentran zonas donde existe áridos degradables; por tanto, se ha demostrado que este tipo de árido no es recomendable para dichos pavimentos, entonces se buscó conocer cuánto afecta el árido degradable en presencia de un suelo natural subrasante.

Para el problema se extrajo el árido degradable (material extraído del tramo Iscayachi-Copacabana) con el fin de analizar su comportamiento mediante la aplicación del CBR con un suelo natural de subrasante sometido a ciclos continuos de saturación y de secado.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

El presente trabajo de investigación se realizó en un tiempo de 24 semanas, en el cual se estudió el árido degradable y el suelo natural de subrasante, para su análisis de contenido de humedad, granulometría, clasificación AASHTO, como también la determinación de la densidad máxima y humedad óptima mediante el ensayo de compactación (próctor modificado T-180) y los ensayos de CBR.

Se usó el laboratorio de suelos y equipos disponibles de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho del departamento de Tarija.

1.3. Justificación

El diseño y construcción de pavimentos presentan problemas debido al mal desarrollo constructivo o al incumplimiento de las especificaciones técnicas.

En la actualidad se presentan problemas al momento de construir un pavimento ya sea rígido o flexible, porque existen suelos no aptos para la construcción que no cumplen con las normas a las que se deben regir teniendo como resultado el deterioro por la mala calidad, a un costo mayor al que fue diseñado.

Dentro de estos materiales se encuentra el árido degradable que es un suelo residual que se descompone por medio de un determinado agente que puede ser la degradabilidad (meteorabilidad) de los agregados; observando este problema se realizó un análisis a este tipo de suelo en combinación con un suelo subrasante para saber cuánto afecta el árido degradable al suelo natural.

El fin con que se realizó esta investigación, es de dotar una información confiable en el estudio del comportamiento del árido degradable con un suelo natural de subrasante en ciclos continuos de saturación y secado que mediante ensayos de laboratorio se observó cómo varía la resistencia antes y después de los cambios de humedad; de esta manera se justifica que el análisis puede arrojar información útil sobre el comportamiento del árido degradable con el suelo subrasante.

El aporte teórico es de una investigación que propone adicionar el árido degradable en las bases para los pavimentos flexibles, y artículos que indican el procedimiento a seguir los ensayos y pruebas de laboratorio de CBR en ciclos de saturación y secado.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento que tiene el CBR en una subrasante combinado con árido degradable, mediante ciclos continuos de saturación y secado con la finalidad de determinar cuánto afecta este tipo de árido.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar la información bibliográfica del árido degradable.
- Realizar ensayos de las características del árido degradable y el suelo subrasante.
- Realizar ensayos de CBR de acuerdo al ciclo de saturación y secado.
- Realizar la confiabilidad estadística de la combinación del árido degradable con suelo natural subrasante.

1.5. Hipótesis

Los ciclos continuos de saturación y secado desmejora los valores de CBR cuando la subrasante se combina con árido degradable.

1.6. Operacionalización de las variables

1.6.1. Variable independiente

Tabla 1. Variable independiente

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Tiempo / ciclos	Eficiencia	Días/N° de Veces	Los CBR estarán sometidos al tiempo de saturación y secado

Fuente: Elaboración propia

1.6.2. Variable dependiente

Tabla 2. Variable dependiente

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Valores del CBR	Compactación	g/cm ³	Densidad máxima Curva de compactación
		Porcentaje (%)	Contenido de humedad óptimo Curva de compactación
	Curado	Tiempo (t)	Sumergir en agua en tiempos diferentes
	Expansión	Tiempo (t)	Por día de saturación
		Porcentaje (%)	Medición del hinchamiento
	Resistencia	Penetración (Pulg)	Usando prensa del CBR
		Porcentaje (%)	Dividiendo resistencia del suelo con la resistencia patrón

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de investigación y alcance

El siguiente trabajo corresponde a una investigación de diseño experimental del tipo cuasi experimental, porque manipula una variable independiente que busca establecer una relación en la resistencia.

En los resultados obtenidos en la investigación, se observó qué pasó en los CBR aplicando ciclos continuos de saturación y secado en la subrasante con árido degradable.

El alcance de esta investigación es determinar el comportamiento del CBR con árido degradable y un suelo natural de subrasante, en diferentes porcentajes de árido degradable de 10%, 20% y 30% en tres ciclos de saturación y secado, siendo 4 días de saturación y luego el secado; así se repite por cada ciclo con el fin de observar cómo evolucionan sus propiedades.

Se realizó la caracterización respectiva de cada suelo bajo la norma AASTHO.

Con los resultados obtenidos del suelo subrasante con el árido degradable se procedió a analizar el comportamiento de cuánto afecta el árido degradable a un suelo natural según los ciclos de saturación y secado.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LA CAPACIDAD PORTANTE (CBR) Y EL ÁRIDO DEGRADABLE

2.1. Definición de Suelos

En la ingeniería se considera que suelo es un agregado natural de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación en agua.

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas, siendo física, química y biológica como factores influyentes. (Anali C. Escandón Munguía, 2015)

Figura 1. Suelo

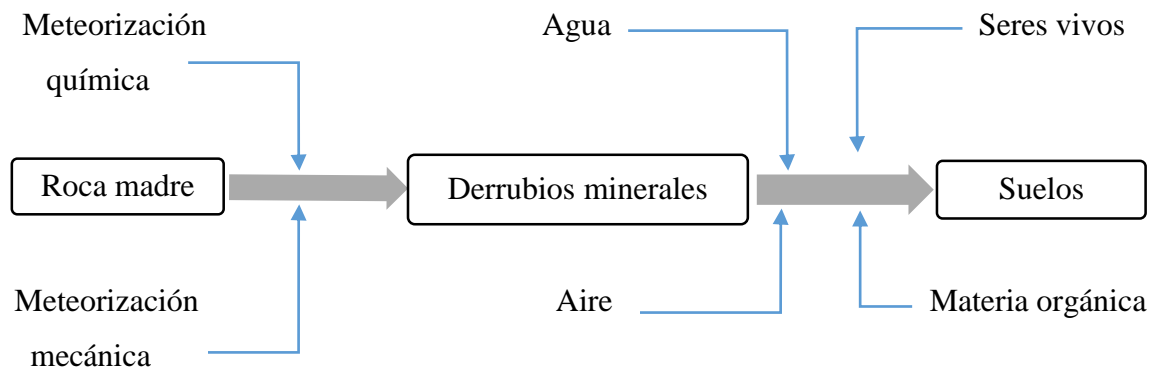


Fuente: Anali C. Escandón Munguía, 2015

2.1.1. Formación de suelos

Los suelos se forman a partir de la alteración de la roca. Esta inicia con la alteración mecánica cuando la tectónica induce esfuerzos que deforma y fracciona la roca, la descarga por erosión disminuye las presiones, permite el relajamiento y la ampliación de las discontinuidades a través de los planos estructurales de ésta. La roca fracturada y relajada es más permeable, permite la circulación de flujos y obra la meteorización capaz de transformar los minerales de la roca que están en contacto con el agua. (Palomares, 2016)

Figura 2. Formación de suelos



Fuente: (Palomares, 2016)

2.1.2. Depósitos de suelo en general

Los productos de la meteorización pueden permanecer en el mismo lugar o pueden ser movidos a otros lugares por el hielo, el agua, el viento y la gravedad.

Los suelos formados por los productos en su lugar de origen son llamados suelos residuales.

Los suelos de grano fino se encuentran en la superficie y el tamaño de grano aumenta con la profundidad.

A mayores profundidades, también se pueden encontrar fragmentos de rocas angulares.

Los suelos transportados se pueden clasificar en varios grupos, dependiendo de su modo de transporte y deposición; los principales son:

Suelos glaciales: formados por el transporte y la deposición de los glaciares

Figura 3. Suelos glaciales



Fuente: (Luis Ayala, sf)

Suelos aluviales: transportados por corrientes de agua y depositados a lo largo de los arroyos.

Figura 4. Suelos aluviales



Fuente: (Luis Ayala, sf)

Suelos eólicos: transportados y depositados por el viento.

Figura 5. Suelos eólicos



Fuente: (Luis Ayala, sf)

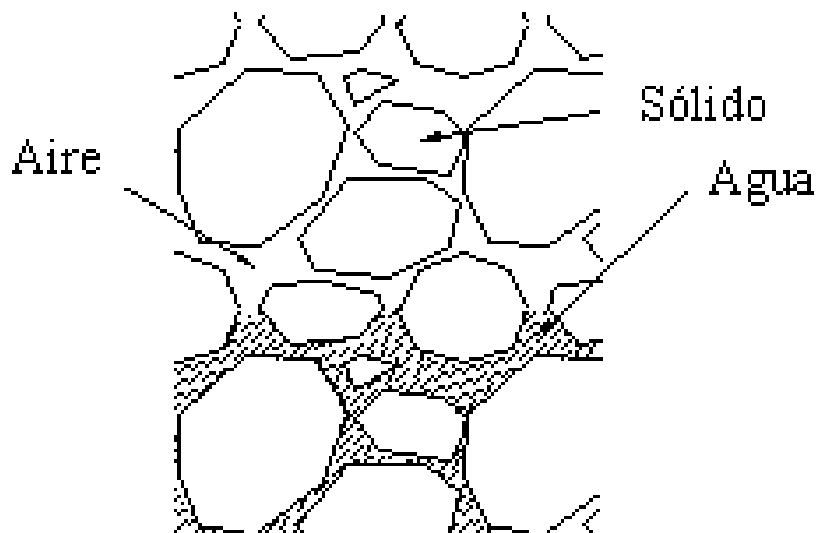
En adición a los suelos transportados y residuales, las turbas se derivan de la descomposición de materiales orgánicos encontrados en áreas de poca altura donde el nivel freático está cerca o arriba de la superficie del terreno. La presencia de un nivel alto del agua freática ayuda o soporta el crecimiento de plantas acuáticas que, al descomponerse, forman turba. Este tipo de depósito se encuentra comúnmente en áreas costeras y regiones glaciares. Cuando un porcentaje relativamente grande de turba se mezcla con suelo inorgánico, se le denomina suelo orgánico. Estos suelos orgánicos tienen la característica de un contenido natural de agua de entre 200% y 300%, son altamente compresibles. Las pruebas de laboratorio muestran que, bajo carga, se obtiene un gran asentamiento debido a la consolidación secundaria de los suelos orgánicos.

Durante la planificación, diseño y construcción de cimentaciones, terraplenes y estructuras de retención, los ingenieros deben conocer el origen de los depósitos de los suelos sobre los que se construirán las cimentaciones debido a que cada depósito de suelo tiene atributos físicos propios y únicos.(Das, 2001)

2.1.3. Composición de los suelos

Un suelo está compuesto por materia sólida, líquida y gaseosa, a cada uno de estos componentes principales se denomina fase del suelo. El comportamiento del suelo depende de la cantidad relativa de cada una de estas tres fases, ya que estas interactúan entre sí.(Eddy Herbas, 2010)

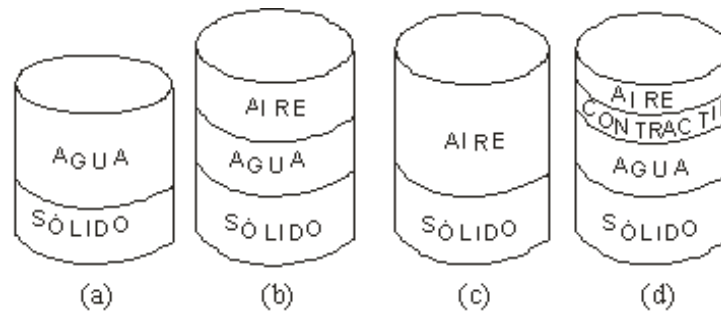
Figura 6. Composición del suelo



Fuente: (Eddy Herbas, 2010)

La fase sólida está compuesta de partículas diminutas derivadas de la roca o sedimento producto de la meteorización o incluso materia orgánica. La fase líquida, corresponde al agua que se ubica en los espacios vacíos entre partículas. La fase gaseosa corresponde al aire, los espacios vacíos, los restantes que no ocupa el agua, son ocupados por el aire.

Figura 7. Estados del suelo



(a) Saturado. (b) No saturado. (c) Seco. (d) No saturado contráctil.

Fuente: (Eddy Herbas, 2010)

La fase líquida del suelo varía en su cantidad con respecto a las otras fases, lo que da lugar a distintos estados del suelo. En la figura 7 se ha esquematizado los distintos estados que presenta el suelo de acuerdo a la variación de la fase líquida. De acuerdo a esta variación de la fase líquida (agua) del suelo, éste puede ser clasificado en tres diferentes estados que son:

Suelo saturado: La figura 7 (a) corresponde al estado del suelo saturado. Este estado del suelo contiene únicamente dos fases: la fase sólida y líquida. Se lo llama saturado, porque todos los espacios vacíos están llenos de agua.

Suelo no saturado: El estado de suelo de la figura 7 (b), corresponde al suelo no saturado, llamado también húmedo. Posee: la fase sólida, líquida y gaseosa simultáneamente. Los vacíos están ocupados por aire y agua.

Suelo seco: Este estado de suelo mostrado en la figura 7 (c), incluye solo dos fases: la fase sólida y la gaseosa, es decir que el suelo no contiene agua.

Suelo no saturado contráctil: El estado de suelo de la figura 7 (d) incluye las tres fases de suelo, además de una cuarta fase denominada contráctil. Esta cuarta fase es independiente y llega a originarse como resultado de la interfase aire-agua, su problema predominante es su expansión y contracción, por lo que su estudio entra en otra categoría de la mecánica de suelos.(Eddy Herbas, 2010)

2.1.4. Clases de suelo

Existen diversos tipos de suelo, cada uno fruto de procesos distintos de formación:

Suelos arenosos: No retienen el agua, tienen muy poca materia orgánica.

Figura 8. Suelos arenosos



Fuente: (Eddy Herbas, 2010)

Suelos limosos: Son de granos finos con poca o ninguna plasticidad.

Figura 9. Suelos limosos



Fuente: (Eddy Herbas, 2010)

Suelos arcillosos: Están formados por granos finos de color amarillento o rojizo y retienen el agua formando charcos.

Figura 10. Suelo arcilloso



Fuente: (Eddy Herbas, 2010)

Suelos pedregosos: Formados por rocas de todos los tamaños y no retienen el agua.

Figura 11. Grava



Fuente: (Eddy Herbas, 2010)

Suelos mixtos: Tienen características intermedias entre los suelos arenosos y los suelos arcillosos mezclados.(Eddy Herbas, 2010)

2.1.5. Tamaño de las partículas de suelos

Tabla 3. Tamaño de suelo

Gravas [> 2 mm]	Arenas [entre 0.06 y 2 mm]	Limos [entre 0.002 y 0.06 mm]	Arcillas [< 0.002 mm]
<p>Los granos no se apelmazan aunque estén húmedos, debido a las pequeñas tensiones capilares. Cuando el gradiente hidráulico es mayor de 1, se produce en ellas flujo turbulento.</p>	<p>Los granos se apelmazan si están húmedos, no se suele producir en ellas flujo turbulento.</p> <p>Partículas visibles, en general no plásticas.</p> <p>Terrenos secos tienen una ligera cohesión, se reducen a polvo fácilmente entre los dedos.</p> <p>Fácilmente erosionadas por el viento.</p> <p>Los asentamientos finalizan al acabarse la construcción.</p>	<p>Partículas invisibles y algo plásticas.</p> <p>Los terrones secos tienen cohesión apreciable pero se reducen a polvo con los dedos.</p> <p>Difícilmente erosionados por el viento.</p> <p>Los asentamientos suelen continuar después de acabada la Construcción.</p> <p>Mayores a 0.002 mm se hace cada vez mayor proporción de minerales no arcillosos.</p> <p>Tacto áspero. Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos.</p> <p>Los terrones secos tienen cohesión apreciable, pero se reducen a polvo con los dedos.</p>	<p>Tienen propiedades coloidales.</p> <p>Consisten en su mayor parte de minerales arcillosos.</p> <p>Tacto suave. Se secan lentamente y se pegan a los dedos.</p> <p>Los terrones secos se pueden partir, pero no se pueden reducir a polvo con los dedos.</p>

Fuente: (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

2.1.6. Estudios de los suelos

Son estudios que permiten identificar y conocer las características mecánicas y físicas del suelo, y definir los elementos por el cual está compuesto este material en la profundidad de las capas, de tal forma como es el tipo de cimentación más favorable y las deformaciones que va a sufrir la estructura por causa de los pesos establecidos.

Entre los estudios de suelos más frecuentes para el conocimiento de las características del material tenemos los siguientes: (Administradora boliviana de carreteras, 2000)

Contenido de humedad

Granulometría

Límites de Atterberg

Compactación T-180

CBR (Valor Soporte California)

2.1.6.1. Contenido de humedad natural

El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material.

La determinación del contenido de agua en un suelo es de vital importancia en el momento de tratar propiedades del mismo como la cohesión, consistencia, cambios de volumen y estabilidad mecánica.

Para muchos tipos de suelo, el contenido de agua es una de las propiedades índices más significativas, que se emplea para establecer una correlación entre el comportamiento de dicho suelo y otras propiedades índices.

El contenido de agua de un suelo se usa en casi todas las ecuaciones que expresan las relaciones de fase entre aire, agua y sólidos, en un volumen dado de material. (Administradora boliviana de carreteras, 2000)

2.1.6.2. 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. Aprenderemos a utilizarla como un instrumento en la clasificación de los materiales, ya que la descripción por tamaño tiene especial interés en la selección de materiales para rellenos de carreteras y presas, los cuales requieren materiales con graduaciones determinadas.

El tamaño de un grano, clasto o partícula, no siempre es fácil de determinar cuando son irregulares, se suele definir como el diámetro de una esfera de su mismo volumen, y se expresa en milímetros. En los cantos de mayor tamaño se suele hacer la media de las tres medidas ortogonales máximas, aunque no se corten en el mismo punto.

Para su realización se utiliza una serie de tamices con diferentes diámetros que son ensamblados en una columna. En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material original (suelo o sedimento mezclado) y la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos en una máquina especial. Luego de algunos minutos, se retiran los tamices y se desensamblan, tomando por separado los pesos de material retenido en cada uno de ellos y que, en su suma, deben corresponder al peso total del material que inicialmente se colocó en la columna de tamices. («Granulometría De Suelos [Ing. Nestor Luis Sánchez]»)

2.1.6.3. Límites de Atterberg

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir cuatro estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco, va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico y, finalmente, líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Límite líquido

El límite Líquido, es la humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Límite plástico

Humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1 cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

2.1.6.4. Compactación

El proceso de compactación en los suelos produce un mejoramiento considerable en sus propiedades ingenieriles, en el aumento de su resistencia al corte, la disminución en su deformabilidad, un aumento en su peso específico seco y mejoramiento de su condición de permeabilidad. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Este método de ensayo tiene como propósito obtener datos por medio de los cuales se puedan determinar las siguientes constantes de los suelos:

- Contenido de humedad óptima.
- Peso unitario seco máximo.
- Gráfico contenido de humedad vs peso unitario.

Es comprobado que el suelo se compacta a la medida en que aumenta su humedad, la densidad seca va aumentando hasta llegar a un punto de máximo, cuya humedad es la óptima. A partir de este punto, cualquier aumento de humedad no supone mayor densidad seca a no ser, por lo contrario, una reducción de ésta. Los análisis son realizados en

laboratorio por medio de probetas de compactación a las cuales se agrega agua. En poder de estos parámetros, humedad/densidad seca (humedad en %), se colocan los valores conseguidos en un gráfico cartesiano donde la abscisa corresponde a la humedad y la ordenada a la densidad seca. Es así posible diseñar una curva suave y conseguir el punto donde se produce un máximo al cual corresponda la densidad seca máxima y la humedad óptima.(Próctor Modificado (Aashto T 180), s. f.)

2.1.6.5. CBR

2.1.6.5.1. Origen

Este método 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 en la construcción de carreteras. (Chang, s. f.)

2.1.6.5.2. Definición

CBR (California Bearing Ratio), Relación de Soporte de California.

La finalidad de este ensayo, es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Es un método desarrollado por la división de carreteras del Estado de California (EE.UU.) y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, subbase y base de pavimentos.

El ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un (%) de la relación de soporte. El (%) CBR, está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre a una profundidad determinada, expresada en porcentaje de fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y con igual velocidad, en una probeta normalizada constituida por una muestra patrón de material chancado.(Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

La expresión que define al CBR, es la siguiente:

$$\text{CBR} = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} * 100$$

Donde:

Carga unitaria de ensayo en kg/cm².

Carga unitaria patrón en kg/cm².

De la ecuación se puede ver que el número CBR, es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica el símbolo de (%) se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero.

El C.B.R. que se usa para diseño, 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 por la penetración de 0.1" da mayor C.B.R.

2.1.6.5.3. Tipos de CBR

El método CBR comprende los 3 ensayos siguientes:

Determinación de la densidad y humedad.

Determinación de las propiedades expansivas del material.

Determinación de la resistencia a la penetración.

El comportamiento de los suelos varía de acuerdo a su grado de alteración (inalterado y alterado) y a su granulometría y características físicas (granulares, finos, poco plásticos).

El método a seguir para determinar el CBR será diferente en cada caso.

Determinación del CBR de suelos remoldados

Determinación del CBR de suelos inalterados.

Determinación del CBR in situ.

2.1.6.5.4. CBR de laboratorio

Figura 12. CBR laboratorio



Fuente: (Bowles, 1982)

CBR de laboratorio suelo remoldados

Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). El ensayo se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables.

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Tabla 4. Clasificación de suelos según CBR

Sistema de clasificación				
CBR	Clasificación General	Usos	Unificado	AASTHO
0 - 3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A-5, A-6, A-7
3 - 7	Muy pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A-4, A-5, A-6, A-7
7 - 20	Regular	Subbase	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A-2, A-4, A-6, A-7
20 - 50	Bueno	Subbase y base	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A-1-b, A-2-5, A-3, A-2-6
>50	Excelente	Base	GW, GM	A-1-a, A-2-4, A-3

Fuente: Manual de laboratorio de suelos (Bowles, 1982)

CBR para suelos remoldeados

Mediante este método, se determina el CBR de un suelo cohesivo en estado natural. Se diferencia del anterior solo 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. (Bowles, 1982)

2.1.6.5.5. CBR In situ

Figura 13. CBR In situ



Fuente: (Bowles, 1982)

Este método 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 de un material estándar de referencia.

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. (Administradora Boliviana de Carreteras, 2000)

Por lo general se elige un lugar donde no haya piedras mayores a $\frac{3}{4}$ ", 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.

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". (Bowles, 1982)

2.2. Clasificación del suelo

Los suelos con propiedades similares pueden ser clasificados en grupos y subgrupos en función de las características mecánicas y su comportamiento para la ingeniería. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada.

En la actualidad, dos elaborados sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata del American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. El sistema AASHTO es utilizado principalmente por los departamentos de carreteras estatales y del condado, mientras que los ingenieros geotécnicos normalmente prefieren utilizar el Sistema Unificado.(Das, 2001)

2.2.1. Sistema AASHTO

El sistema de la AASHTO (AASHTO M 145-82) fue originalmente desarrollado en la década del 20. Está basado en características de estabilidad de los suelos empleados en la construcción de caminos.

Se fundamenta en distribución granulométrica, límite líquido y límite plástico. Los tamices estándar N°10, N°40 y N°200 (aberturas de 2 mm, 0.42 mm y 0.075 mm respectivamente) son de vital importancia.

De acuerdo con este sistema y con base en su comportamiento, los suelos están clasificados en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8.

En este sistema de clasificación los suelos inorgánicos se clasifican en siete grupos que van del A-1 al A-7. Estos a su vez se dividen en un total de doce subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8.

Suelos granulares

Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz N° 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 y A-3.

Grupo A-1

El material de este grupo comprende las mezclas bien graduadas, compuestas de fragmentos de piedras, grava, arena y material ligante poco plástico. Se incluyen también en este grupo mezclas bien graduadas que no tienen material ligante.

Subgrupo A-1a: Comprende aquellos materiales formados predominantemente por piedra o grava, con o sin material ligante, estos materiales son bien graduados.

Subgrupo A-1b: Incluye aquellos materiales formados predominantemente por arena gruesa bien graduada, con o sin ligante.

Grupo A-2

Comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material fino.

Subgrupo A-2-4 y A-2-5: Pertenecen a estos subgrupos aquellos materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiz N° 40 tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5 respectivamente.

Subgrupo A-2-6 y A-2-7: Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz N° 40 tiene las mismas características de los suelos A-6 y A-7.

Grupo A-3

En este grupo se encuentra incluidas las arenas finas, de playa y aquellas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye además, las arenas de río que contengan poca grava y arena gruesa.

Suelos finos

Contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz N° 200. Estos suelos constituyen los grupos A- 4, A-5, A-6, y A-7.

Grupo A-4

Pertencen a este grupo los suelos limosos poco o nada plásticos que tienen un 75% o más del material fino que pasa el N° 200. Además se incluye en este grupo las mezclas de limo con grava y arena hasta en un 64%.

Grupo A-5

Los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tiene un límite líquido elevado.

Grupo A-6

El material típico de este grupo es la arcilla plástica. Por lo menos el 75% de estos suelos debe pasar el tamiz N° 200, pero se incluyen también las mezclas arcillo-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%. Estos materiales presentan, generalmente, grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

Grupo A-7

Los suelos de este grupo son semejantes a los suelos A-6 pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados.

Subgrupo A-7-5: Incluye aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

Subgrupos A-7-6: Comprende aquellos suelos cuyos índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además experimentan cambios de volumen extremadamente grandes.

Índice de grupo

Aquellos suelos que tienen un comportamiento similar se hallan dentro de un mismo grupo, y están representados por un determinado índice. La clasificación de un suelo en un determinado grupo se basa en su límite líquido, grado de plasticidad y porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200. Los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4; los correspondientes a los suelos limosos entre 8 y 12 y los de los suelos arcillosos entre 11 y 20 o más.

Tabla 5. Clasificación de materiales para subrasante de carreteras según AASHTO

Clasificación de suelos AASHTO											
Clasificación general	Materiales granulares							Materiales limo-arcillosos			
	35% o menos pasa el tamiz N° 200							Más del 35% pasa el tamiz N° 200			
Grupos y subgrupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Análisis granulométrico % que pasa el tamiz											
N° 10 (2.00 mm)	50 máx.										
N° 40 (0.42 mm)	30 máx.	50 máx.	51 min.								
N° 200 (0.074 m)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35máx	35máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Caract. Del material que pasa el tamiz N° 40											
Límite líquido (LL)	-		-	40 máx.	41 min.	40máx	41 min	40máx.	41 min.	40máx.	41 min.
Índice plasticidad (IP)	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11min.	11 min.	10máx.	10máx.	11 min.	11 min.
Índice de grupo (IG)	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12máx.	16máx.	20máx.
Tipos de material	Frag. de piedra grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas - arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Terreno de fundación	Excelente a bueno							Regular a malo			
Tasa general de los sobrantes	De mediano a pobre										

Para A-7-, PL < LL -30

Para A-7-6, PL > 30

Fuente: (Das, 2001)

2.2.2. Sistema Unificación de clasificación de suelos (S.U.C.S).

El sistema unificado de clasificación de suelos deriva de un sistema desarrollado por Arthur Casagrande para agrupar e identificar en forma más rápida en obras militares durante la guerra.

Este sistema divide a los suelos en dos grandes grupos, uno de granos gruesos y otro de granos finos.

Este sistema fue propuesto por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos.

Esta clasificación divide los suelos en:

Suelos de grano grueso.

Suelos de grano fino.

Suelos orgánicos.

Los suelos de grano grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz N° 200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y los suelos de partículas finas a los que lo pasan, y así un suelo es considerado grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz N° 200, y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz.

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos. (José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

Tabla 6. Tabla de clasificación según SUCS

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

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

Fuente:(José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

2.3. Suelo Subrasante

Figura 14. Suelo subrasante



Fuente: (José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

2.3.1. Definición

Es una parte esencial en el diseño de pavimentos. Tiene la particularidad de otorgar la respuesta estructural y el comportamiento del pavimento en construcción y operación.

La subrasante puede estar constituida por suelos en su estado natural, o por éstos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica, la estabilización físico – química con aditivos como el cemento Portland, la cal, el asfalto, entre otras.

Es la fundación sobre el cual el pavimento será construido.

Figura 15 Estructura de un pavimento

Sección Transversal:



Fuente: (José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

La subrasante es la capa superficial de terreno natural. Para construcción de carreteras se analizará hasta 0.45 m de espesor, y para rehabilitación los últimos 0.20 m. (José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

2.3.2. Categoría de la subrasante

Tabla 7. Categoría de subrasante

Categoría de subrasante	CBR
Subrasante muy pobre	< 3 %
Subrasante pobre	3% - 5%
Subrasante regular	6% - 10%
Subrasante buena	11% -19%
Subrasante muy buena	> 20%

Fuente: (José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor, se procederá a eliminar esa capa de material inadecuado y se colocará un material granular con CBR mayor a 6%; para su estabilización.(José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

2.3.3. Funciones de la subrasante

Las principales funciones de la capa subrasante son:

Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son permitidas por el pavimento.

Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

Estas dos funciones son estructurales y comunes a todas las capas de las secciones transversales de un pavimento.

Entre las cualidades de una subrasante, que generalmente son deseables por los ingenieros de vías, se tienen las siguientes:

Una alta resistencia.

Permanencia de la resistencia por lo menos durante la vida útil del pavimento.

Una buena uniformidad en todas las direcciones.

Una alta densidad.

Poco susceptibles a los cambios volumétricos.

Poco susceptibles a la acción del agua.

Buena trabajabilidad durante el proceso de compactación.

Permanencia de las propiedades inducidas mediante la compactación.

La parte superior de la capa subrasante coincide con la línea subrasante del proyecto geométrico la cual debe cumplir con las especificaciones de pendiente longitudinal para la obra. Esta línea marca la altura de las terracerías y por tanto su espesor, que la mayor de las veces es mayor que el necesario en la estructura.

En los procedimientos de construcción, los materiales se deben compactar con el equipo más adecuado, de acuerdo con sus características. Cuando los materiales encontrados en las zonas cercanas a la obra no cumplen con las características marcadas en las normas, se requiere estabilizarlos mecánica y químicamente. (José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

2.3.4. Propiedades de la subrasante

2.3.4.1. Propiedades físicas

Son propiedades relacionadas con el tipo de material a utilizar y las características constructivas de los mismos.

Granulometría (propiedades iniciales de los suelos).

Clasificación de los suelos.

Relación humedad- densidad.

2.3.4.2. Propiedades ingenieriles

Dan una estimación de la calidad de los materiales para los pavimentos.

Módulo resiliente

Debido al paso de los vehículos por la superficie de rodamiento de un pavimento, ésta empieza a distribuir los esfuerzos hacia las capas inferiores, las cuales, por esta razón se ven sujetas a esfuerzos cíclicos de compresión y luego de tensión los cuales van provocando deformaciones en toda la estructura del pavimento. La curva esfuerzo-deformación obtenida en un espécimen de material de los que constituyen generalmente un pavimento.

Módulo de Poisson

El coeficiente de Poisson es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

Valor de soporte del suelo

Llamado también capacidad portante del suelo

Módulo de reacción de la subrasante

Con el fin de estimar adecuadamente los esfuerzos máximos a que estarán sometidos elementos estructurales en contacto continuo con materiales térreos, tales como pavimentos, cimientos, traviesas de ferrocarril, etc. Se requiere conocer la deformabilidad de la estructura térrea, ante la acción de las cargas impuestas.

El concepto fue introducido por Winkler, y posteriormente desarrollado, discutido y usado por la profesión. Dado que, como se demostrará posteriormente, este parámetro no es una propiedad intrínseca del suelo, hay múltiples modelos para su evaluación y no es posible determinarlo con ensayos normalizados. (José Rafael Menéndez Acurio, 2015)

2.4. Árido degradable

Figura 16. Árido degradable



Fuente: (Jaime Suarez, s. f.)

2.4.1. Definición

Los áridos degradables son los materiales granulares derivados de la fragmentación de rocas sedimentarias que se descompone por medio de un determinado agente que puede ser la degradabilidad (meteorabilidad) de los agregados, es un material que con presencia de la humedad se empieza a deshacer.

Son conocidos también como agregados residuales porque no cumplen con todos los requerimientos normales de la especificación y que usualmente serían rechazados. Sin embargo, el empleo aceptable de áridos degradables depende de un buen juicio técnico y la evaluación de la calidad. (Jaime Suarez, s. f.)

2.4.2. Origen

Los áridos degradables son los que se forman en el sitio por procesos de meteorización física y química y se desarrollan principalmente, en condiciones tropicales húmedas, de meteorización química intensa (Reading, 1999).

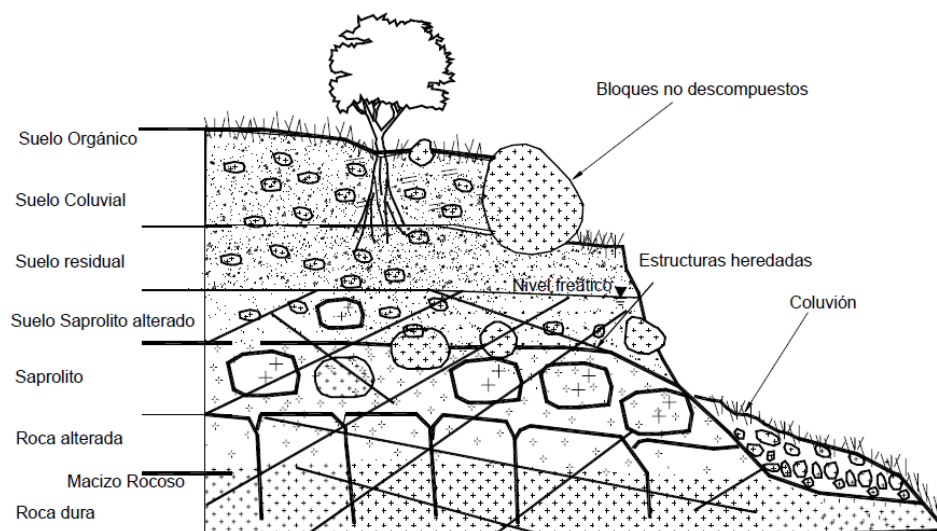
La mayoría de deslizamientos de suelos residuales son los deslizamientos poco profundos y rápidos del suelo residual sobre el saprolito (Roca algo meteorizada) o la roca, pero cuando los perfiles de meteorización del suelo residual son muy profundos, se pueden presentar también deslizamientos rotacionales.

La meteorización o la falta de litificación traen como resultado, un material con discontinuidades o superficies de debilidad y con posibilidad de movimiento por desplazamiento, a lo largo de las discontinuidades y/o por rotura al cortante o a tensión a través de la matriz del material.

Las propiedades de los suelos residuales generalmente son controladas por la fábrica micro o macro, las juntas y demás detalles estructurales, los cuales eran parte integral de la masa de roca original y son heredados por el suelo.

La meteorización afecta principalmente las juntas y fracturas (Jaboyedoff y otros, 2004). (Jaime Suarez, s. f.)

Figura 17. Esquema general de una ladera en un suelo residual de granito



Fuente: Suelos residuales (Jaime Suarez, s. f.)

2.4.3. Características del árido degradable

La definición de árido degradable varía de un país a otro, pero una definición razonable podría ser la de un suelo derivado de la meteorización y descomposición de la roca in situ, el cual no ha sido transportado de su localización original.

Las características de los suelos residuales son muy diferentes a las de los suelos transportados. Por ejemplo, el concepto convencional de grano de suelo o tamaño de partícula es inaplicable a muchos suelos residuales, debido a que las partículas de suelo residual, con frecuencia, consisten en agregados ("clusters") o cristales de mineral meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente finos, si el suelo es manipulado. (Jaime Suarez, s. f.)

2.4.4. Proceso de meteorización

En ambientes tropicales dominados por temperaturas altas y cambiantes y por lluvias abundantes, la meteorización de los materiales es muy fuerte, caracterizándose por la descomposición rápida de feldspatos y minerales ferromagnesianos, la concentración de

óxidos de hierro y aluminio y la remoción de sílice y de las bases Na_2O , K_2O , CaO , y MgO (Gidigasú, 1972).

Los feldespatos se meteorizan inicialmente a caolinita, óxidos de hierro y óxidos de Aluminio y los compuestos más resistentes como las partículas de mica y cuarzo permanecen.

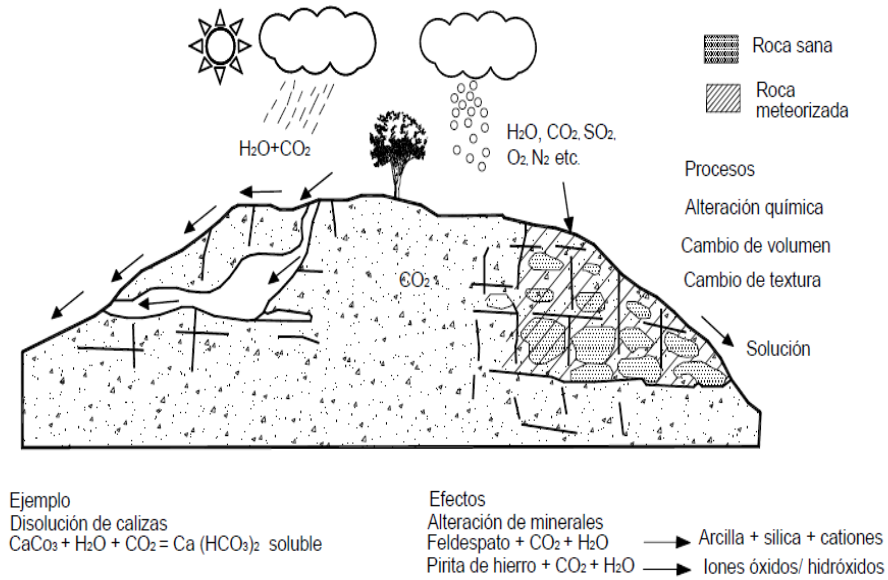
La meteorización de rocas y cenizas volcánicas conducen a la formación de esmectita, aloisita, óxidos de hierro y aluminio en las etapas iniciales de la meteorización y finalmente, se pueden formar caolinita, esmectita y gibsita (González y Jiménez, 1981). Algunas rocas que contienen sales (NaCl), Cal (CaSO_4) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se disuelven fácilmente en agua, especialmente en presencia de CO_2 , acelerando el proceso de meteorización.

A medida que el proceso de meteorización continúa, los contenidos de caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a Fe_2O_3 y Al_2O_3 . Existen investigaciones que demuestran la disminución de los contenidos de caolinita, con el incremento del promedio anual de lluvias (Lohnes y Demirel, 1973). Los procesos de meteorización física y química comúnmente actúan en forma conjunta, de tal forma, que el proceso químico ocurre especialmente en las fracturas abiertas por el proceso de meteorización física.

Igualmente, se pueden desarrollar fracturas en respuesta a los cambios volumétricos y la debilitación como resultado de la meteorización química. Aunque las propiedades de los materiales, producto de la meteorización, hacen que el material se comporte como un suelo, sus propiedades son diferentes a las de un suelo transportado de composición similar.

El comportamiento de un suelo residual está influido fuertemente por las estructuras heredadas y por la fábrica de la roca madre. La litología tiene una influencia determinante sobre la meteorización. La resistencia a la descomposición química varía de una roca a otra, siendo las cuarcitas las más resistentes, y dentro de las más conocidas por su descomposición rápida, se encuentran las calizas, las lutitas y los granitos. (Jaime Suarez, s. f.)

Figura 18. Proceso de meteorización química

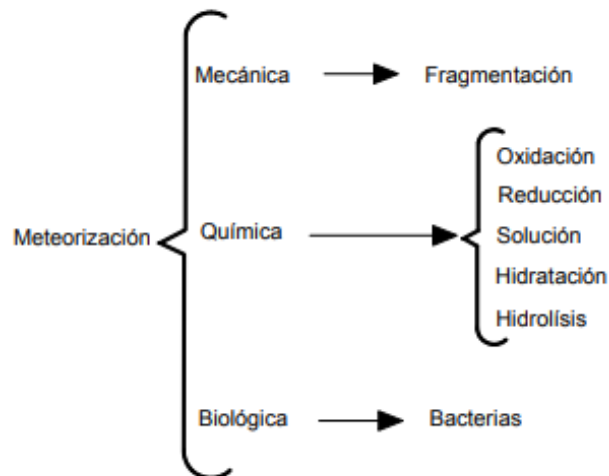


Fuente: (Jaime Suarez, s. f.)

2.4.4.1. Meteorización física

La meteorización física o mecánica es un proceso de fragmentación, que consiste en que se abren las discontinuidades y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación; y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión.

Figura 19. Procesos de meteorización



Fuente: (Jaime Suarez, s. f.)

Efectos de la Meteorización Física

La meteorización física no afecta significativamente los granos de minerales sino los bloques o partículas de mayor tamaño. Las fracturas del suelo residual generalmente siguen la orientación de las fracturas preferenciales de la roca.

La desintegración no siempre es progresiva y puede no coincidir con la descomposición. La resistencia del macizo de roca disminuye, aunque es posible que la resistencia interna de los bloques se mantenga. Generalmente, las rocas al meteorizarse, son menos friables y menos permeables que los materiales originales.

2.4.4.2. Meteorización química

La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos principales de meteorización química dependen de los procesos del agua y en algunos casos de la disponibilidad de agua para mantener la química requerida en el proceso.

Con una disponibilidad alta de agua, las soluciones son más diluidas y pueden atacar más fácilmente los minerales. Cuando la disponibilidad de agua es muy baja, las soluciones se saturan con los productos de las reacciones. De igual manera, a menos que los productos químicos sean arrastrados por el agua, pueden generar una barrera a la meteorización adicional.

La meteorización generalmente, avanza hacia abajo de la superficie y a través de las juntas y demás conductos de percolación, produciendo variaciones de intensidad, de meteorización y dejando bloques internos de material no descompuesto

Cuando la meteorización química es incipiente, los bloques son grandes y controlan en parte el comportamiento del talud, pero a medida que se hace más intensa, el factor más importante es la resistencia del suelo meteorizado que actúa como matriz de los bloques independientes. (Jaime Suarez, s. f.)

2.4.5. Factores que afectan la meteorización

Efecto de la litología

La susceptibilidad de las rocas a la acción química es una función de su composición mineralógica, textura y presencia de fracturas. En términos generales, el proceso de meteorización aumenta con la finura del tamaño de los granos, con la porosidad y con la permeabilidad.

En la mayoría de los procesos de meteorización en las rocas ígneas, predominan los procesos químicos, mientras en las rocas sedimentarias predominan los procesos físicos; sin embargo, estos procesos se interrelacionan.

Efecto de la permeabilidad del perfil de suelo

Desde el punto de vista de la conductividad hidráulica, el perfil del suelo residual puede dividirse en dos subsistemas (Jabodeyoff y otros, 2004):

Zona de alta permeabilidad: Está compuesta por la red de fracturas, la cual permite el paso rápido del agua y la disolución debe también ser rápida.

Zona de baja permeabilidad: En esta zona se permiten los cambios mineralógicos tales como la precipitación y la disolución de minerales en condiciones de saturación.

La permeabilidad puede ser un sub-producto de la meteorización, pero a su vez, la permeabilidad afecta los procesos tanto físicos como químicos por cuanto determina la disponibilidad de humedad y de flujo de agua, los cuales tienen gran influencia en los niveles de descomposición.

Efecto del clima

El clima ejerce una profunda influencia en la meteorización, especialmente la humedad relativa y la temperatura. Las reacciones químicas prácticamente se duplican cada aumento de 10°C de temperatura.

En las zonas tropicales y subtropicales donde la superficie de la tierra está cubierta por una vegetación densa que facilita la infiltración del agua, por aumento de los tiempos de

retención del agua y a su vez, son sujetas a lluvias fuertes, pueden aparecer profundidades de meteorización de varios cientos de metros.

En los climas secos o áridos, la meteorización química es subsuperficial, lenta y predominan los fenómenos de meteorización de tipo mecánico; igualmente, esto ocurre en las zonas tropicales montañosas, con poca vegetación, donde las pendientes altas del terreno no facilitan la infiltración del agua de lluvia.

Efecto del relieve

El relieve es un factor muy importante; en zonas de alta montaña predominan los procesos de meteorización mecánica, especialmente por acción del alivio a descargue de geopresiones, los cambios de temperatura, los procesos de humedecimiento y secado y la cristalización de materiales. La meteorización depende del relieve del terreno, siendo mayor en los sitios de menor pendiente y la profundidad de la meteorización aumenta hacia abajo del talud.

Efecto de otros factores

La frecuencia o espaciamiento de las discontinuidades afecta el proceso de meteorización y en los sitios en los cuales el espaciamiento de las discontinuidades es mayor, pueden aparecer masas de materiales no descompuestos como es el caso de los “Tors” o masas de granito sólido.

Las plantas y organismos vivos, tales como bacterias ayudan en el proceso de meteorización química. Otros elementos ambientales pueden incidir en la meteorización, pero sobre todo, las condiciones de humedad y temperatura.

2.4.6. Clasificación de los suelos residuales

Clasificación de Wesley

Los suelos residuales poseen características específicas, las cuales no están representadas adecuadamente en el sistema unificado de clasificación de suelos entre las cuales Wesley (1997) indica las siguientes:

El comportamiento de los suelos residuales depende en forma significativa, de la mineralogía y la estructura.

El grado de meteorización no se tiene en cuenta en los sistemas normales de clasificación.

Los sistemas de clasificación se basan en las propiedades del suelo en estado remoldeado y el comportamiento de los suelos residuales depende de su estado “in situ”.

Wesley (1988) propuso un sistema de clasificación de suelos residuales el cual está basado en tres factores básicos:

Composición: Se refiere al material de que está constituido e incluye tamaño, forma y especialmente, la composición mineralógica de la fracción fina.

Macroestructura: Incluye todos los detalles que se pueden observar visualmente como son discontinuidades, capas, fisuras, poros, presencia de materiales no meteorizados o parcialmente meteorizados y estructuras heredadas.

Microestructura: Fábrica, cementación entre partículas, forma y tamaño de los poros, etc. El sistema de clasificación de Wesley no puede tomarse aislado de otros elementos como son el estado o nivel de meteorización, las propiedades mecánicas, las modificaciones o cambios al profundizarse en el perfil, las superficies de cambios bruscos de propiedades, etc.(Jaime Suarez.)

Tabla 8. Sistema de clasificación de los suelos residuales

Grupo	Subgrupo	Ejemplo	Identificación	Comentarios
A Suelos sin influencia	(a) Influencia fuerte de la macroestructura	Suelos de rocas ígneas ácidas o intermedias rocas sedimentarias muy meteorizadas.	Inspección visual	Este es un grupo muy grande de suelos, incluyendo los saprolitos, cuyo comportamiento en las laderas es denominado por las influencias de las discontinuidades, fisuras, etc.
	(b)	Suelos de rocas ígneas y sedimentarias	Inspección visual y evaluación de la sensibilidad	Son suelos esencialmente homogéneos. Es importante la

<p>mineralógica fuerte</p>	<p>Influencia fuerte de la micro-estructura</p> <p>(c) Poca influencia de la estructura</p>	<p>completamente meteorizadas.</p> <p>Suelos derivados de rocas muy homogéneas</p>	<p>e índice de liquidez.</p> <p>Poca o ninguna sensibilidad y apariencia uniforme.</p>	<p>identificación de la naturaleza y el papel de las discontinuidades heredadas, tanto primarias y secundarias para entender el comportamiento. Se comporta en forma similar a los suelos moderadamente sobreconsolidados.</p>
<p>B Suelos fuertemente influenciados por minerales comunes</p>	<p>(a) Grupo de la Esmectita y Montmorillonita</p> <p>(b) Otros minerales comunes</p>	<p>Suelos negros tropicales y suelos formados en condiciones pobremente drenadas.</p>	<p>Colores gris a negro y alta plasticidad.</p>	<p>Suelos problemáticos encontrados en zonas planas; son de baja resistencia, alta compresibilidad y características fuertes de expansión y contracción.</p> <p>Subgrupo relativamente pequeño.</p>
<p>C Suelos fuertemente influenciados por minerales arcillosos propios solamente de los suelos residuales</p>	<p>(a) Grupo de los Alófanos</p> <p>(b)</p>	<p>Suelos derivados de ceniza volcánica.</p> <p>Suelos derivados de rocas</p>	<p>Contenidos de agua muy altos y cambios irreversibles al secarse.</p> <p>Color rojo, topografía bien drenada.</p>	<p>Altos límites líquidos y plásticos. Las características de ingeniería son generalmente buenas, aunque en algunos casos, la alta sensibilidad hace difícil el manejo y la compactación.</p> <p>Suelos finos de baja a media plasticidad, pero de</p>

	Grupo de la Aloisita	volcánicas antiguas, especialmente arcillas rojas tropicales.		baja actividad. Las propiedades de ingeniería son generalmente buenas. (Debe tenerse en cuenta que con frecuencia, se traslapan los suelos alófanos y los aloysíticos).
	(c) Grupo de los Sesquioxidos	Suelos lateríticos o lateritas	Apariencia granular o nodular.	Es un grupo muy amplio que van desde arcillas limosas hasta gravas y arenas gruesas. Su comportamiento varía desde la baja plasticidad hasta la grava no plástica.

Fuente: Suelos residuales (Jaime Suarez)

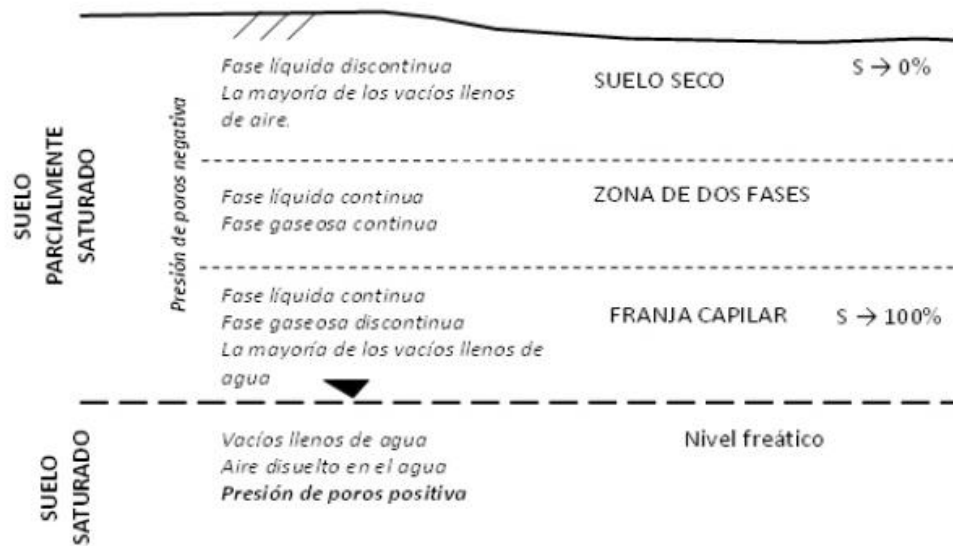
2.5. Ciclos de saturación y secado

Los suelos saturados y los suelos secos, constituyen un sistema de 2 fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire, respectivamente. Pero en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran tres fases en el suelo que interactúan entre sí, partículas sólidas, agua y aire y de acuerdo con Fredlund y Morgenstern (1977) se podría hablar de una cuarta fase: la interfase aire-agua, o membrana contráctil.

Debido a la interacción entre las fases, además de los principios de la mecánica y la hidráulica, se requiere utilizar los principios de termodinámica entre las diferentes fases del suelo, lo cual hace un poco más complejo el estudio del suelo parcialmente saturado.

La figura 20 muestra el esquema planteado por Fredlund (2000) para representar los estados del suelo dependiendo de las fases presentes.

Figura 20. Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado



Fuente: Fredlund, D.G, 2000.

Los suelos que se encuentran por debajo del nivel freático se consideran en estado saturado, es decir, que los espacios vacíos están ocupados completamente por agua. De acuerdo con las leyes de la hidráulica, bajo esta condición, el agua en los poros se encuentra a una presión positiva, es decir que ejerce una fuerza positiva, de igual magnitud y en todas las direcciones y se le conoce como presión de poros debido al agua (u_w).

Los suelos que se encuentran por encima del nivel freático, pueden estar en estado seco o parcialmente saturado. La zona de suelo seco es la que se encuentra más cerca a la superficie del terreno, y de acuerdo con Fredlund (2000), la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de aire, pudiendo existir una fase líquida pero en estado discontinuo, es decir, como pequeñas gotas de agua aisladas. El grado de saturación del suelo seco es $S \rightarrow 0\%$.

La franja más cercana al nivel freático, es la franja capilar, donde la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de agua de manera continua, pero puede existir una fase gaseosa discontinua, es decir, se presentan burbujas de aire. El grado de saturación del suelo en la franja capilar es cercano al 100% ($S \rightarrow 100\%$), pero el suelo no se considera saturado y a diferencia de éste, el agua que ocupa los vacíos, se encuentra a una presión

negativa, es decir la presión de poros debido al agua (u_w) es negativa y se rige por el fenómeno de capilaridad.

Entre la zona del suelo seco y la franja capilar, existe una zona intermedia denominada por Fredlund (2000) como zona de dos fases, que corresponde a la zona del suelo parcialmente saturado, propiamente dicha. En esta zona, el agua y el aire se encuentran ocupando los poros, ambos de manera continua y el grado de saturación se encuentra en un intervalo entre el 20% y el 80%. La presión en los poros del suelo es negativa, pero es debido a la diferencia de presión entre ambas fases, es decir, a la presión del agua en los poros (u_w) y a la presión del aire en los poros (u_a).

La mecánica del suelo parcialmente saturado, se ha desarrollado para esta zona intermedia, donde hay continuidad de las fases líquida y gaseosa; sin embargo, las teorías propuestas se pueden extender para los tres casos (Fredlund y Rahardjo, 1993). (Ochoa Mesa Victoria Elena, 2012).

Debido a que la estructura está en contacto con el medio ambiente, es de esperarse que tanto los periodos de lluvia como los de estiaje afecten su comportamiento, es decir; los módulos de los materiales presentarán variaciones estacionales. Por ejemplo, el material que forma la carpeta se reblandece cuando la temperatura se incrementa y se rigidiza en caso contrario. De igual forma, los suelos y materiales granulares de las capas restantes presentarán dicha variación por cambios, no de temperatura, pero sí en el contenido de agua.

Estos cambios son consecuencia de la filtración de agua hacia la estructura ya sea por los acotamientos, o por la superficie si la carpeta presenta agrietamiento por fatiga o por cambios de temperatura. Aun cuando se toman todas las previsiones para que esto no suceda (con la construcción de los sistemas de drenaje), no se puede asegurar que no habrá flujo de agua hacia los materiales o fuera de ellos (deseccación).

Como no puede asegurarse que los materiales van a mantener sus propiedades en el tiempo habrá que preguntarse cómo va a variar esta propiedad si el suelo se humedece o se seca. En otras palabras ¿qué pasará con el módulo cuando se presenten varios ciclos de humedecimiento y secado? Todo esto constituye una serie de trayectorias de

humedecimiento y secado que los materiales sufren y que es necesario tomar en cuenta en el diseño de pavimentos para poder llegar a construir estructuras con una vida útil más prolongada y que proporcionen seguridad y confort al usuario que transita sobre ellas.(Ochoa Mesa Victoria Elena, 2012)

2.6. Marco estadístico

2.6.1. Tratamiento estadístico

En el trabajo de campo con la aplicación de distintos instrumentos de recogida de datos, se obtienen obviamente los datos que necesitamos, y que nos propusimos en el proyecto, los que nos permitirán arribar a conclusiones científicamente fundamentadas, pero, esos datos así obtenidos “en bruto” no nos aportan muchos elementos, es necesario lograr que nos ayuden a llegar a las esencias, a los nexos genéticos, a las causas, y para ello necesitamos procesarlos, es decir, organizarlos, tabularlos, presentarlos y analizarlos, de manera que faciliten nuestra labor investigativa.

Media aritmética

Es una medida de tendencia central que denota el promedio de un conjunto de datos. Se calcula dividiendo la suma del conjunto de datos entre el total de ellos. Simbólicamente se representa por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x$$

Donde:

x= Datos de la serie

n= Número de datos de la serie

Σ =Sumatoria

Moda

Es una medida de tendencia central o el valor de la variable que tiene mayor frecuencia absoluta, la que más se repite es la única medida de centralización que tiene sentido estudiar en una variable cualitativa, pues no precisa la realización de ningún cálculo. Por su propia definición, la moda no es única, pues puede haber dos o más valores de la variable que tengan la misma frecuencia siendo ésta máxima. Entonces tendremos una distribución bimodal o polimodal según el caso.

Mediana

Es una medida de tendencia central. Es el valor que divide al conjunto de datos ordenados, en aproximadamente dos partes: 50% de valores son inferiores y otro 50% son superiores.

Desviación estándar

Conocida también como desviación típica, es una medida de dispersión que se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Donde:

S^2 =Desviación estándar

\sum =Sumatoria

x_i = Observación numero i de la variable x

n=Número de observaciones

\bar{x} = Media de la variable x

Varianza

Conocida también como variancia, es una medida de dispersión de la información. Se obtiene como el promedio de los cuadrados de las desviaciones de los valores de la variable respecto de su media aritmética.

$$V = S^2$$

Donde:

V= Varianza

S^2 = Desviación estándar

Coefficiente de variación

Es una medida de dispersión relativa y se calcula dividiendo la desviación típica entre la media aritmética:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100$$

Donde:

CV= Coeficiente de variación

S= Desviación estándar de la población

\bar{X} =Media aritmética de la población

La ventaja de este coeficiente es que no lleva asociada ninguna unidad de medida. Se interpreta como porcentaje, por lo que nos permitirá decidir entre dos muestras, cuál es la que presenta mayor dispersión. Simbólicamente se denota por CV.

2.7. Marco normativo

Actualmente, existen varias normativas, pero se realizará el siguiente proyecto con las normas de AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing and Materials) y la Norma Boliviana NB-011.

2.8. Posición del investigador

Los áridos degradables no son aptos para su uso, porque no cumplen con las especificaciones necesarias.

Con este análisis se pretende realizar el CBR con árido degradable y suelo natural de subrasante para conocer cuánto afecta realizando los ensayos previos de acuerdo a las normas.

Se pudo notar que no existen estudios de los áridos degradables porque no cumplen con las especificaciones; debido a esto se los pretende analizar.

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

3.1. Introducción

Para la realización de esta investigación se realizaron pruebas de laboratorio con dos tipos de suelo extraído en la zona de Iscayachi y Sella Quebrada del departamento de Tarija.

Asimismo, se describe el proceso de ensayos requeridos para el análisis de las propiedades y características de CBR con árido degradable en ciclos continuos de saturación y secado.

3.2. Unidades de estudio y decisión muestral

3.2.1. Unidad de estudio

La unidad de estudio es el ensayo de laboratorio de suelos.

3.2.2. Población

La población son todos los ensayos de laboratorio de suelos.

3.2.3. Muestra

Los ensayos seleccionados en la población deben ser repetidos en la muestra, se ajusta a una fijación de sus medias o proporciones generando un muestreo estratificado. Se puede asumir que la muestra será $n= 90$ ensayos para la investigación.

Tabla 9.Cálculo de la cantidad de ensayos

N°	Tipos	Etapa	Ensayos	Ni	G ²	Ni*G ²	fi	ni
1	Árido Degradable	Caracterización	Contenido de Humedad	5	0.1	0.5	0.023	2
2			Granulometría	5	0.1	0.5	0.023	2
3			Límites de Atterberg	5	0.1	0.5	0.023	2
4			Compactación T-180	5	0.1	0.5	0.023	2
5			CBR	5	0.1	0.5	0.023	2
6	Suelo natural de subrasante	Caracterización	Contenido de Humedad	5	0.1	0.5	0.023	2
7			Granulometría	5	0.1	0.5	0.023	2
8			Límites de Atterberg	5	0.1	0.5	0.023	2
9			Compactación T-180	5	0.1	0.5	0.023	2
10			CBR	5	0.1	0.5	0.023	2
11	Subrasante con árido degradable	Caracterización	Contenido de Humedad	21	0.1	2.1	0.098	9
12			Granulometría	21	0.1	2.1	0.098	9
13			Límites de Atterberg	21	0.1	2.1	0.098	9
14			Compactación T-180	21	0.1	2.1	0.098	9
15			CBR	21	0.1	2.1	0.098	9
16	Subrasante con árido degradable en 3 diferentes porcentajes en 3 ciclos	Prueba de Resistencia	CBR	60	0.1	6	0.279	25
TOTAL				215		21.5	1	90

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Selección de las técnicas de muestreo

En esta investigación se aplicó el método probabilístico y la técnica del muestreo estratificado, porque se tiene que ordenar los elementos en clases o subgrupos, que comúnmente se denomina estratos, considerando algunas características comunes; por ejemplo tipos de ensayos, características, propiedades y otros.

3.3. Métodos y técnicas empleadas

3.3.1. Métodos

Método de ensayo de Capacidad Portante (CBR)

3.3.2. Técnicas

Con el árido degradable y el suelo natural de la subrasante se utilizó la técnica experimental con ensayos de laboratorio, haciendo variar los porcentajes del árido degradable.

Los ensayos que se realizó son la caracterización del árido degradable como también del suelo natural de subrasante; los suelos combinados en ciertos porcentajes se caracterizaron de igual manera y por último se procedió a realizar los CBR aplicando ciclos continuos de saturación y secado.

3.4. Procesamiento de la información

Se procedió a una revisión registrada en las planillas para analizarla e interpretarla.

Las muestras extraídas fueron tabuladas así como también los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio; se utilizaron los formatos establecidos por la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Con los resultados obtenidos se procedió a redactar las conclusiones y recomendaciones al problema de investigación.

3.5. Análisis del árido degradable

Tabla 10. Características del árido degradable

Suelos derivados de la meteorización y descomposición de la roca in situ.	
Son muy susceptibles a cambios de humedad.	
El tamaño de las partículas varía debido a que se rompen y se vuelven progresivamente finas.	
El proceso de meteorización es mediante la descomposición química y desintegración física del suelo.	
En el proceso físico se ve la desintegración que abre las discontinuidades y se desintegra la roca haciendo que las partículas se partan, aumente la relación de vacíos y aumente la permeabilidad disminuyendo la cohesión.	Descomposición química, hace que se incremente el contenido de arcilla, disminuya la fricción.
Tienen concentración de hierro y su coloración rojiza.	
En su estructura es importante observar las discontinuidades, juntas, estratificación, fallas, separación.	En la microestructura es observar su textura, tamaño de granos terrones.

Fuente: Elaboración propia

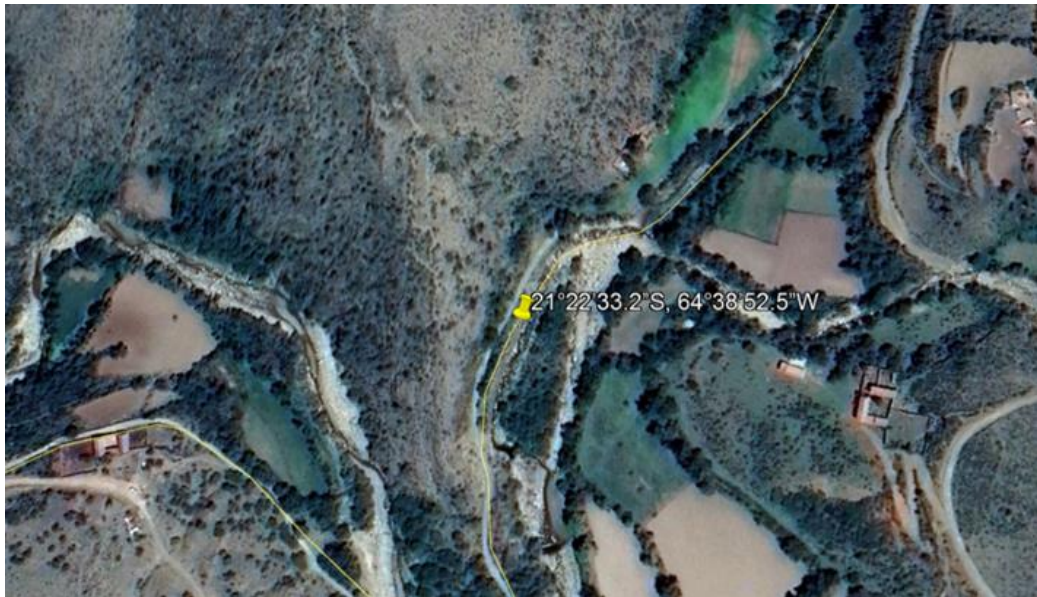
3.6. Ubicación

Se tomaron muestras de suelo natural de dos diferentes lugares:

Muestra 1: Subrasante

El primer suelo, “subrasante” que se extrajo de la zona de Sella quebrada, geográficamente se encuentra 21°22’33.2” latitud sur y 64°38’52.5” de longitud oeste.

Figura 21. Extracción de muestra del tramo de Sella Quebrada

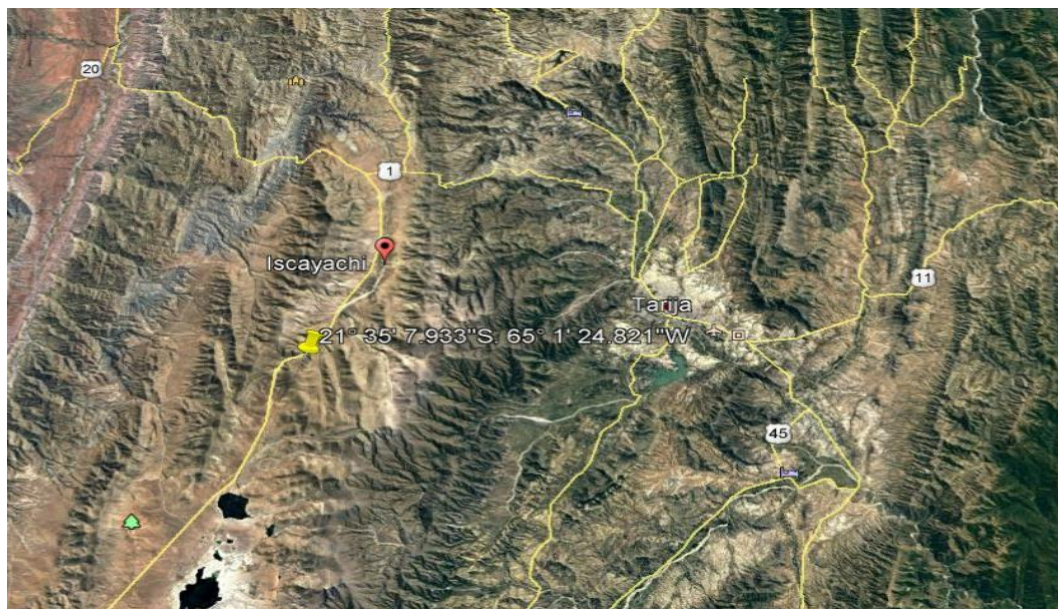


Fuente: Google earth

Muestra 2: Árido degradable

El segundo suelo, “árido degradable” que se extrajo de la zona de Iscayachi, geográficamente se encuentra 21°35'7.933" latitud sur y 65°1'24.821" de longitud oeste.

Figura 22.Extracción de muestra del tramo Iscayachi



Fuente: Google earth

3.7. Caracterización de los suelos

Para la realización de los ensayos se tiene los siguientes suelos:

Muestra 1: Subrasante

Muestra 2: Árido degradable

Muestra 3: Subrasante con 10% de árido degradable

Muestra 4: Subrasante con 20% de árido degradable

Muestra 5: Subrasante con 30% de árido degradable

3.7.1. Determinación del contenido de humedad

Este ensayo determina el contenido de humedad (o contenido de agua) de los suelos, y la forma en que la cantidad de agua en los suelos puede influir en su comportamiento.

La medición del contenido de humedad, tanto en el estado natural como bajo ciertas condiciones de prueba definidas, puede proporcionar un método extremadamente útil para clasificar los suelos cohesivos y evaluar sus propiedades de ingeniería.

El concepto de humedades en los suelos, se define como la cantidad de agua que se encuentra dentro de una muestra de suelo y se expresa en porcentaje.

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

W= Contenido de humedad (%).

Ww= Peso del agua presente en el agua (gr).

Ws= Peso del suelo secado al horno (gr).

La muestra que se tome para la determinación de la humedad deberá ser representativa del suelo cuya humedad se desea conocer. Si dicha muestra de humedad va a ser tomada en el campo y transportada al laboratorio para hacer la determinación correspondiente, deberá

colocarse en un recipiente que tenga un cierre hermético para evitar la pérdida de humedad por los cambios de temperatura durante el transporte.

Se utiliza el siguiente equipo: Horno, balanza, taras, fuentes o platos

Para el empleo dentro de los ensayos se procedió a usar una porción pequeña de suelo, aproximadamente unos 60 a 150 gr.

Pesar los recipientes vacíos, colocar en los recipientes las muestras del material y proceder a pesar el recipiente más suelo húmedo, llevar los recipientes al horno durante aproximadamente un día y pesar las muestras sacadas del horno.

Figura 23. Ensayo de contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Contenido de humedad

Muestras	% W
Suelo subrasante	5.96
Árido degradable	4.21
Con 10%	5.86
Con 20%	5.77
Con 30%	5.68

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Análisis granulométrico método mecánico

Dentro de un análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de las partículas que conforman un suelo. Este se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tiene un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica; si bien se realiza una distribución de tamaños, esto no incide en la forma que puedan tener los granos de suelos, ya que al retener material en una malla se observa diferentes tamaños y el porcentaje que se calculó está basado estrictamente en los pesos que se retienen en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo.

Las fracciones de los agregados están definidas por medio de los siguientes datos.

Agregado grueso es todo material retenido por el tamiz N°4 y el agregado fino es todo material que pase el tamiz N°4.

Para la realización de este ensayo se necesita los diversos tamices de diámetro de aberturas: 3", 2", 1", 1 1/2", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 200.

Se pesa el material en la balanza una muestra de 5000 gr y se tamiza este material por cada uno de los tamices anotando el peso del material retenido en cada uno.

Figura 24. Ensayo de granulometría



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Análisis granulométrico

Muestras	% Pasa N° 4	% Pasa N° 200
Subrasante	64.11	5.97
Árido degradable	100.00	35.62
Con 10%	65.16	6.18
Con 20%	63.94	6.39
Con 30%	62.80	6.72

Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Límites de Atterberg

Límite líquido

El límite líquido se determina mediante la realización de ensayos en los que se lleva una parte de la muestra que pasa del tamiz N° 40 agregando agua hasta que tenga una consistencia homogénea; con una espátula se coloca una porción en la copa de Casagrande, se divide en dos con el ranurador, y luego se deja fluir juntos hasta chocar causada por los golpes repetidos ocasionados en la copa en un dispositivo mecánico estándar. La muestra se coloca en una tara y se lleva al horno.

Figura 25. Ensayo límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Ensayo límite líquido



Fuente: Elaboración propia

Límite plástico

El límite plástico se determina presionando alternativamente juntos y rodar en un cilindro de 3.2 mm ($\frac{1}{8}$ pulg.) de diámetro una pequeña porción de suelo de plástico hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el que el hilo se desmorona y no puede ya ser presionado y laminado de nuevo. El contenido de agua del suelo en este punto se presenta como el límite plástico. Cuando los rollos de 3 mm se empiezan a agrietar se coloca los trozos en la tara, se pesa y lleva al horno durante 24 horas.

Figura 27. Ensayo límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Resultados límite de Atterberg

Límite líquido y límite plástico	
Muestra	A. degradable
LL	21.6
LP	17.68

Fuente: Elaboración propia

Mediante los ensayos se pudo determinar que el material de subrasante no presenta límite líquido ni límite plástico.

3.7.4. Compactación del próctor modificado T - 180

La relación entre el peso del material compactado y el volumen del mismo arroja como resultado la densidad del material estudiado. El método modificado propone un análisis con una mayor energía, ya que el martillo tiene un peso de 10 lb y una altura de 18". Teniendo $Y = 24.586 \text{ kg-cm/cm}$.

El objetivo es determinar mediante el ensayo de próctor modificado en laboratorio, el contenido óptimo de humedad que permita al material de mejoramiento lograr la mejor compactación de la mezcla de agregados en estudio.

Para el procedimiento se toma el material que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ ", el cual se encuentra totalmente seco, se establecen porcentajes de agua que se añadirán al material, para el caso de este estudio es de 4%, 8%, 12% y 16 %, empezando por el menor.

Se divide la muestra ya mezclada en 5 partes homogénea, para luego proceder a la compactación con 56 golpes para cada una de las 5 partes.

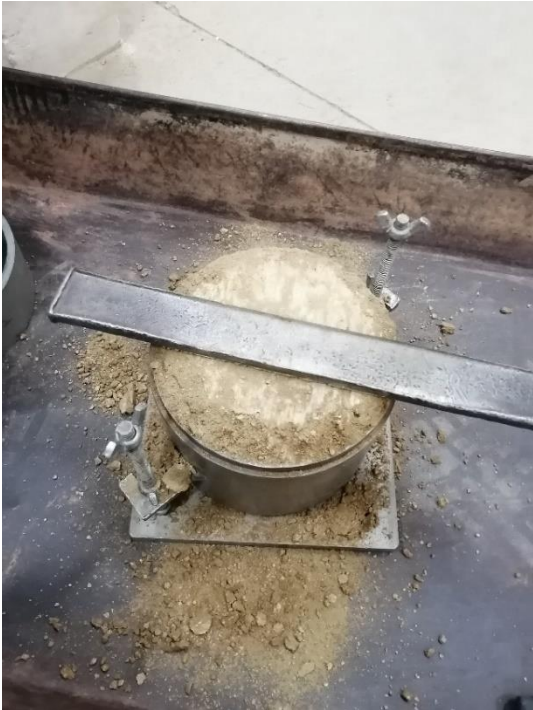
Se procede de la misma manera pero esta vez con el siguiente porcentaje de agua, luego se toman muestras de cada uno de los cilindros y se las lleva al horno.

Figura 28. Ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Compactación

Muestras	Densidad máxima	Humedad óptima
Subrasante	2.05	9.17
A. degradable	2.18	7.12
Con 10%	2.07	9.09
Con 20%	2.09	8.85
Con 30%	2.16	8.64

Fuente: Elaboración propia

3.7.5. Clasificación de los suelos

El proceso de clasificación de suelos en cualquier sistema básico incluye la evaluación de propiedades físicas de los suelos a partir de indicadores, tales como la granulometría y la plasticidad y la aplicación de un procedimiento sistematizado para determinar las clases y subclases correspondientes. A partir de la clasificación del suelo es posible predecir propiedades que tenga el suelo como compresibilidad, resistencia y deformación, además de dar una noción del desempeño del material en su uso ingenieril; al saber el comportamiento de un suelo se pueden anticipar los problemas que éste experimentará ante las sollicitaciones de carga de la construcción o puesta en servicio de una obra civil.

Existen dos métodos de clasificación mundialmente aceptados, el método SUCS y el método AASHTO.

Tabla 15. Clasificación de los suelos

Clasificación de suelos					
	Subrasante	A. degradable	Con 10%	Con 20%	Con 30%
SUCS	SW	SC	SW-SC	SW-SC	SP-SC
AASHTO	A-1-b ₍₀₎	A-4 ₍₀₎	A-1-b ₍₀₎	A-1-b ₍₀₎	A-1-b ₍₀₎
Descripción	Arena bien graduada con arcilla	Arena arcillosa	Arena bien graduada con arcilla	Arena bien graduada con arcilla	Arena mal graduada con arcilla

Fuente: Elaboración propia

3.7.6. Resumen de resultados de caracterización

Los resultados se muestran en las siguientes tablas que corresponden a cada uno de los tramos. Las planillas de ensayos de caracterización están en el ANEXO A.

Tabla 16. Resumen de caracterización muestra 1

Muestra 1 – Subrasante				
		Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Contenido de humedad		5.98	5.93	5.96
Límites	Líquido	0	0	0
	Plástico	0	0	0
	Índice de plasticidad	0	0	0
	Índice de grupo	0	0	0
Granulometría	% pasa de N° 4	66.35	61.87	64.11
	% pasa de N° 10	55.53	49.01	52.27
	% pasa de N° 40	42.72	32.65	37.69
	% pasa de N° 200	7.84	4.11	5.97
Compactación	Densidad máxima	2.10	2.01	2.05
	Humedad óptima	9.07	9.26	9.17
Tipo de suelo				
AASHTO		A-1-b ⁽⁰⁾		
SUCS		SW		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Resumen de caracterización muestra 2

Muestra 2 – Árido degradable				
		Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Contenido de humedad		4.29	4.13	4.21
Límites	Líquido	21.45	21.74	21.60
	Plástico	17.79	17.57	17.68
	Índice de plasticidad	3.66	4.17	3.92
	Índice de grupo	0	0	0
Granulometría	% pasa de N° 4	100	100	100
	% pasa de N° 10	69.35	70.88	70.12
	% pasa de N° 40	47.85	49.66	48.76
	% pasa de N° 200	35.98	35.26	35.62
Compactación	Densidad máxima	2.25	2.11	2.18
	Humedad óptima	7.49	6.75	7.12
Tipo de suelo				
AASHTO		A-4 ⁽⁰⁾		
SUCS		SC		

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que muestran en las siguientes tablas corresponden a los suelos combinados. Las planillas de ensayos de caracterización están en el ANEXO B.

Tabla 18. Resumen de caracterización con 10%

Suelo subrasante con el 10% de árido degradable					
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Contenido de humedad		5.84	5.89	5.86	5.86
Límites	Líquido	0.00	0.00	0.00	0.00
	Plástico	0.00	0.00	0.00	0.00
	Índice de plasticidad	0.00	0.00	0.00	0.00
	Índice de grupo	0.00	0.00	0.00	0.00
Granulometría	% pasa de N° 4	65.94	66.22	65.16	65.77
	% pasa de N° 10	54.93	55.21	55.31	55.15
	% pasa de N° 40	38.03	39.51	42.23	39.92
	% pasa de N° 200	6.25	6.29	6.18	6.24
Compactación	Densidad máxima	2.07	2.05	2.08	2.07
	Humedad óptima	9.08	9.12	9.06	9.09
Tipo de suelo					
AASHTO		A-1-b ⁽⁰⁾			
SUCS		SW-SC			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Resumen de caracterización con 20%

Suelo subrasante con el 20% de árido degradable					
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Contenido de humedad		5.74	5.78	5.80	5.77
Límites	Líquido	0.00	0.00	0.00	0.00
	Plástico	0.00	0.00	0.00	0.00
	Índice de plasticidad	0.00	0.00	0.00	0.00
	Índice de grupo	0.00	0.00	0.00	0.00
Granulometría	% pasa de N° 4	65.36	62.06	64.39	63.94
	% pasa de N° 10	55.26	50.01	51.00	52.09
	% pasa de N° 40	39.76	34.31	36.22	36.76
	% pasa de N° 200	6.38	6.34	6.44	6.39
Compactación	Densidad máxima	2.09	2.09	2.08	2.09
	Humedad óptima	8.80	8.85	8.89	8.85
Tipo de suelo					
AASHTO		A-1-b ⁽⁰⁾			
SUCS		SW-SC			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resumen de caracterización con 30%

Suelo subrasante con el 30% de árido degradable					
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Contenido de humedad		5.68	5.72	5.65	5.68
Límites	Líquido	0.00	0.00	0.00	0.00
	Plástico	0.00	0.00	0.00	0.00
	Índice de plasticidad	0.00	0.00	0.00	0.00
	Índice de grupo	0.00	0.00	0.00	0.00
Granulometría	% pasa de N° 4	66.42	61.96	60.03	62.80
	% pasa de N° 10	58.41	50.46	49.72	52.86
	% pasa de N° 40	42.09	36.36	36.07	38.17
	% pasa de N° 200	7.09	6.51	6.56	6.72
Compactación	Densidad máxima	2.17	2.18	2.13	2.16
	Humedad óptima	8.67	8.57	8.69	8.64
Tipo de suelo					
AASHTO		A-1-b ⁽⁰⁾			
SUCS		SP-SC			

Fuente: Elaboración propia

3.8. Ensayo de la relación de soporte del suelo en el laboratorio

La relación de soporte de carga que poseen las diferentes capas que conforma un camino, es uno de los principales parámetros a la hora de la realización de diseño que cumplan con los parámetros establecidos.

Para la determinación del valor de capacidad de soporte de carga de un material, es necesario realizar el ensayo de CBR.

Los equipos que se usó son los siguientes:

Molde metálico cilíndrico.

Disco espaciador.

Martillo metálico de 10 lb de peso y 18 " de caída.

Extensómetro, aparato para medir la expansión.

Pesos de sobrecarga.

Prensa de ensayo.

Horno, balanza, probeta, espátula, enrasador, brocha y discos de papel.

Figura 30. Materiales CBR



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento en laboratorio

Pesar y registrar la masa del molde vacío sin collar; se tomó las medidas del molde de diámetro y altura para determinar el volumen.

La muestra con la que se trabaja es la que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ " para cada una de las probetas, las cuales serán de 12, 25 y 56 golpes.

Determinada la humedad natural del material y al conocer la humedad óptima de compactación se establece el porcentaje de agua con el que la densidad seca es la máxima y se agrega al material para las muestras.

Figura 31. CBR humedad óptima a la muestra



Fuente: Elaboración propia

Se coloca el collarín y el disco espaciador con el papel filtro, procediendo luego a dividir la muestra en 5 partes las cuales se tendrán que compactar con los respectivos golpes de 12, 25 y 56.

Figura 32. CBR compactación de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Se quita el collarín del molde y se procede a enrasar. Quitando el disco espaciador se toma el peso del molde, se coloca un papel filtro sobre la base y se da vuelta a la muestra, sobre la superficie de la muestra se coloca el vástago junto con las sobrecargas.

Para la medición de la expansión se usará el extensómetro que se acomoda sobre los moldes y marcando su posición se toma las lecturas iniciales; llevar las probetas a saturar y tomar lecturas de los siguientes 4 días.

Figura 33. Lectura de la expansión



Fuente: Elaboración propia

Después de saturada la muestra, sacar los moldes cuidadosamente del tanque de remojo, verter el agua retenida en la parte superior del mismo y dejar escurrir el molde durante 15 minutos. Se retira las sobrecargas y se registra el peso del molde más suelo después de la saturación.

Figura 34. Moldes saturados



Fuente: Elaboración propia

Para la penetración con la prensa se coloca nuevamente las sobrecargas, se apoya el pistón se penetración y se coloca ambos diales en cero. Se aplica la carga en el pistón de manera que la velocidad sea de 1.27 mm/min y se anota las lecturas de las cargas para los niveles de penetración de:

Tabla 21. Penetración CBR

Penetración	
Pulg.	mm
0.00	0.00
0.025	0.63
0.05	1.27
0.075	1.9
0.1	2.54
0.2	5.08
0.3	7.62
0.4	10.16
0.5	12.7

Fuente: Elaboración propia

Se registra la carga en cada uno de los valores establecidos en la tabla anterior, se desmolda el suelo y se establece su humedad con tres puntos, abajo, la parte superior y otro al medio de la muestra.

Figura 35. Lectura de las cargas de penetración



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Muestras para el control de humedades



Fuente: Elaboración propia

3.8.1. Resumen de los resultados del ensayo de relación de soporte (CBR)

Los resultados que se muestra en la siguiente tabla corresponden a cada uno de los tramos. Las planillas del ensayo están en el ANEXO A.

Tabla 22. Resultados de CBR

CBR				
		Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
Muestra 1	%	46.48	44.73	44.73
Muestra 2	%	11.46	11.22	11.22

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que se muestra en la siguiente tabla corresponden a los suelos combinados. Las planillas del ensayo están en el ANEXO B.

Tabla 23. CBR subrasante con árido degradable

CBR subrasante con árido degradable					
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Con 10%	%	40.37	40.32	40.70	40.32
Con el 20 %	%	36.04	36.09	35.07	35.07
Con el 30%	%	29.69	30.22	28.52	28.52

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL CBR EN CICLOS

4.1. Ensayo de la relación de soporte del suelo CBR de subrasante con % de árido degradable en ciclos continuos de saturación y secado

Los ensayos de CBR en ciclos de saturación y secado se realizaron con 10%, 20% y 30% de árido degradable en el suelo subrasante para cada ciclo; se realizó la lectura en la prensa en condiciones secas.

Figura 37. CBR Suelos saturados en los ciclos



Fuente: Elaboración propia

Figura 38.CBR suelos en secado



Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Lectura de la prensa en seco



Fuente: Elaboración propia

Los CBR en ciclos de saturación y secado se realizaron con la humedad óptima de cada % de subrasante con árido degradable los cuales fueron calculados anteriormente. Un ciclo de saturación y secado consiste en saturar los moldes en la piscina de agua por 4 días o hasta cuando presente un cambio de expansión; una vez saturado se realiza el secado de los moldes controlando su peso. Existe una variación en el tiempo de secado de acuerdo al % de árido degradable que tenga y al número de golpes en el molde.

La muestra se encuentra totalmente seca cuando mantiene su mismo peso.

Para el segundo y tercer ciclo se repite de la misma manera volviendo a saturar y a secar el suelo en su totalidad y luego lecturar en la prensa del ensayo.

4.2. Resumen de los resultados del ensayo de relación de soporte (CBR) de subrasante con % de árido degradable en ciclos continuos de saturación y secado

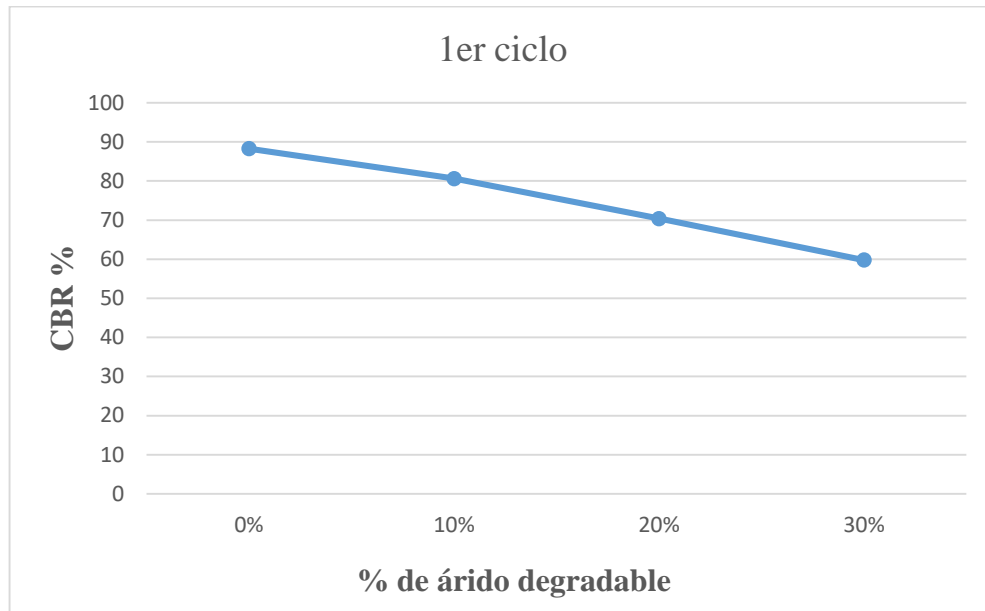
Los resultados que se muestra en las siguientes tablas corresponden a los ciclos de saturación y secado. Las planillas del ensayo están en el ANEXO C

Tabla 24.Resultados del primer ciclo

		Primer ciclo			
		0%	10%	20%	30%
Densidad máxima	gr/cm ³	2.05	2.07	2.09	2.16
Humedad óptima	%	9.17	9.09	8.85	8.64
CBR 1	%	88.28	82.01	70.41	61.68
CBR 2	%	90.52	80.61	71.33	59.81
Promedio CBR	%	88.28	80.61	70.41	59.81

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 1. Curva CBR primer ciclo



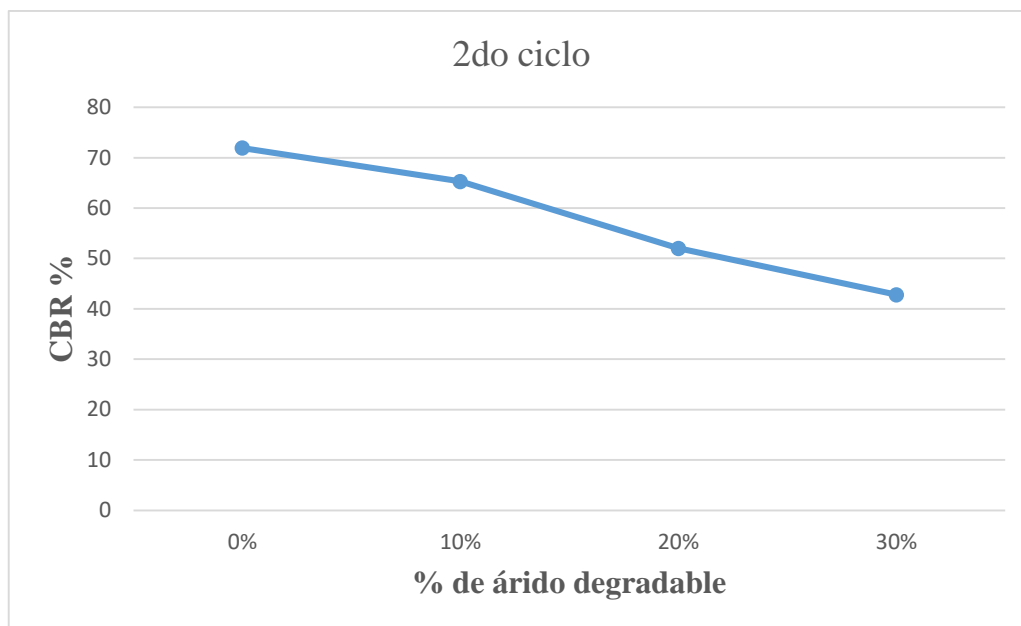
Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Resultado del segundo ciclo

		Segundo ciclo			
		0%	10%	20%	30%
Densidad máxima	gr/cm ³	2.05	2.07	2.09	2.16
Humedad óptima	%	9.17	9.09	8.85	8.64
CBR 1	%	71.94	65.30	54.09	42.80
CBR 2	%	72.54	66.70	52.01	43.65
Promedio CBR	%	71.94	65.30	52.01	42.80

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2. Curva CBR segundo ciclo



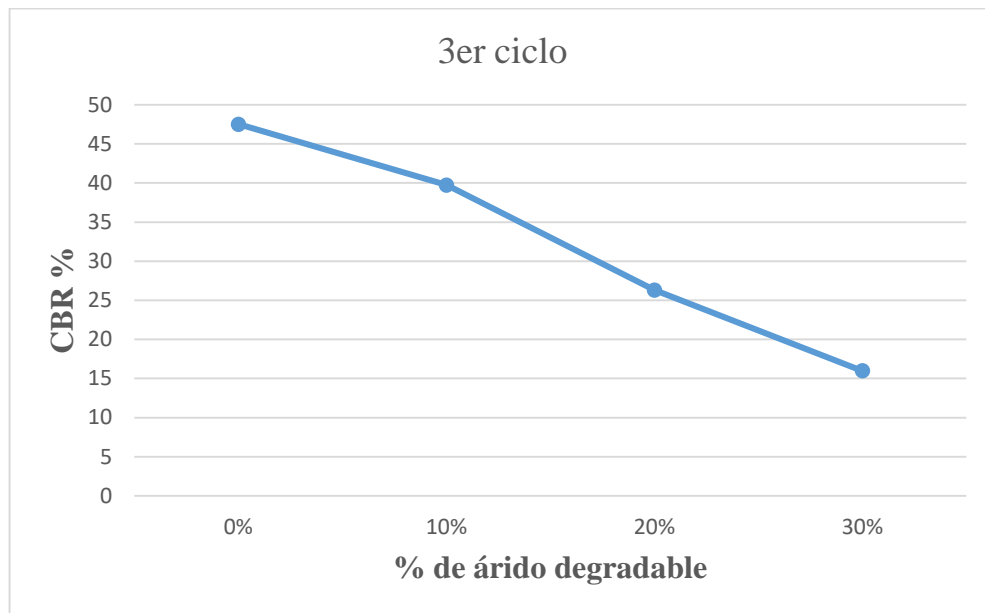
Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Resultado del tercer ciclo

		Tercer ciclo			
		0%	10%	20%	30%
Densidad máxima	gr/cm ³	2.05	2.07	2.09	2.16
Humedad óptima	%	9.17	9.09	8.85	8.64
CBR 1	%	47.51	39.75	27.92	15.99
CBR 2	%	50.41	41.31	26.33	16.95
Promedio	%	47.51	39.75	26.33	15.99

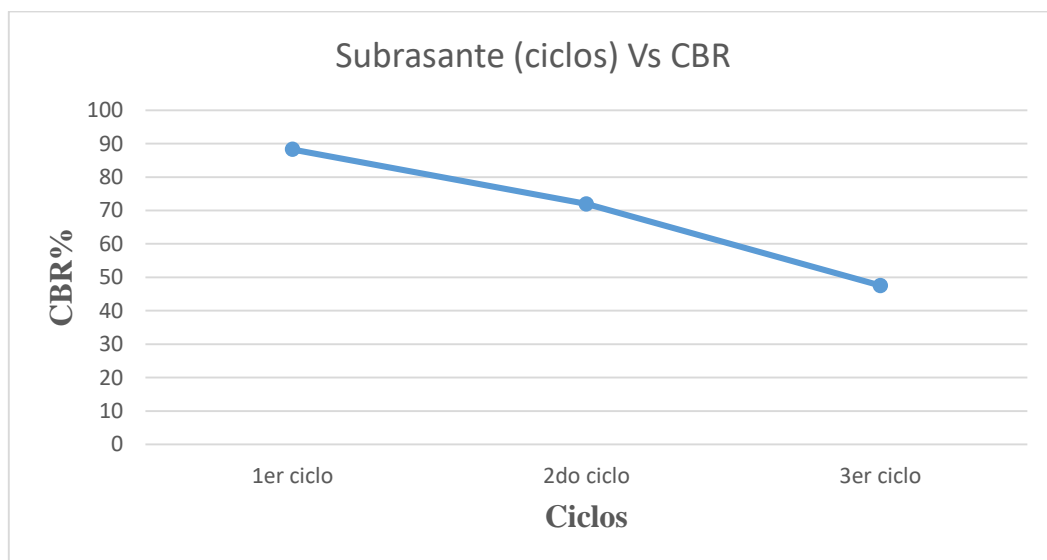
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. Curva CBR del tercer ciclo



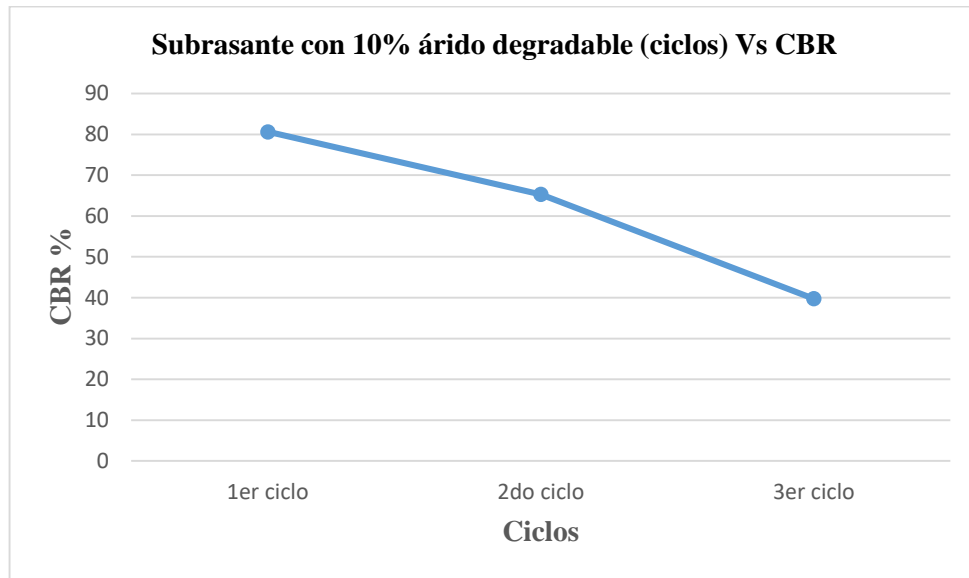
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4. Subrasante (ciclos) Vs CBR



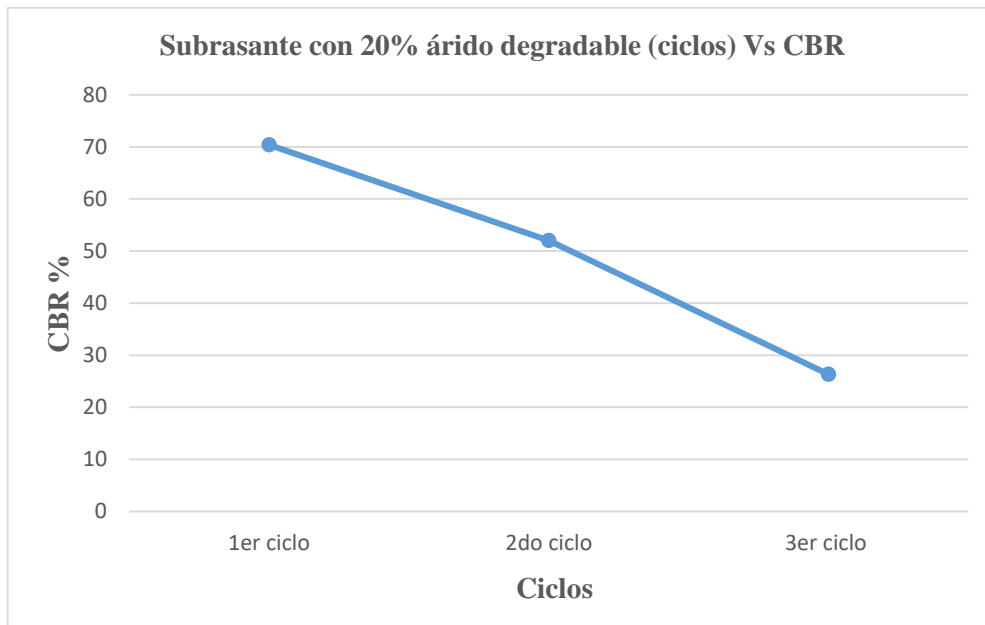
Fuente: Elaboración propia

Grafica 5. Subrasante con 10% de árido degradable



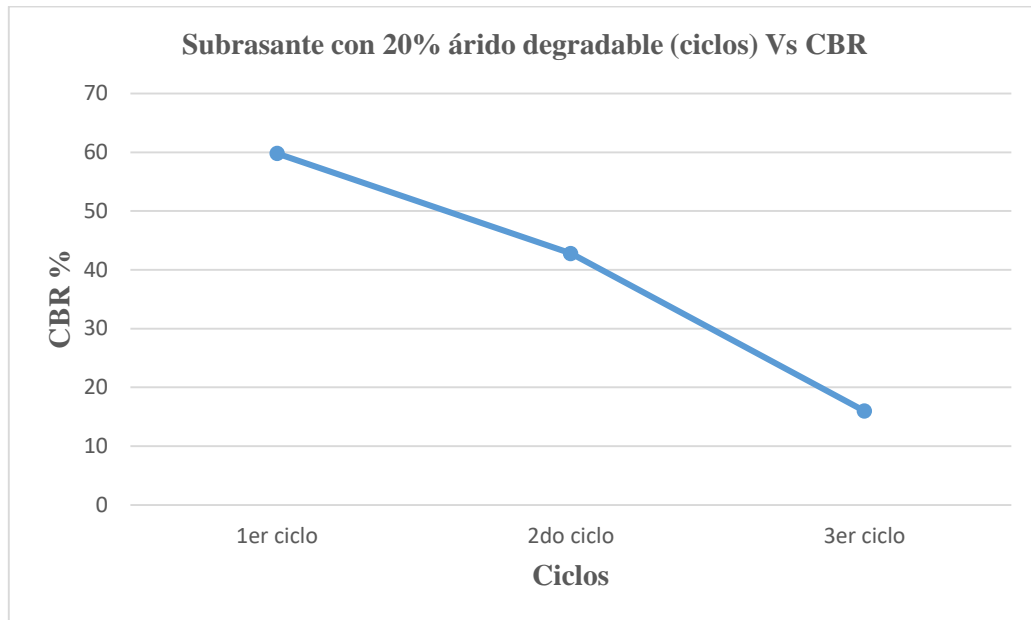
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6. Subrasante con 20% de árido degradable



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7. Subrasante con 30% de árido degradable



Fuente: Elaboración propia

Las limitaciones del uso de los áridos degradables son los siguientes:

Taludes: Pueden ser utilizados en taludes mientras no haya precipitaciones pluviales prolongadas porque debido a las infiltraciones provoca una reducción en las tensiones capilares hasta el punto que se produzca inestabilidad, lo cual se recomienda utilizar en zonas secas.

Cimentaciones: Las limitaciones del uso del árido degradable son debido a las expansiones o contracciones que puedan ocurrir.

Camino: Los suelos residuales que contengan arcillas son inestables por su resistencia inadecuada por su cambio volumétrico o la pérdida de resistencia con el humedecimiento.

Hay una serie de dificultades al utilizar el árido degradable como material de construcción siendo la variabilidad en la roca madre y la extensión de la meteorización, la variación en el contenido de humedad entre el suelo in situ y la del secado provocando un cambio de las propiedades del mismo; los agregados de las partículas del suelo tienden a romperse con el trabajo mecánico cambiando las propiedades del mismo.

4.3. Análisis estadísticos de los valores de CBR

Prueba de hipótesis t

CBR subrasante en el 3er ciclo

CBR subrasante con 30% árido

Degradable en el 3er ciclo

Media = 48.96 %

Media = 16.47 %

$$H_0 = \overline{X}_p \leq \overline{X}_{ad}$$

$$H_1 = \overline{X}_p > \overline{X}_{ad}$$

Grado de libertad

$$g = (n-1)$$

$$g = 1$$

Nivel de significancia

$$\alpha = 0.05 \quad (5\%)$$

$$NC = 95\%$$

Valor crítico

$$t_{(1-\alpha)*(n-1)} \rightarrow \text{Unilateral a la derecha}$$

$$t = 6.31$$

t de prueba

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum(X_1 - \bar{X})^2}{n-1}} \rightarrow \text{Desviación estándar}$$

$$Sd = 2.73$$

$$t = \frac{\overline{X}_p - \overline{X}_{ad}}{\frac{Sd}{\sqrt{n}}}$$

$$t = 16.83$$

Probabilidad

Pvalor = 0.019

Se rechaza la hipótesis nula y el valor-P, para esta prueba es menor que 0.05. Se puede rechazar la hipótesis nula con un 95.00% de confianza.

4.4. Análisis de resultados

4.4.1. Análisis de los suelos estudiados

Tabla 27. Resultados CBR

Resultados CBR						
		Subrasante	Árido degradable	10%	20%	30%
Densidad máxima	gr/cm ³	2.05	2.18	2.07	2.09	2.16
Humedad óptima	%	9.17	7.12	9.09	8.85	8.64
CBR	%	44.73	11.22	40.32	35.07	28.52

Fuente: Elaboración propia

Subrasante

Suelo que fue extraído de Sella Quebrada, de acuerdo a la calificación es un suelo A-1-b bien graduado.

Con respecto al CBR de laboratorio obtenido para este suelo es de 44.73% siendo una subrasante muy buena cumpliendo con los parámetros del manual de ensayo de suelos para ser utilizado.

Después de realizados los ensayos, los resultados arrojan que el material de subrasante tiene una granulometría bien graduada lo que permite una buena compactación al incluir el árido degradable a la subrasante.

Los límites del material subrasante no presentan límite líquido ni plástico.

Árido degradable

Suelo que fue extraído de Iscayachi, de acuerdo a la clasificación es un suelo A-4.

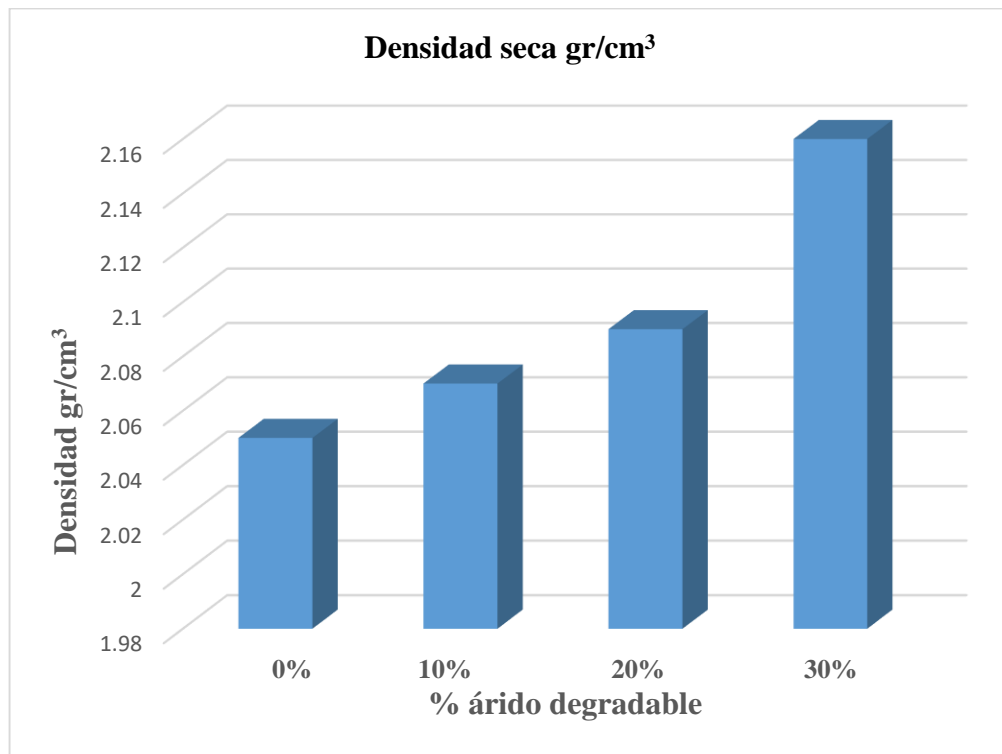
Con respecto al CBR de laboratorio obtenido para este suelo, es de 11.22% siendo un suelo no apto.

Después de realizar los ensayos los resultados nos arroja que presenta límite líquido y plástico presentando una humedad óptima menor que la subrasante.

Subrasante con árido degradable

Se observa que el porcentaje de CBR disminuye con la adición de 10% y disminuye más con la adición de 20% y 30%; podemos observar también que a medida que se aumenta el porcentaje de mezcla del árido degradable aumenta la densidad de nuestro material.

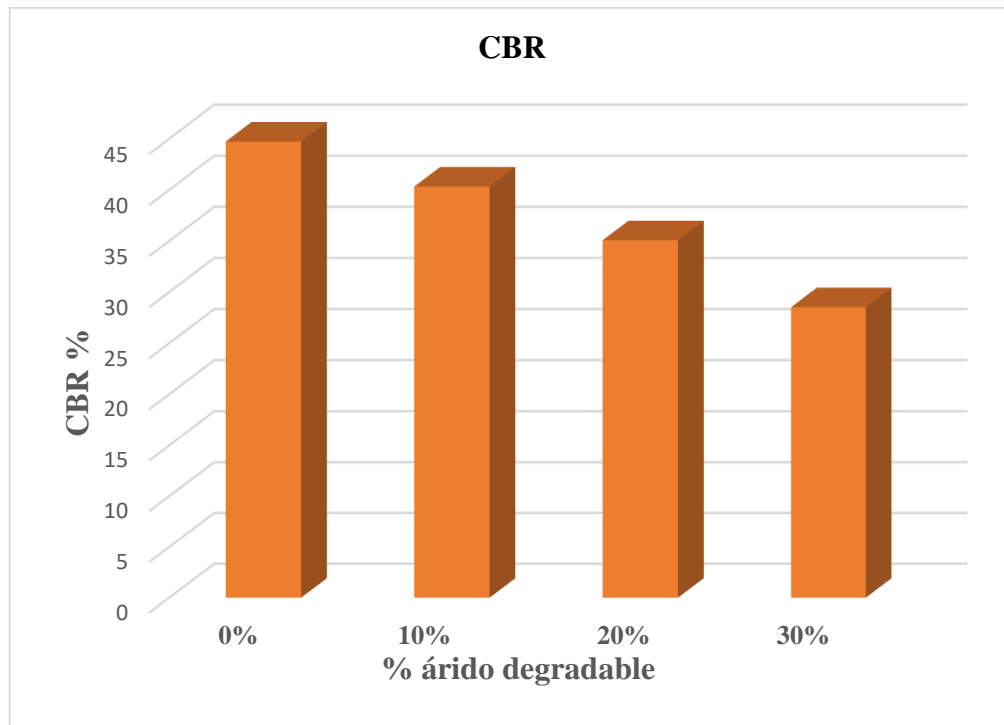
Gráfica 8. Densidades en las diferentes combinaciones de CBR



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que las densidades aumentan de acuerdo a la cantidad de árido degradable que tiene.

Gráfica 9. CBR de subrasante con árido degradable



Fuente: Elaboración propia

Los valores de las mezclas al 10%, 20% y 30% cumplen con el valor mínimo según los parámetros de la subrasante, reportando el valor de 40.32%, 35.07% y 28.52% de soporte, lo que se observa que el valor del CBR disminuye de manera gradual de acuerdo a la cantidad de árido degradable que tenga.

4.4.2. Análisis de los CBR en ciclos continuos de saturación y secado

Se muestra en la siguiente tabla los resultados de CBR sometidos a ciclos continuos de saturación y secado con 10%, 20% y 30 % de árido degradable en el suelo subrasante.

Tabla 28. Valores de CBR a diferentes % de árido degradable en ciclos continuos de saturación y secado

Resumen de valores de CBR de subrasante y mezcla a diferentes porcentajes de árido degradable en ciclos de saturación y secado								
Ciclo	% de árido degradable	Nro. de golpes	Humedad (%)	Densidad seca (gr/cm ³) antes del secado	Densidad seca (gr/cm ³) después del secado	CBR a 0.1".	CBR a 0.2"	CBR 100%
1	0%	56	0.00	2.05	1.92	92.86	151.03	88.28
		25	0.00	2.03	1.89	69.91	106.47	
		12	0.00	1.96	1.83	32.00	47.27	
	10%	56	0.00	2.09	1.93	83.88	146.38	80.61
		25	0.00	2.04	1.88	64.92	104.47	
		12	0.00	1.99	1.86	29.00	41.95	
	20%	56	0.00	2.11	1.98	69.91	131.74	70.41
		25	0.00	2.04	1.90	44.97	75.21	
		12	0.00	1.97	1.85	15.03	36.63	
	30%	56	0.00	2.18	2.03	61.93	92.50	59.81
		25	0.00	2.08	1.95	38.98	61.90	
		12	0.00	1.99	1.87	20.02	34.63	
2	0%	56	0.00	2.08	1.93	76.89	131.08	71.94
		25	0.00	2.04	1.90	59.93	93.17	
		12	0.00	1.96	1.82	19.03	38.62	
	10%	56	0.00	2.08	1.90	69.91	93.17	65.30
		25	0.00	2.04	1.89	50.95	69.22	
		12	0.00	1.97	1.87	15.03	36.63	
	20%	56	0.00	2.12	2.02	49.95	69.89	52.01
		25	0.00	2.06	1.96	31.00	52.59	
		12	0.00	1.99	1.86	14.04	27.32	
	30%	56	0.00	2.19	2.05	44.97	69.22	42.80
		25	0.00	2.09	1.93	26.01	49.27	
		12	0.00	2.03	1.90	10.05	26.65	
3	0%	56	0.00	2.09	1.95	49.95	83.19	47.51
		25	0.00	2.02	1.87	31.00	57.91	
		12	0.00	1.97	1.82	13.04	39.95	
	10%	56	0.00	2.11	1.94	39.98	65.90	39.75
		25	0.00	2.06	1.88	28.00	49.27	
		12	0.00	2.01	1.86	11.04	28.65	
	20%	56	0.00	2.12	1.96	26.01	49.93	26.33
		25	0.00	2.05	1.89	17.03	37.96	
		12	0.00	2.01	1.87	9.05	21.33	
	30%	56	0.00	2.17	1.98	16.03	37.96	15.99
		25	0.00	2.08	1.91	12.04	26.65	
		12	0.00	1.99	1.84	7.05	14.01	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Resumen CBR en ciclos de saturación y secado

CBR ciclos saturado y secado			
	1er	2do	3er
0%	88.28	71.94	47.51
10%	80.61	65.30	39.75
20%	70.41	52.01	26.33
30%	59.81	42.80	15.99

Fuente: Elaboración propia

- **Primer ciclo de saturación y secado**

Para realizar los ciclos de saturación y secado se procedió a que una vez realizado el CBR se satura de manera normal a los 4 días, una vez saturado se pesa el molde y se procede al secado.

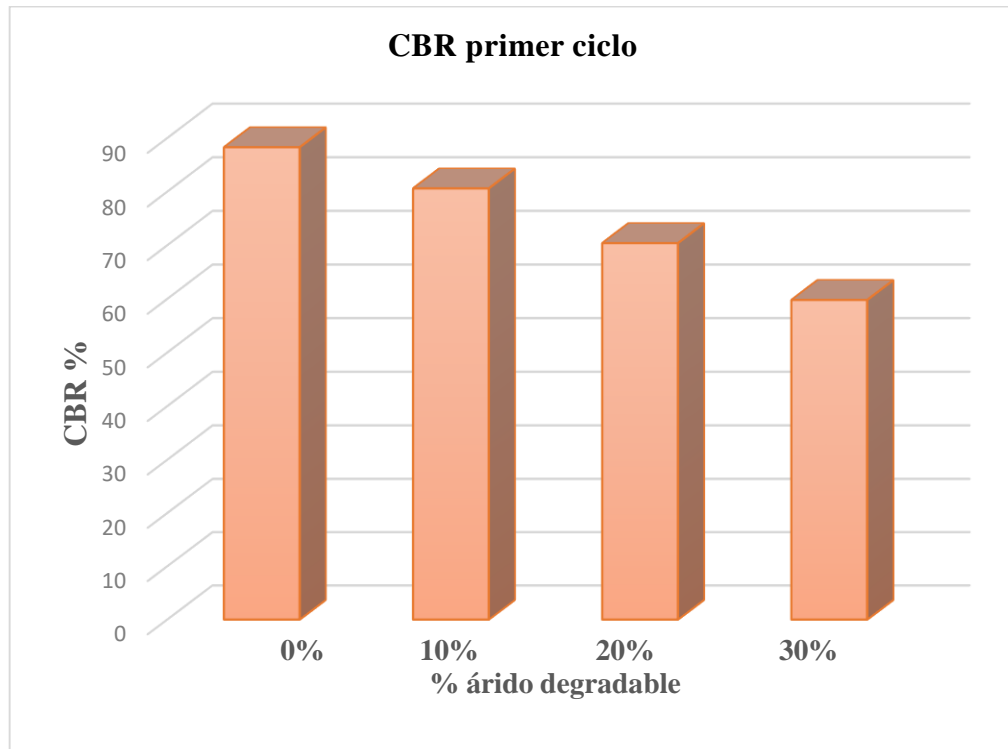
El suelo del molde está completamente seco cuando éste mantiene su peso, luego se procedió a llevarlo a la prensa de CBR para su lectura. Este sería el procedimiento para el primer ciclo.

Del primer ciclo de saturación y secado podemos apreciar que el CBR del suelo subrasante es de 88.28 %, los CBR de los suelos de la subrasante más el árido degradable tuvieron una resistencia de 80.61%, 70.41% y 59.81% de acuerdo a la cantidad de árido degradable que tenían siendo de 10%, 20% y 30% de este árido en la subrasante.

Se observa que la densidad de la subrasante disminuye de la densidad inicial; era del orden 1.96gr/cm³ para el molde de 12 golpes, 2.03gr/cm³ para el molde de 25 golpes y 2.05gr/cm³ para el molde de 56 golpes; pero al final del primer ciclo se encuentran en 1.83gr/cm³, 1.89 gr/cm³ y 1.92 gr/cm³ en cada molde. De igual manera ocurre en la subrasante con árido degradable.

Al final del primer ciclo podemos ver cómo disminuye la densidad y los resultados de CBR en cada adición del árido degradable a la subrasante, teniendo una subrasante de 88.28% de relación de soporte y al llegar a los 30% de combinación este llega a tener un CBR de 59.81%.

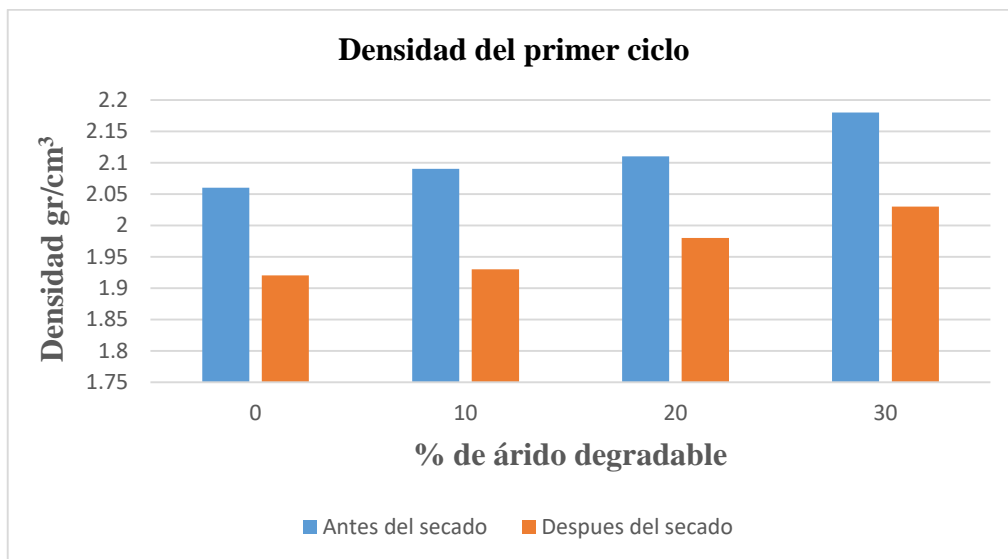
Gráfica 10. CBR en primer ciclo



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar cómo van disminuyendo los CBR en el primer ciclo.

Gráfica 11. Densidad del primer ciclo



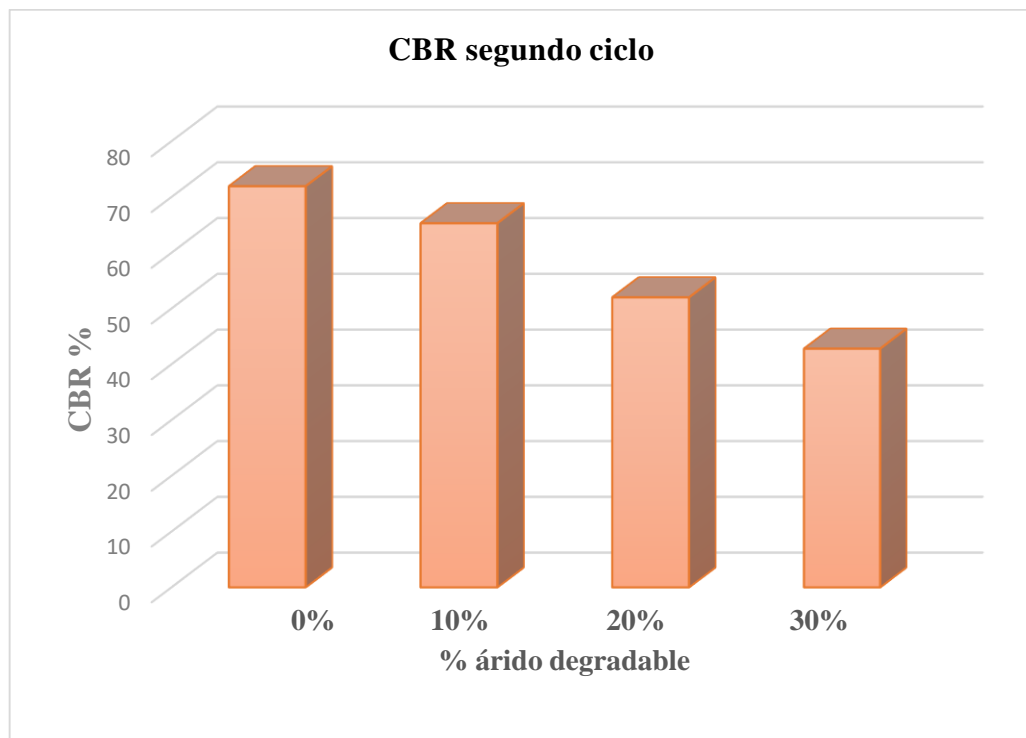
Fuente: Elaboración propia

- **Segundo ciclo de saturación y secado**

Para el segundo ciclo después de terminado el primer ciclo se procede a saturar el suelo sumergiendo al agua durante 4 días y luego hacer el secado y proceder a la lectura en la prensa.

En este ciclo la subrasante disminuyó su CBR a 71.94%, mientras que los resultados para la subrasante con árido degradable fueron de 65.30%, 52.01% y 42.80%, demostrando que en este ciclo disminuyeron más por los cambios de saturación y secado que tuvieron.

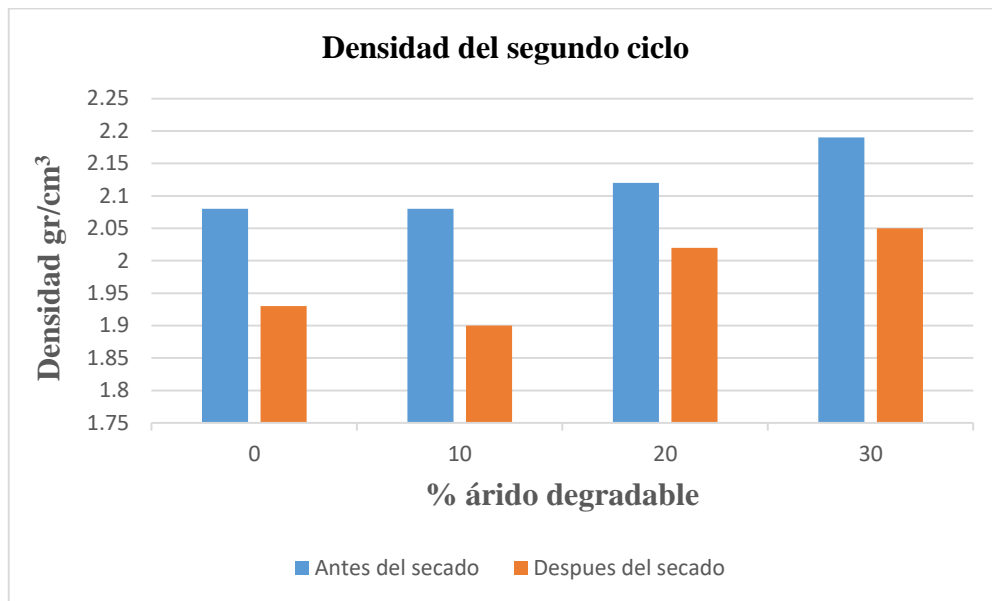
Gráfica 12. CBR segundo ciclo



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar cómo disminuye el CBR en el segundo ciclo de acuerdo a los porcentajes de árido degradable que tiene la subrasante.

Gráfica 13. Densidad del segundo ciclo



Fuente: Elaboración propia

- **Tercer ciclo de saturación y secado**

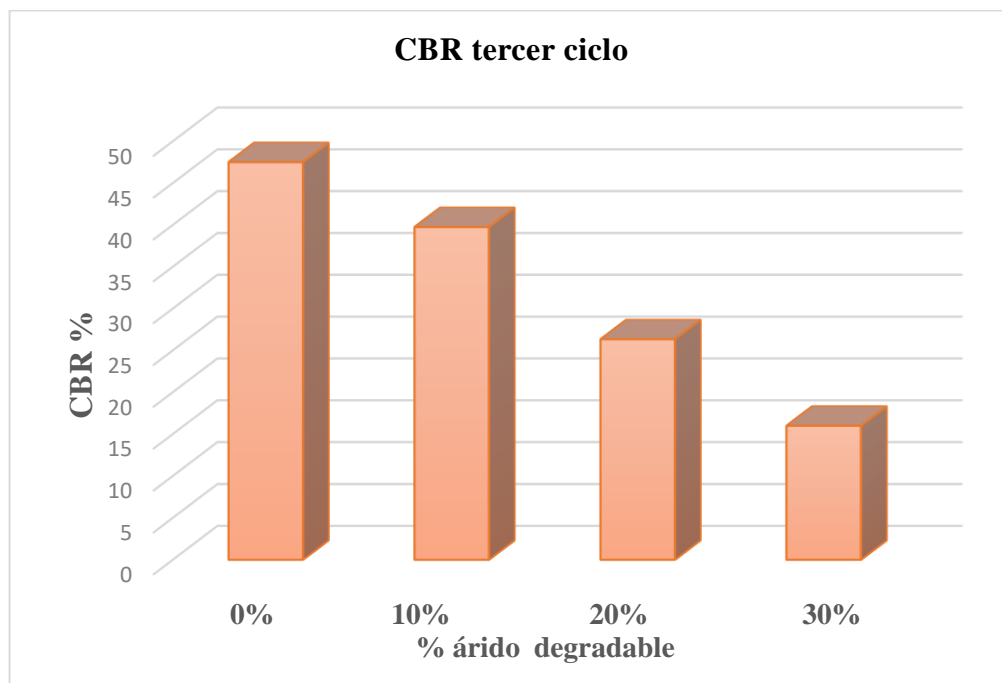
El secado de los moldes es el proceso más largo en cada ciclo hasta que esté totalmente seco; para este ciclo se procede a saturar de nuevo el molde y luego al secado para ser lecturado en la prensa de CBR.

En este ciclo se observa cómo también disminuye la densidad siendo el mismo comportamiento que mostró en los anteriores ciclos, señalando una tendencia a disminuir sus humedades en cada ciclo de saturación y secado.

También disminuye más su resistencia en cada porcentaje de suelo combinado, siendo que en el suelo con 30% de árido degradable afecta más y en cada ciclo.

La subrasante para el tercer ciclo fue de 47.51%, mientras que los CBR para la subrasante con árido degradable, de igual manera, disminuían teniendo CBR de 39.75%, 26.33% y 15.99% de acuerdo a la cantidad de árido degradable que tienen.

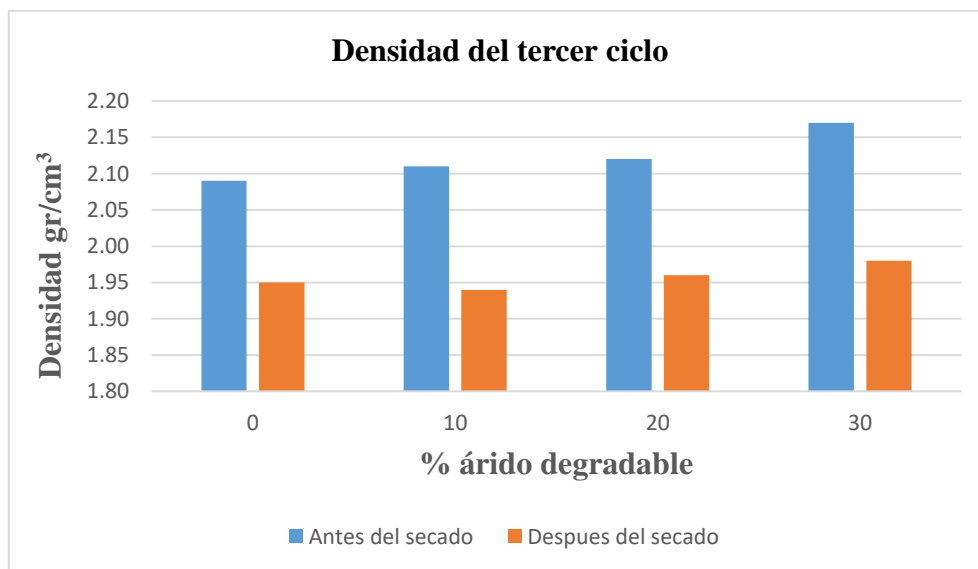
Gráfica 14. CBR tercer ciclo



Fuente: Elaboración propia

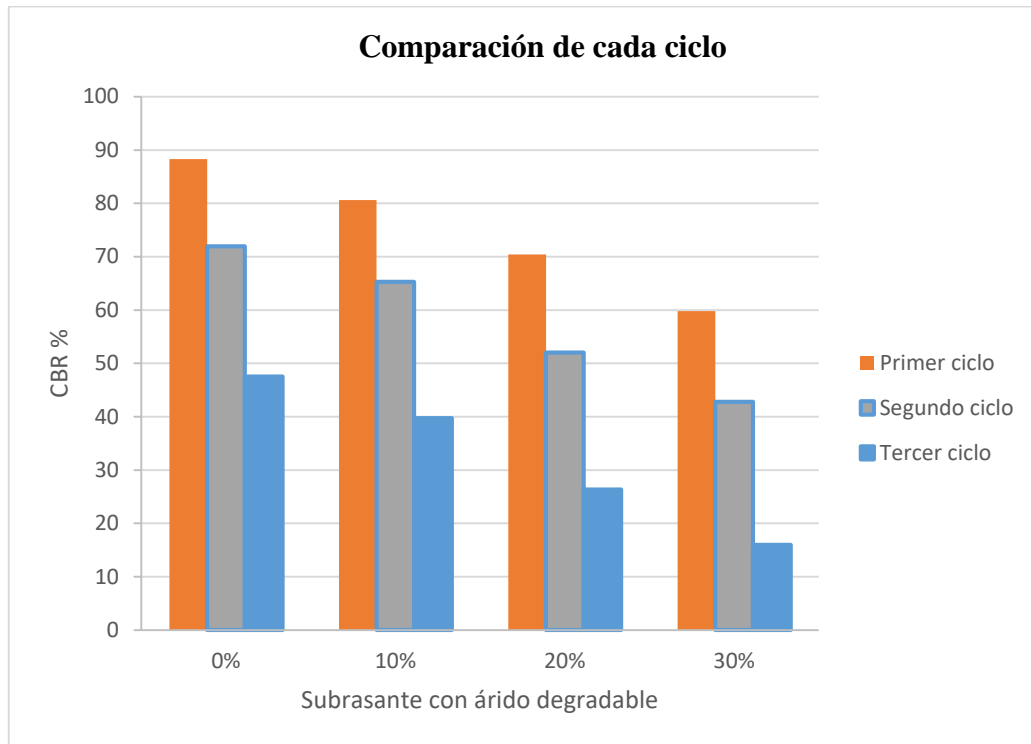
En la gráfica se puede observar los resultados de CBR del tercer ciclo de acuerdo a la cantidad de árido degradable que tienen.

Gráfica 15. Densidad del tercer ciclo



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 16. Gráfica de CBR con los 3 ciclos



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar como varían los CBR de acuerdo a los ciclos y el % de árido degradable en la subrasante.

En el primer ciclo se observa que la subrasante pura tiene un CBR de 88.28%, esta resistencia va reduciendo cuando se añade árido degradable a la subrasante llegando a un CBR de 59.81% con 30% de árido degradable además de sufrir los cambios de saturación y secado; en el segundo ciclo ocurre lo mismo pero los CBR reducen aún más por los cambios de saturación y secado al cual fueron sometidos y lo mismo ocurre en el tercer ciclo reduciendo más sus resistencias por los cambios su sufre el suelo. En todos los ciclos se observa que el árido degradable afecta a la resistencia de la subrasante aún más si se aplica los cambios de saturación y secado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se realizó satisfactoriamente el análisis del comportamiento del CBR de subrasante con árido degradable aplicando ciclos continuos de saturación y secado.

- De acuerdo con los ensayos para la caracterización de los suelos se concluyó que se contaba con un suelo subrasante A-1-b con una resistencia de 45% y un árido degradable A-4 con una resistencia de 11%, según el sistema de clasificación AASHTO.

- Las adiciones del árido degradable al suelo subrasante fueron de 10%, 20% y 30% para analizar su comportamiento que produce el árido degradable; de igual manera se realizó la caracterización con la combinación de suelos para tener la humedad óptima con la que se realizó los CBR en ciclos.

- Los ensayos de CBR aplicando ciclos continuos de saturación y secado nos demuestran cómo afectan a la resistencia estos cambios al suelo, también se observa cómo el árido degradable afecta al suelo subrasante haciendo que estos pierdan su resistencia de acuerdo al porcentaje de árido degradable de tenga.

- Con los resultados obtenidos de los ensayos de CBR verificamos que es muy importante en la ingeniería el análisis del árido degradable ya que nos muestra la manera cómo puede afectar este tipo de árido a la subrasante.

- Las densidades secas fueron disminuyendo de acuerdo al % de árido degradable que presentan. Es decir con mayor cantidad de árido degradable en la subrasante su densidad seca aumenta más.
- Se logró establecer una confiabilidad de 95.00% en los ensayos de CBR sometidos a ciclos continuos de saturación y secado en subrasante con el árido degradable.
- Aunque en la naturaleza el suelo no llega a un secado al 100%, realizar un estudio sobre estas condiciones nos permite conocer cómo afecta a la resistencia de un suelo y tomarlo en cuenta al momento de diseñar y construir un pavimento para así poder calcular y diseñar una vida útil más larga.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda profundizar los estudios sobre el árido degradable con otros tipos de suelo, para conocer si estos podrían ser utilizados en algún momento de acuerdo a la vida útil que se requiera.
- Para el proceso de secado se debe controlar el peso de los moldes, unas dos veces por día hasta que mantenga el mismo peso para estar seguros que la muestra está totalmente seca.
- Es importante dar mantenimiento al equipo prensa CBR para obtener valores correctos y precisos.

- Conociendo el comportamiento del árido degradable se podría tener en cuenta al momento de la construcción de caminos si desean utilizarlo, porque este tipo de árido no sería recomendable aplicarlo en vías de alta transitabilidad y carga pesada pero sí se podría utilizar en vías de carga liviana pero con la advertencia que no tendría la misma vida útil que utilizando materiales de óptima calidad.