

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Evaluación exploratoria de la caracterización mecánica e hidráulica de un material granular marginal a emplear en estructuras de pavimento

Roymar Alberto Gelves Galvis

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Geotecnia

Director

Alex Eduardo Alvarez Lugo, Ph.D.

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Geotecnia

Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Sirvan estas primeras líneas para expresar mi sincero agradecimiento a los ingenieros Alex Eduardo Alvarez Lugo y Vladimir Ernesto Merchan quienes me brindaron su apoyo durante todo el proceso y compartieron sin mesuras sus conocimientos para colaborar en el desarrollo de este proyecto.

Al personal técnico que labora en las instalaciones de los laboratorios para materiales de la construcción de la Universidad Industrial de Santander quienes me colaboraron de la manera más cordial durante la fase experimental.

Finalmente a mi familia, especialmente a mis padres y a mi pareja quienes fueron apoyo fundamental tanto económico como emocional durante todo mi proceso académico.

Tabla de Contenido

<i>Introducción</i>	11
<i>Objetivos</i>	14
Objetivo General	14
Objetivos Específicos	14
<i>CAPÍTULO 1: ASPECTOS TÉCNICOS SOBRE MATERIALES GRANULARES CONVENCIONALES Y MARGINALES EN CAPAS DE SUBBASE Y BASE</i>	15
1.1 Propiedades principales que definen las especificaciones técnicas en materiales granulares de subbase y base.....	15
1.2 Especificaciones para el material de subbase	17
1.2.1 Instituto nacional de vías (INVIAS) - Colombia.....	18
1.2.2 Ministerio del fomento-España	19
1.2.3 Oficina nacional de normalización (NC) - Cuba.....	22
1.2.4 Ministerio de transporte y comunicaciones - Perú	23
1.2.5 Ministerio de obras públicas -Chile.....	23
1.2.6 FHWA y AASHTO - Estados Unidos.....	24
1.2.7 Transit New Zeland (TNZ) -Nueva Zelanda	25
<i>CAPITULO DOS: ANTECEDENTES, CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES</i>	33
2.1 Compactación	33
2.2 Módulo resiliente.....	38
2.2.1 Factores que influyen en el comportamiento del módulo resiliente:.....	40

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

2.2.1.1 Estado de esfuerzos	41
2.2.1.2 Relación entre succión y contenido de humedad.....	42
2.2.1.3 Efecto de la granulometría y el contenido de finos	45
2.3 Deformación permanente	46
2.4 Materiales granulares estabilizados	48
2.5 Nuevos métodos de clasificación de materiales granulares.....	51
<i>CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE MATERIAL GRANULAR MARGINAL</i>	55
3.1 Geología	56
3.2 Calidad del material granular marginal	58
3.2.1 Compactación	63
3.3 Módulo resiliente.....	68
3.4 Análisis granulométrico.....	74
3.5 Succión	76
<i>CONCLUSIONES</i>	80
<i>RECOMENDACIONES</i>	82
<i>Bibliografía</i>	84
<i>APENDICES</i>	89
Apéndice A, protocolo de adición de agua.....	89

Lista de Tablas

Tabla 1	18
<i>Requisitos de los agregados para subbases granulares en Colombia según INVIAS</i>	18
Tabla 2	20
<i>Contenido máximo de materia orgánica según PG 3- 330 -2002</i>	20
Tabla 3	21
<i>Porcentaje de asentamiento en el ensayo de colapso acorde a PG 3- 330 -2002</i>	21
Tabla 4	21
<i>Requerimientos de expansión (hinchamiento) libre acorde a PG-330-2002</i>	21
Tabla 5	21
<i>Requisitos para materiales de subbases naturales según PG-3</i>	21
Tabla 6	22
<i>Requisitos de calidad para materiales de base y subbase granular en Cuba</i>	22
Tabla 7	23
<i>Requerimientos de ensayos especiales para el material de subbase granular acorde a la norma MTC/14</i>	23
Tabla 8	24
<i>Requisitos mínimos para material de subbase en Chile</i>	24
Tabla 9	24
<i>Requisitos mínimos para materiales de subbase según la FP-14</i>	24
Tabla 10	25
<i>Requisitos mínimos para materiales de subbase según la AASHTO</i>	25
Tabla 11	31
<i>Requisitos mínimos para materiales de subbase granular en diferentes países.</i>	31
Tabla 12	47
<i>Propiedades de las partículas finas contenidas en los dos materiales estudiados por Li et. al (2017)</i>	47
Tabla 13	51
<i>Especificación particular desarrollada para el proyecto concesión vial “Vías del NUS” en Colombia</i>	51
Tabla 14	60
<i>Resultados de ensayos de caracterización del material granular marginal</i>	60
Tabla 15	60
<i>Granulometría original del MGM-in situ</i>	60

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Tabla 16	69
<i>Características de las probetas ensayadas</i>	69
Tabla 17	69
<i>Presión de cámara y número de ciclos aplicados a las probetas</i>	69
Tabla 18	72
<i>Fluctuación de la humedad en el ciclo de humedecimiento</i>	72
Tabla 19	77
<i>Características de las probetas para ensayo de succión.</i>	77
Tabla 20	78
<i>Resultados ensayo de succión por el método de papel filtro</i>	78

Lista de Figuras

Figura 1	19
<i>Criterios de clasificación según la plasticidad del suelo utilizado en terraplenes</i>	19
Figura 2	26
<i>Comparación de las franjas granulométricas superiores (parte fina) para diferentes países.</i>	26
Figura 3	26
<i>Comparación de las franjas granulométricas inferiores (parte gruesa) para diferentes países.</i>	26
Figura 4	28
<i>Límites superiores de las especificaciones para un material de base granular.</i>	28
Figura 5	29
<i>Límites inferiores de las especificaciones para un material de base granular</i>	29
Figura 6	34
<i>Influencia de la humedad en el proceso de compactación</i>	34
Figura 7	35
<i>Curvas de compactación para distintos tipos de suelos compactados con la energía del ensayo de compactación Proctor</i>	35
Figura 8	40
<i>Esfuerzos bajo la carga de un eje vehicular en movimiento</i>	40
Figura 9	41
<i>Variación del módulo resiliente con el esfuerzo de confinamiento Θ</i>	41
Figura 10	44
<i>Curva característica de succión en un suelo.</i>	44
Figura 11	44
<i>Relación entre el módulo resiliente, contenido de agua y succión para una muestra con 10% de finos e índice de plasticidad cero</i>	44
Figura 12	47
<i>Deformación permanente vs número de ciclos de carga para muestras convencionales y marginales secas y húmedas</i>	47
Figura 13	56
<i>Localización del sitio donde fue tomada la muestra de MGM-in situ.</i>	56
Figura 14	57
<i>Geología del sector de la toma de muestra.</i>	57

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Figura 15	61
<i>Análisis granulométrico de la muestra MGM in situ y MGM-1</i>	61
Figura 16	62
<i>Relación densidad unitaria seca vs contenido de humedad</i>	62
Figura 17	65
<i>Probeta compactada mediante la metodología Proctor.</i>	65
Figura 18	66
<i>Altura de la probeta vs giros de compactación</i>	66
Figura 19	67
<i>(a) Compactador giratorio y (b) probeta compactada con el compactador giratorio.</i>	67
Figura 20	70
<i>Módulo resiliente vs esfuerzo de confinamiento para probetas fabricadas mediante los métodos de compactación Proctor y vibración con un 8% de humedad</i>	70
Figura 21	72
<i>Desecador en acrílico de 50x50x50cm</i>	72
Figura 22	73
<i>Módulo resiliente vs esfuerzo de confinamiento para las probetas compactadas por compactación Proctor, giratorio, y por vibración después del ciclo de humedecimiento.</i> ..	73
Figura 23	74
<i>Comparación de los resultados del módulo resiliente con la fluctuación de la humedad para (a) probetas compactadas por Proctor y (b) probetas compactadas por vibración</i>	74
Figura 24	75
<i>Comparación de las granulometrías de las probetas luego de ensayadas</i>	75
Figura 25	77
<i>Probetas para la realización del ensayo de succión, incluyendo (a) probeta compactada por la metodología giratoria y (b) probetas tipo compactadas por vibración y Proctor</i>	77
Figura 26	78
<i>Curva de calibración succión-humedad para humedecimiento de papel filtro</i>	78
Figura 27	79
<i>Ajuste preliminar a la curva de retención</i>	79

Resumen

Título: Evaluación exploratoria de la caracterización mecánica e hidráulica de un material granular marginal a emplear en estructuras de pavimento

Autor: Roymar Alberto Gelves Galvis

Palabras Clave: Material granular marginal, módulo resiliente, compactación, pavimentos.

Descripción: En el desarrollo de proyectos de infraestructura vial se utilizan comúnmente materiales pétreos dentro de los cuales se encuentran las bases y subbases granulares. Estas deben cumplir con ciertos requisitos mínimos establecidos por la normatividad, los cuales pueden variar de un lugar a otro dependiendo de la especificación vigente en cada país y/o región. Sin embargo, existen ciertos materiales que por no cumplir alguno de dichos requisitos son denominados marginales, y no se podrían utilizar para el desarrollo de proyectos de infraestructura vial bajo dicha apreciación. Dado lo anterior, el desarrollo de este proyecto inició con la recolección de información de las especificaciones técnicas de diferentes agencias viales en el mundo para establecer los límites o rangos de dicha marginalidad de los materiales así como la búsqueda de precedentes en el estudio de este tipo de agregados marginales. Posteriormente en una fase preliminar del componente experimental se evaluó la afectación que tiene el método de compactación en la rigidez y la composición granulométrica de una probeta compactada por diferentes métodos utilizando un material granular marginal tipo subbase con el fin de obtener una visión preliminar que permita redireccionar futuros proyectos en el área. Dentro de los principales hallazgos se encontró en la revisión bibliográfica que la mayoría de las especificaciones concuerdan con los valores de desgaste en la máquina de los ángeles (50% máximo) e índice de plasticidad (6% máximo), mientras que parámetros como porcentaje de finos, límite líquido, y CBR no concuerdan para todas las especificaciones. Por otra parte la fase experimental mostró que las probetas disminuyeron aproximadamente de 30% a 40% su módulo cuando fueron sometidas a un proceso de humedecimiento, así mismo a través de ensayos granulométricos se estableció que todas las probetas independientemente del método de compactación presentaron variación en su granulometría luego de ser compactadas y ensayadas en el equipo triaxial.

Evaluación exploratoria de la caracterización mecánica e hidráulica de un material granular marginal a emplear en estructuras de pavimento. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Maestría en Geotecnia. Director: Alex Eduardo Alvarez Lugo. Ph.D. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Ph.D.

Abstract

Title: Exploratory evaluation of the mechanical and hydraulic characterization of a marginal granular material to be used in pavement structures

Author(s): Roymar Alberto Gelves Galvis

Key Words: marginal granular material, resilient modulus, compaction, pavements.

Description: In the development of road infrastructure projects, including bases and sub-bases. These must comply certain minimum requirements established by the regulations, which may vary from one place to another depending on the current specification in each country or region. However, there are certain materials that, because they do not meet any of these requirements, are called marginal, and could not be used for the development of road infrastructure projects under said assessment. Given the above, the development of this project began with the collection of information on the technical specifications of different road agencies in the world to establish the limits or ranges of said marginality of the materials as well as the search for precedents in the study of this type. Of marginal aggregates. Subsequently, in a preliminary phase of the experimental component, the impact of the compaction method on the stiffness and granulometric composition of a specimen compacted by different methods using a subbase-type marginal granular material was evaluated. Among the main findings, it was found in the bibliographic review that most of the specifications agree with the values in the los ángeles machine (50% maximum) and plasticity index (6% maximum), while parameters such as percentage of fines, liquid limit, and CBR do not agree for all specifications. On the other hand, the experimental phase showed that the specimens decreased their modulus by approximately 30% to 40% when they were subjected to a wetting process. Likewise, through granulometric tests, it was established that all the specimens, regardless of the compaction method, presented variation in their granulometry after being compacted and tested in the triaxial equipment.

Introducción

En términos generales, una estructura de pavimento puede estar conformada por una capa de rodadura y por capas de material granular que pueden ser de tipo base, subbase o ambas. Los materiales granulares que conforman dichas capas deben cumplir ciertas características para considerarse óptimos y satisfacer las exigencias de las cargas de tráfico. Dichas características o atributos han sido definidos de forma específica por las agencias viales de cada país y/o región; sin embargo, es común que en las zonas a desarrollar proyectos de infraestructura vial se encuentren materiales pétreos que no cumplen a cabalidad con las especificaciones, por lo que se consideran marginales y son descartados en la construcción de estructuras de pavimentos. Por esta razón, se incrementan los costos de acarreo y construcción de estas estructuras ante la necesidad de utilizar materiales de cantera que cumplan con las especificaciones técnicas y que pueden estar a distancias considerables. Es por ello que muchos investigadores han concentrado sus esfuerzos en el estudio de estos materiales considerados como “marginales”, enfocando sus análisis desde las perspectivas de: entender su marginalidad, mejorar su comportamiento mediante aditivos, y finalmente diseñar una metodología de caracterización particular que permita la utilización de los mismos bajo condiciones específicas.

Para lograr entender el comportamiento de estos materiales es importante analizarlos desde el punto de vista de sus deformaciones resilientes, ya que la estructura de pavimento se encuentra sometida constantemente a cargas dinámicas provenientes del tránsito que conllevan a estas respuestas de deformación. Una de las pruebas utilizadas para simular dicho efecto en el laboratorio, y que permite evaluar la respuesta resiliente de los suelos (e.g.,

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

subbase granular y base granular) ante dichas solicitaciones es el ensayo triaxial dinámico. Este ensayo requiere la fabricación de probetas de diferentes tamaños acordes al material a ensayar. Por lo tanto, el protocolo de compactación es clave para la determinación de la fábrica del material y probablemente controla el comportamiento esfuerzo-deformación ante cargas cíclicas. Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, el estudio del comportamiento de los materiales granulares marginales de subbase parece ser un tema de investigación prometedor para reducir costos de construcción de estructuras de pavimento en vías con bajo tráfico, como las vías terciarias en Colombia. En este sentido, este trabajo de aplicación surge como una primera iniciativa en el oriente colombiano, para establecer un marco de referencia exploratorio para futuras investigaciones que brinde una base teórica y los lineamientos experimentales que enmarquen el desarrollo de posibles proyectos en esta área. Con esta idea, se plantean dos aspectos principales: el primero de ellos constituye una revisión bibliográfica sobre este tipo de materiales y el segundo aspecto, involucra la ejecución de ensayos triaxiales en muestras compactadas con diferentes métodos de compactación y cambios de humedad para visualizar el efecto de estos aspectos en la rigidez y granulometría de estos materiales.

Los principales resultados de este trabajo en términos de la revisión bibliográfica respecto a las especificaciones de materiales granulares de subbase sugieren: a) respecto a la distribución granulométrica de los materiales convencionales, los porcentajes de finos están entre 0% y 12% principalmente. Comparativamente, con la normativa colombiana que estipula este rango de 0% a 15%, estos valores están ligeramente inferiores siendo un poco más estrictos en el contenido de finos de este tipo de material. b) Respecto al desgaste en la

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

máquina de los ángeles (DMA), la mayoría de las especificaciones coinciden en un valor límite de desgaste del 50% como máximo. c) Respecto al índice de plasticidad las especificaciones concuerdan en un máximo del 6% para este ítem excepto por la normatividad Española siendo esta la única presentada que exige un material no plástico. d) En cuanto a los valores de CBR exigidos varían desde 30% al 50% como mínimo exigido en las diferentes especificaciones.

Por otra parte, los principales resultados experimentales desarrollados en este trabajo sugieren: a) para las muestras compactadas en el óptimo, el método de compactación por Proctor mostró los mayores valores de MR, siendo aproximadamente un 27% superiores respecto a las probetas compactadas por vibración. b) Para las muestras sometidas a humedecimiento, en general los resultados sugieren una reducción que varió del 30% al 40% del MR respecto a su condición “as compacted” c) se detectaron cambios en la granulometría para las muestras “post mortem” después de ejecutar los ensayos triaxiales, siendo la probeta compactada por la metodología Proctor la que presentó la mayor variación, aumentando su porcentaje de finos en 5,3 puntos porcentuales.

Objetivos

Objetivo General

Establecer un marco preliminar del comportamiento mecánico e hidráulico de materiales granulares marginales de subbase a emplear en estructuras de pavimento, desde una perspectiva teórica y experimental

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión en la literatura acerca de los materiales granulares marginales y diferentes especificaciones técnicas a nivel mundial.
- Evaluar la rigidez de un material granular marginal compactado por diferentes metodologías y sometidos a cambios de humedad.
- Analizar el efecto que produce cada método de compactación en la distribución granulométrica de las probetas.
- Realizar el cálculo de succión de un material granular marginal compactado por diferentes metodologías

CAÍTULO 1: ASPECTOS TÉCNICOS SOBRE MATERIALES GRANULARES CONVENCIONALES Y MARGINALES EN CAPAS DE SUBBASE Y BASE.

En este trabajo, un Material Granular Marginal (MGM), se define como un material que no cumple con al menos uno de los requerimientos técnicos, en términos de las propiedades ya definidas para materiales convencionales de subbase y base establecidas en la normatividad aplicable en cada país. Por tanto, tomando como punto de partida esta definición, en este capítulo, se realiza una revisión de las especificaciones para materiales convencionales en diferentes latitudes, de manera que se cuente con un marco de referencia global, a partir del cual se analizarán las condiciones de marginalidad de los materiales de subbase granular como objeto de estudio en Colombia.

1.1 Propiedades principales que definen las especificaciones técnicas en materiales granulares de subbase y base.

Cuando se habla de materiales de base y subbase granular se refiere a un conglomerado de partículas de diferentes tamaños (gravas, arenas, y finos) que pueden ser naturales o triturados. Estos materiales son utilizados principalmente en la conformación de las capas inferiores de las estructuras de pavimento y en terraplenes (Rondon & Reyes, 2015). Acorde con Rodríguez & Cáceres (2021) los materiales granulares se clasifican en:

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

- Naturales: son todos aquellos materiales granulares que se utilizan después de un ajuste en su granulometría con el fin de adaptarse a las especificaciones mínimas según sea su uso.
- Triturados: son todos aquellos agregados que pasan por un proceso de trituración, su procedencia puede ser de canteras o de material de arrastre de ríos.
- Artificiales: son todos aquellos agregados originarios de subproductos de procesos industriales o residuos de demoliciones.
- Materiales marginales: son aquellos materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes según la normativa local.

Así mismo, estos agregados pétreos se deben caracterizar y analizar para evaluar su posible uso en proyectos de infraestructura vial. En el diseño y construcción de estructuras de pavimento, específicamente las bases y subbases granulares deben cumplir ciertos requisitos mínimos para su aprobación y posterior uso, de no cumplirlos a cabalidad serán considerados materiales granulares marginales y su uso estará restringido; estos requerimientos están dirigidos al estudio de las propiedades que se presentan a continuación:

- a) Distribución granulométrica: su importancia radica en dar cumplimiento a las especificaciones para los diferentes tipos de agregados utilizados en la construcción de pavimentos, así como para el control de la producción de las mezclas que los contengan, también para el estudio de las relaciones referentes a la porosidad y el empaquetamiento de las partículas.
- b) Dureza: se cuantifica a través de ensayos como la determinación del valor del diez por ciento (10%) de finos, abrasión en la máquina de los ángeles y abrasión en el

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

equipo micro-Deval. Estos ensayos se han utilizado como indicadores de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos, y son asociados a la dureza de las partículas.

- c) Durabilidad: para caracterizar este parámetro uno de los ensayos utilizados es la pérdida de solidez en sulfatos, a través de este ensayo se trata de simular el efecto de la intemperie en los materiales, así como el efecto de la expansión del agua por congelamiento en poros, micro fisuras y fisuras.
- d) Limpieza: se mide a través de ensayos como límite líquido, índice de plasticidad, contenido de terrones de arcillas, terrones deleznales y equivalente de arena. Con estos ensayos se determina la limpieza del material y la proporción de partículas tamaño arcilla y arena en este.
- e) Capacidad de soporte del material: comúnmente caracterizado bajo el ensayo de relación de soporte de California (CBR), el cual generalmente se utiliza como un indicador de la capacidad de soporte del suelo o material granular utilizado en la conformación de estructuras de pavimento.

1.2 Especificaciones para el material de subbase

Es usual que la mayoría de las especificaciones de calidad de materiales para la construcción de pavimentos en cada país o región tiendan a establecer valores mínimos, máximos o rangos de valores de ciertas propiedades como las ya mencionadas anteriormente para un determinado material. Aquellos materiales que superen todos los valores establecidos pueden ser considerados como “óptimos” para la construcción de carreteras, razón por la cual muchos materiales a pesar de no cumplir con una sola de las características y tener un buen comportamiento en cuanto a las demás son considerados no óptimos y pasan a ser parte del

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

grupo de materiales denominados marginales. Sin embargo, como la definición de esta marginalidad está basada en los rangos de valores mínimos y máximos establecidos para cada país o región en particular, se entendería que la clasificación de un material granular como marginal dependerá del lugar geográfico del proyecto donde se vaya a utilizar y las normas que allí rijan como lo mencionan Rodríguez y Cáceres (2021). Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se presentan las especificaciones de materiales granulares tipo subbase definidas por diferentes agencias viales del mundo.

1.2.1 Instituto nacional de vías (INVIAS) - Colombia

En el país la utilización de materiales granulares tipo Subbase está regida por la norma INVIAS 2013 en su capítulo 300, específicamente el artículo 320-13 “subbases granulares” en el cual se dictan las medidas y requisitos mínimos que se deben cumplir a la hora de producir, instalar, y aceptar terraplenes o estructuras de pavimentos con este tipo de materiales. En Colombia se manejan 3 tipos de subbases (Clase A, clase B, y clase C) para el nivel de tránsito 1 (NT1), nivel de tránsito 2 (NT2) y nivel de tránsito 3 (NT3), (bajo, intermedio y alto respectivamente). Las propiedades mínimas que debe cumplir el material para considerarse apto se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Requisitos de los agregados para subbases granulares en Colombia según INVIAS

Ensayo	Norma	Subbase granular		
		Clase A	Clase B	Clase C
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%)	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo micro Deval, máximo (%)	E-238	-	35	30

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Perdida en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%), sulfato de sodio	E-220	12	12	12
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	25	25
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 Y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, máximo	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2	2
CBR (%)	E-148	30	40	40

Nota. Tomado de (INVIAS, 2013)

1.2.2 Ministerio del fomento-España

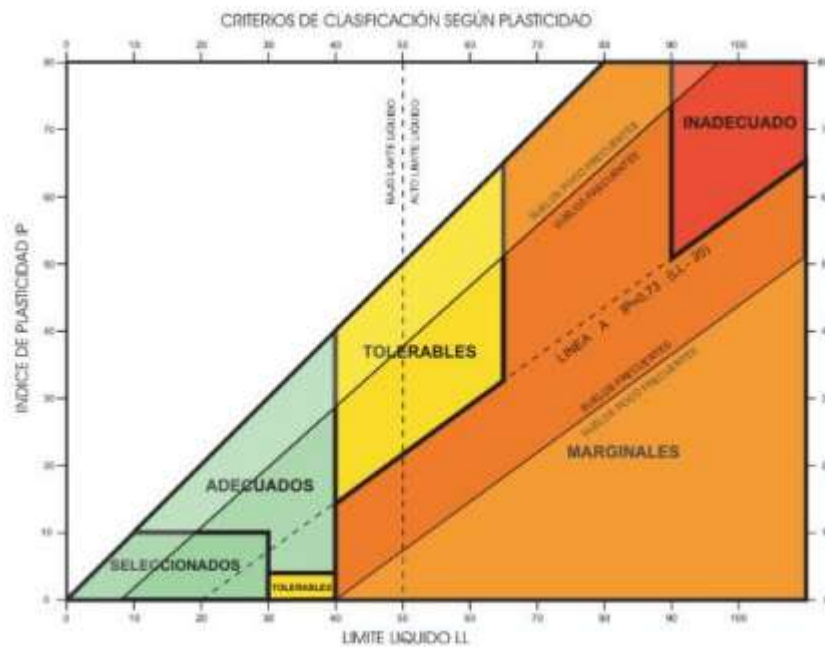
En este país se ha visto una evolución importante en el estudio y uso de los suelos denominados marginales, al punto que en sus especificaciones ya se consideran y se permite su uso en ciertas partes de un terraplén. El artículo 330 del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carretera y puentes (PG-3) (Ministerio del Fomento - España, 2001), clasifica a los suelos en seleccionados, adecuados, tolerables, marginales, e inadecuados. Para realizar esta clasificación se basan en los siguientes criterios:

- a) Plasticidad: conocida como la capacidad de experimentar deformaciones irreversibles sin romperse. En la figura 1 se muestra los criterios de clasificación en esta propiedad índice.

Figura 1

Criterios de clasificación según la plasticidad del suelo utilizado en terraplenes

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



Nota. Tomado de Rodríguez y Cáceres (2021)

- b) Contenido de materia orgánica: la normativa española establece los criterios presentados en la tabla 2.

Tabla 2

Contenido máximo de materia orgánica según PG 3- 330 -2002

Tipo de suelo	Contenido máximo de materia orgánica (%)
Seleccionado	0,20%
Adecuado	1%
Tolerable	2%
Marginal	según apartado 330.4.4.5, pero siempre <5%

Nota. Tomado de Rodríguez y Cáceres (2021)

- c) Colapsabilidad: la tabla 3 muestra los criterios de clasificación en cuanto a este parámetro.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Tabla 3

Porcentaje de asentamiento en el ensayo de colapso acorde a PG 3- 330 -2002

Tipo de suelo	Asiento en el ensayo de colapso (%)
Seleccionado	-
Adecuado	-
Tolerable	< 1 %
Marginal	> 1%

Nota. Tomado de Rodríguez y Cáceres (2021)

- d) Expansibilidad: medido mediante el ensayo de expansión libre; la tabla 4 muestra los valores permitidos para cada tipo de suelo.

Tabla 4

Requerimientos de expansión (hinchamiento) libre acorde a PG-330-2002

Tipo de suelo	Hinchamiento libre (HL %)
Seleccionado	-
Adecuado	-
Tolerable	HL < 3 %
Marginal	3 % < HL < 5 %

Nota. Tomado de Rodríguez y Cáceres (2021)

- e) CBR: el PG-3 establece la posibilidad de utilizar suelos considerados marginales pero que tengan un valor de CBR mayor o igual a 3%.

Así mismo, en esta especificación técnica PG-3 (Ministerio del Fomento - España, 2001), en su artículo 500, se dictan los requisitos mínimos que deben cumplir los materiales conocidos como zahorras naturales o subbases, estos son presentados en la tabla 5.

Tabla 5

Requisitos para materiales de subbases naturales según PG-3

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Ensayo	Requisito
Desgaste en la máquina de los ángeles (máximo)	40% (excepto para el uso ZNA ¹ donde será máximo 50%)
Contenido de terrones de arcilla	0%
Contenido de materia orgánica	0%
Equivalente de arena (mínimo)	30% (excepto para el uso ZNA donde será 25 %)
CBR (mínimo)	20%

¹ZNA hace referencia a una de las franjas granulométricas permitidas para material de Subbase. Tomado de (Ministerio del Fomento - España, 2001)

1.2.3 Oficina nacional de normalización (NC) - Cuba

La norma NC 334: 2004 (Oficina Nacional de Normalización Cuba, 2004) rige el diseño de pavimentos en este país. En su ítem 7.6 se puede apreciar las características mínimas que deben cumplir los materiales de base y subbase para la conformación de pavimentos, las mismas se muestran en la tabla 6.

Tabla 6

Requisitos de calidad para materiales de base y subbase granular en Cuba

Parámetro	Material de base		Material de subbase	
	$\sum N < 5 \times 10^5$ ejes de 100KN	$\sum N > 5 \times 10^5$ ejes de 100KN	Drenaje desfavorable	Drenaje favorable
CBR (mínimo)	60-80%	80-100%	20-30%	20-30%
Límite líquido (máximo)	25%	25%	25%	35%
Índice de plasticidad (máximo)	6%	6%	6%	10%
Equivalente de arena (mínimo)	30%	50%	-	-

Nota. Tomado de (Oficina Nacional de Normalización Cuba, 2004)

Adicionalmente, la NC 334 especifica que cuando los materiales de base o subbase granular posean un índice de plasticidad (IP) superior al 6% deben compactarse como mínimo a una densidad del 95% del valor máximo obtenido en el ensayo Proctor modificado,

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

en caso contrario ($IP < 6\%$) se alcanzarán densidades iguales o superiores al 100% del ensayo de Proctor modificado.

1.2.4 Ministerio de transporte y comunicaciones - Perú

Para este país se tiene el Manual de carreteras “especificaciones técnicas generales para la construcción” R.D. N° 22-2013-MTC/14 (Ministerio de Transporte y comunicaciones Peru, 2013), donde se dictan las medidas y requerimientos a tener en cuenta en el momento de la construcción de carreteras. Para el caso específico de materiales de subbase granular, esta norma en su inciso 402.02 muestra las franjas granulométricas y los tipos de granulometrías que allí se manejan, Así mismo, en la tabla 7 se muestran los requisitos mínimos que deben cumplir estos materiales para considerarse aptos para su uso en la conformación de estructuras de pavimentos.

Tabla 7

Requerimientos de ensayos especiales para el material de subbase granular acorde a la norma MTC/14

Ensayo	Norma MTC	Requerimiento	
		< 3000 msnm	>3000 msnm
Abrasión máquina de los ángeles	MTC E 207	50 % máximo	50 % máximo
CBR	MTC E 132	40 % mínimo	40 % mínimo
Límite líquido	MTC E 110	25% máximo	25% máximo
Índice de plasticidad	MTC E 111	6 % máximo	4% máximo
Equivalente de arena	MTC E 114	25% mínimo	35% mínimo
Sales solubles	MTC 219	1% máximo	1% máximo
Partículas planas y alargadas	-	20% máximo	20% máximo

Nota. Tomado de (Ministerio de Transporte y comunicaciones Peru, 2013)

1.2.5 Ministerio de obras públicas -Chile

Acorde con el Manual de carreteras (Ministerio de obras Publicas de Chile, 2018), en su sección denominada “Subbases granulares” se relacionan los requisitos mínimos para el

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

material de Subbase (granulometría cerrada), aclarando que en zonas que sufren de hielo y deshielo se recomienda la utilización de subbases granulares de granulometría abierta y se aplicará lo expuesto en la tabla 8 con la variante de que el índice de plasticidad podrá ser máximo 4%.

Tabla 8

Requisitos mínimos para material de subbase en Chile

Ensayo	Exigencia	Método
Límite líquido	35 % Máximo	8.102.3
Índice de plasticidad	8% Máximo	8.102.4
Desgaste máquina de los ángeles	40% Máximo	8.202.11
Sales solubles	4% Máximo	8.202.18
CBR	40% Mínimo	8.102.11

Nota. Tomado de (Ministerio de obras Publicas de Chile, 2018)

1.2.6 Federal Highway Administration (FHWA) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en Estados Unidos

Acorde con las especificaciones estándar para la construcción de carreteras y puentes FP-14 de la Administración Federal de Carreteras vigentes en este país, en su numeral 703.0 (Federal Highway Administration, 2014) se dictan los requisitos mínimos que deben cumplir los materiales subbase, los cuales se muestran en la tabla 9.

Tabla 9

Requisitos mínimos para materiales de subbase según la FP-14

Ensayo	Especificación
Abrasión en la máquina de los ángeles (máximo)	50%
Solidez de los agregados en sulfato de sodio (máximo)	12%
Límite líquido (máximo)	25%
Índice de durabilidad (mínimo)	35%
Caras fracturadas (mínimo)	50%
Materia orgánica o contenido de arcillas	0%

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Nota. Tomado de (Federal Highway Administration, 2014)

También en este país la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) presenta los requisitos mostrados en la tabla 10.

Tabla 10

Requisitos mínimos para materiales de subbase según la AASHTO

Ensayo	Especificación
Abrasión en la máquina de los ángeles (máximo)	50%
Límite líquido (máximo)	25%
Índice de plasticidad (máximo)	6%
Contenido de materia orgánica	0%

Nota. Tomado de (AASHTO, 2004)

1.2.7 Transit New Zeland (TNZ) -Nueva Zelanda

En cuanto a los materiales de subbase granular existe la guía TNZ M/3 (Transit New Zeland, 1986) la cual es muy clara en advertir que debido a la gran variabilidad de materiales que pueden ser usados como subbase granular en los diferentes proyectos no es conveniente estandarizar una guía o manual técnico general para este tipo de materiales, así pues esta guía determina que se debe realizar una especificación particular para cada proyecto específico y cada material a usar en el mismo, allí muestran una serie de recomendaciones y chequeos que se deben realizar a la hora de elaborar las especificaciones para cada proyecto.

1.2.8 Análisis Comparativo de las principales especificaciones para la granulometría de un material tipo subbase granular

Finalmente y para ilustrar la gran variabilidad que existe entre los diferentes entes de control, en las figuras 2 y 3 se observan las franjas granulométricas que deben cumplir los materiales de subbase según diferentes países, allí se ve claramente la fluctuación en los

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

valores mínimos exigidos lo que va acorde con lo expuesto en este capítulo pues la marginalidad de un material en cierto punto va a depender del lugar donde se vaya a utilizar y la norma que allí aplique.

Figura 2

Comparación de las franjas granulométricas superiores (parte fina) para diferentes países.

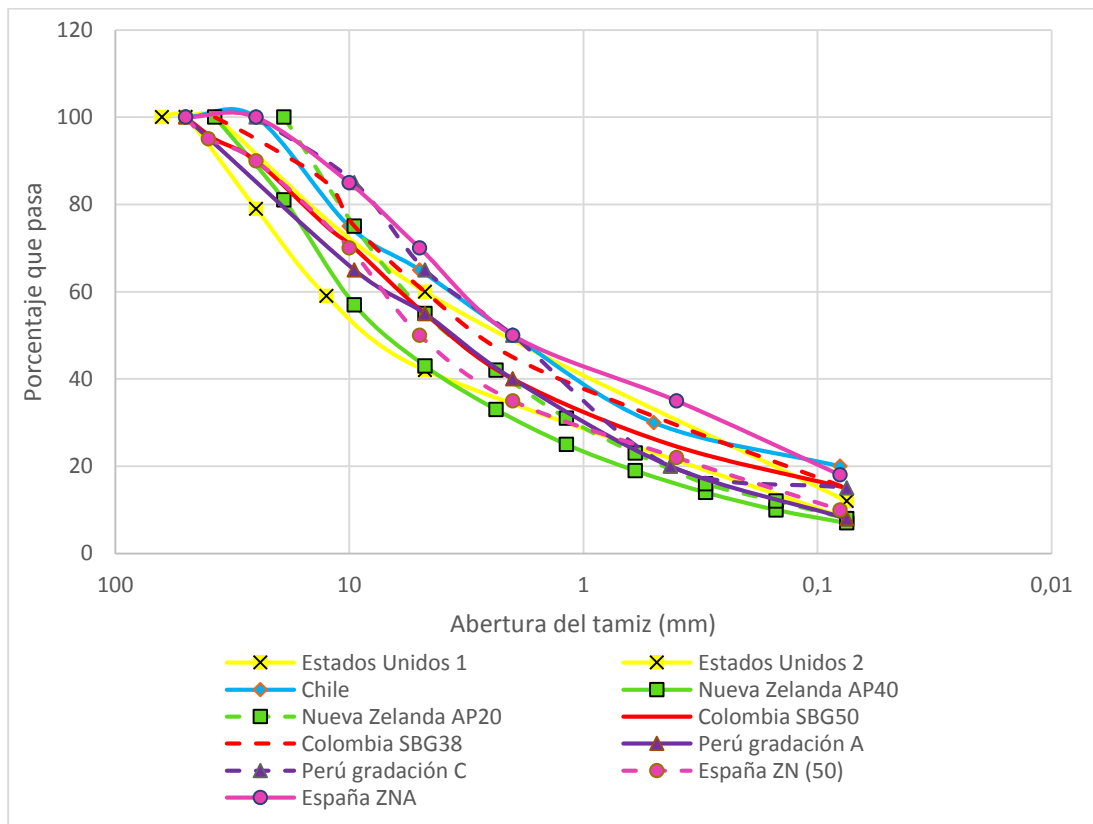
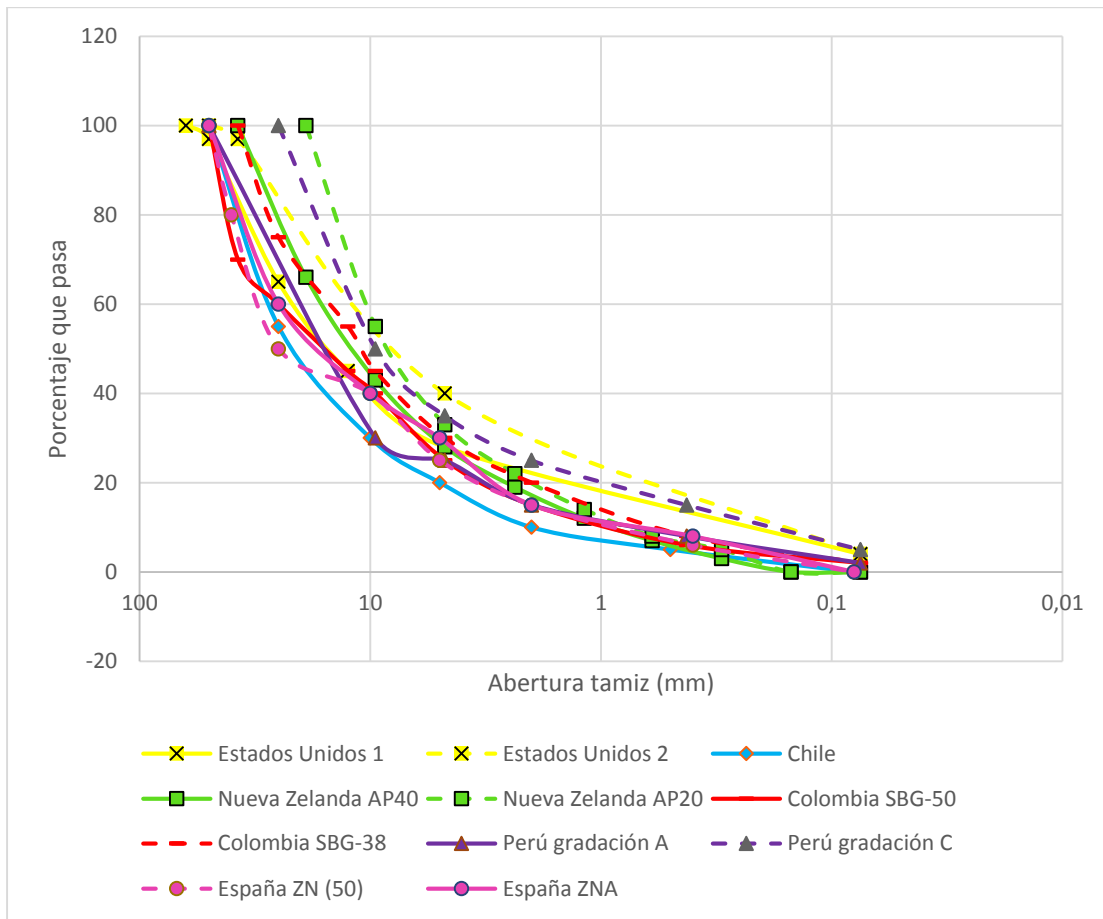


Figura 3

Comparación de las franjas granulométricas inferiores (parte gruesa) para diferentes países.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



En las figuras 2 y 3 se puede observar que la mayoría de las especificaciones tienen definido un tamaño máximo nominal de la partícula de 50mm para el material de subbase granular, sin embargo las diferencias entre las diversas agencias viales ya mencionadas se enmarcan en los tamaños de arenas y finos. Por ejemplo, en cuanto al porcentaje que pasa el tamiz 4,75mm para España se maneja el rango de 25% a 50% muy cercano a su similar en Perú y Colombia que manejan un porcentaje del 25% a 55% , pero un tanto distanciados de países como Estados Unidos y Nueva Zelanda cuyo rango se encuentra establecido del 25% a 43% para el mismo tamiz y material. Así mismo ocurre con los porcentajes de finos, se tiene que países como España manejan un rango de valores que varían del 0% al 12%, mientras tanto Perú maneja unos porcentajes que varían de 2% al 8% para su granulometría gruesa y

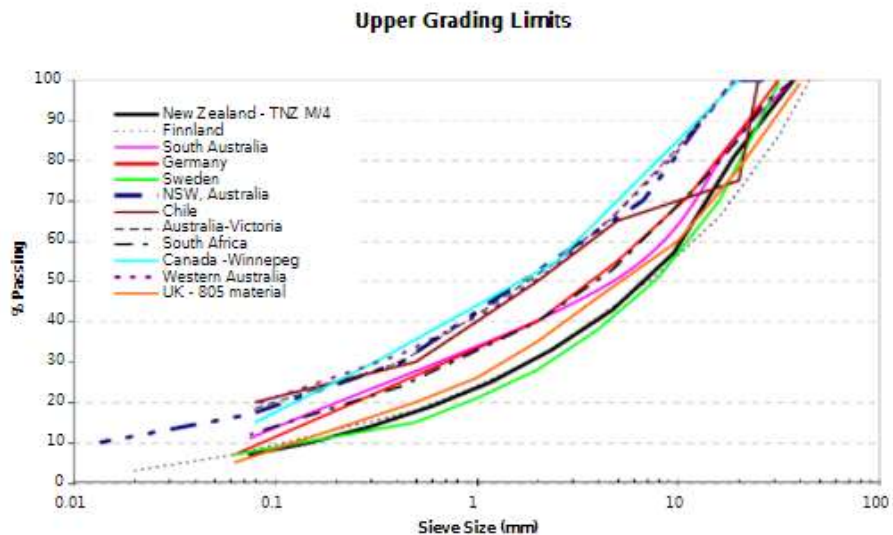
MATERIALES GRANULARES MARGINALES

del 5% al 15% para su granulometría fina, Colombia a su vez maneja un rango que va del 2% al 15%, por otro lado Estados Unidos tiene sus límites establecidos del 4% al 12% de finos y finalmente Nueva Zelanda presenta una de las franjas tal vez más ajustadas en cuanto al porcentaje que pasa el tamiz 0,075mm el cual va desde el 0% hasta el 8%, quedando expuestas una vez más las grandes diferencias que se tienen entre las diversas especificaciones estudiadas.

A manera de comparación y como aporte para referenciar la variabilidad presentada en cuando a los requisitos mínimos estipulados por diferentes países, Arnold et.al (2007) presentan una recopilación de los límites granulométricos de diferentes especificaciones a nivel mundial en esta ocasión para un material de tipo base granular tal como se puede observar en las figuras 4 y 5.

Figura 4

Límites superiores de las especificaciones para un material de base granular.

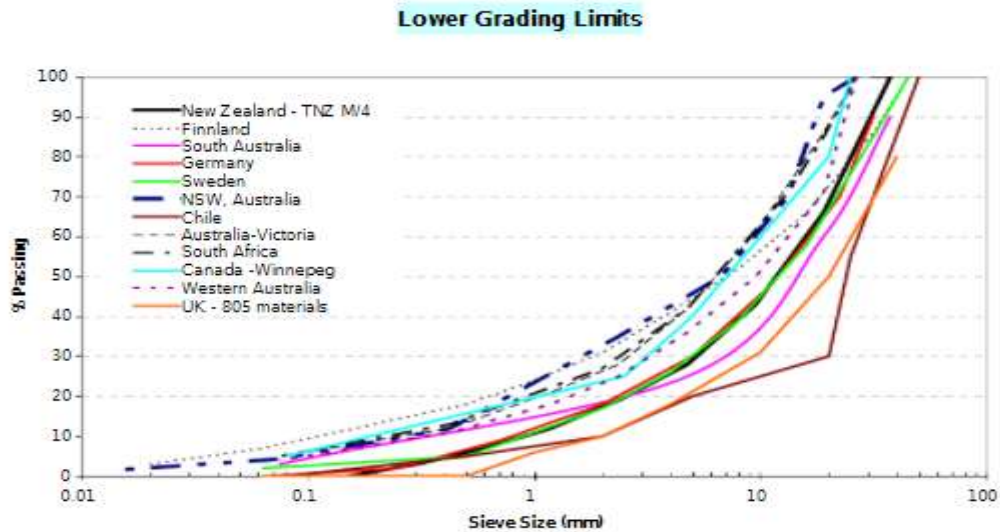


Nota. Tomado de Arnold et al (2007)

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Figura 5

Límites inferiores de las especificaciones para un material de base granular



Nota. Tomado de Arnold et al (2007)

Sin embargo las especificaciones granulométricas no son las únicas que presentan variabilidad de un país a otro es por esto que en la tabla 11 se presenta un resumen con las especificaciones para materiales de subbase granular estipulados por diferentes agencias a nivel mundial; se observa de manera general como de un país a otro cambian los requisitos estipulados para algunas características del material lo que conlleva a que materiales granulares que en cierto país puedan considerarse óptimos en otro país sean considerados marginales por no cumplir a cabalidad sus especificaciones. Un ejemplo claro de esto es el parámetro de desgaste por abrasión en la máquina de los ángeles, el cual para países como Perú, Estados Unidos y Colombia se estipula un máximo de 50% para materiales de subbase granular, mientras en Chile el máximo permitido es 35% y en España el 40%, lo que conduce a que en un escenario hipotético donde se fuese a utilizar un material granular en estos 5 países el cual tenga un porcentaje de desgaste en la máquina de los ángeles de 45%,

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

en Perú, Estados Unidos y Colombia se consideraría óptimo bajo este parámetro mientras que en Chile y España sería considerado un material granular marginal y sería descartado su uso en proyectos de infraestructuras vial. Dada esta situación y debido a la necesidad particular de cada obra, países como Nueva Zelanda recomiendan realizar una especificación particular para cada proyecto lo que abre la posibilidad de utilizar materiales granulares marginales bajo ciertas condiciones acorde a las necesidades del proyecto.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Tabla 11

Requisitos mínimos para materiales de subbase granular en diferentes países.

PAIS	COLOMBIA (INVIAS, 2013)		ESPAÑA (Ministerio del Fomento)	CUBA (NC 334:2004)	PERU (Manual de carreteras, EG-2013)	CHILE (Manual de carreteras, 2018)	ESTADOS UNIDOS		Nueva Zelanda (TNZ: M/3)
	Clase A	Clase B y C	Subbases naturales	Drenaje desfavorable	< 3000 msnm	-	FHWA	AASHTO	recomienda realizar una especificación particular para cada proyecto
Abrasión en la máquina de los ángeles (máximo)	50%	50%	40%	-	50%	35%	50%	50%	
CBR (mínimo)	30%	40%	20%	20% - 30%	40%	50%	-	-	
Límite líquido (máximo)	25%	25%	NP	25%	25%	25%	25%	25%	
Índice de plasticidad (máximo)	6%	6%	NP	6%	6%	6%	-	6%	
Equivalente de arena (mínimo)	25%	25%	30%	-	25%	-	-	-	
Sales solubles (máximo)				-	-1%	4%	-	-	
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio (máximo)	12%	12%	-	-	-	-	12%	-	
Partículas planas y alargadas (máximo)	-	-	-	-	20%	-	-	-	
Caras fracturadas (mínimo)	-	-		-	-		50%	-	

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

<i>Contenido de materia orgánica (máximo)</i>	-	-	0%	-	-	-	0%	0%
---	---	---	----	---	---	---	----	----

CAPITULO DOS: ANTECEDENTES, CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES

Cuando se caracterizan materiales granulares marginales o materiales granulares convencionales para pavimentos, son muchos los factores que de una u otra manera afectan los resultados finales. Es por ello que es importante tener claro qué papel juegan los mismos y como estos se ven afectados por diferentes elementos que podrían cambiar o redireccionar un resultado final. Uno de los objetivos de este proyecto es evaluar preliminarmente la influencia que tienen los métodos de compactación en la rigidez del material, para ello se hizo necesario realizar ensayos de módulo resiliente en el equipo triaxial dinámico a partir de muestras compactadas en el óptimo de la curva de compactación definida para un material específico. A continuación, se presenta una revisión en la literatura sobre algunos de estos factores que de una u otra manera tienen incidencia en el resultado de los ensayos de caracterización, lo cual servirá de base al momento del desarrollo experimental del proyecto.

2.1 Compactación

Uno de los factores que tiene incidencia directa en las propiedades dinámicas de las probetas que se fabricaron es sin duda la metodología de compactación. Adicionalmente, es uno de los parámetros a estudiar en este proyecto ya que se pretende establecer preliminarmente la relación que tendría en el comportamiento dinámico y la distribución granulométrica de las probetas a ensayar. La compactación es ampliamente utilizada en campo para la colocación de suelos y materiales granulares que constituyen terraplenes,

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

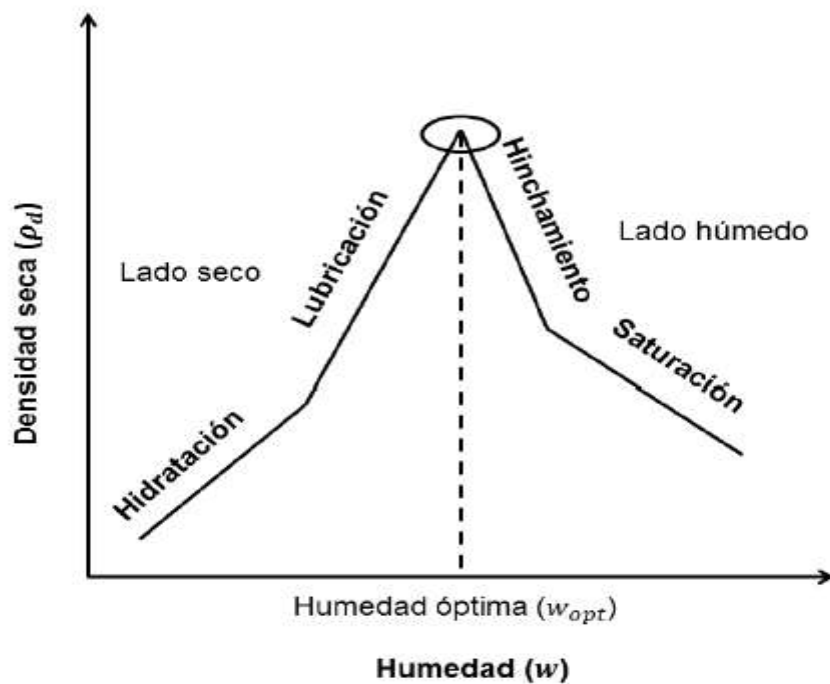
estructuras de pavimentos, presas de materiales y otros. El proceso de compactación se clasifica como un método mecánico de mejoramiento de los materiales, que consiste en la aplicación de energía para disminuir el volumen de vacíos en el material y aumentar su peso unitario así lo expresa Rico & del Castillo (1992).

Cuando se trata de compactación de materiales granulares, existen una serie de factores tanto intrínsecos como externos que afectan su desarrollo. Los principales factores externos que afectan dicho proceso son el método de compactación, la energía transmitida por el mismo y la humedad, siendo este último uno de los más decisivos. Para entender la influencia de la humedad, se puede observar la figura 6, en la que se muestra que, en una primera fase, a medida que aumenta la humedad se incrementa la densidad seca del suelo y se alcanza un mayor porcentaje de compactación. No obstante, se llega a un punto de humedad óptima o de equilibrio a partir de la cual cualquier valor de humedad por encima de la misma generará una disminución en la densidad seca y por lo tanto un menor porcentaje de compactación debido a la sustitución de las partículas sólidas por agua para generarse un hinchamiento del material antes de su saturación.

Figura 6

Influencia de la humedad en el proceso de compactación

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



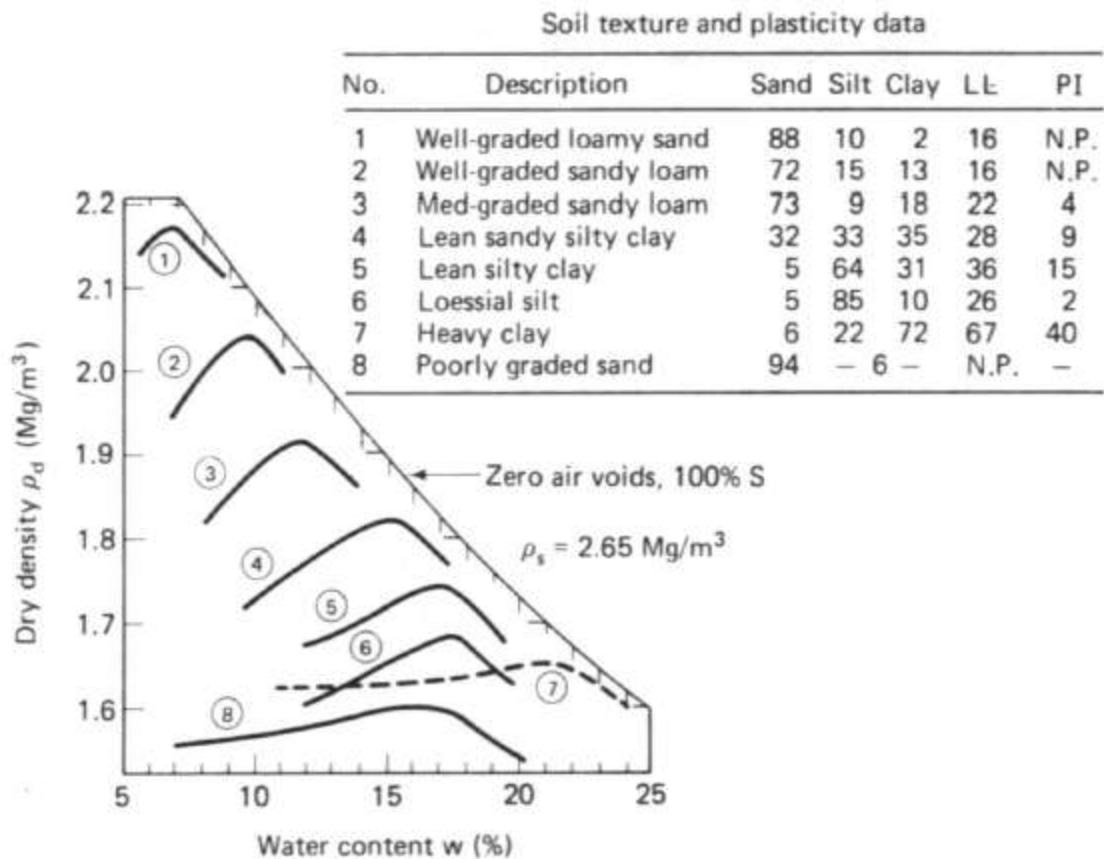
Nota. Tomado de Gomez (2018)

Por otro lado, dentro de los factores intrínsecos más relevantes se encuentra su distribución granulométrica y el contenido de finos. En la figura 7 se puede observar claramente las curvas de compactación para diferentes tipos de suelos y en esta se muestra que cuanto menor sea el tamaño de la partícula mayor es el contenido de humedad óptimo y cuanto mayor sea el tamaño de la partícula mayor será su peso unitario.

Figura 7

Curvas de compactación para distintos tipos de suelos compactados con la energía del ensayo de compactación Proctor.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



Nota. Tomado de Gomez (2018)

Ahora bien, para tratar de simular en laboratorio la compactación ejecutada en campo, se han desarrollado diferentes métodos de compactación en laboratorio entre los cuales se destaca:

a) Compactación por impacto: este método de compactación consiste en la aplicación de energía a través de un martillo que cae libremente desde una altura determinada, conocido como la metodología Proctor.

b) Compactación por amasado: método ideal para la compactación de suelos arcillosos o materiales cohesivos, ya que producen mayores esfuerzos cortantes en toda la

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

masa de la capa de suelo por compactar. Uno de los equipos que simula este tipo de compactación es el compactador giratorio.

c) Compactación Estática: Consiste en la aplicación de presión a través de un pistón el cual transmite la energía a la probeta. Este método se utiliza principalmente en suelos bien gradados que tengan aproximadamente un 20% de finos y para suelos con partículas con tamaño superior a 9.5 mm a los cuales no es conveniente realizar pruebas de compactación por impacto o amasado.

d) Compactación por Vibración: se realiza a través de tablas vibratorias o martillos vibradores; la vibración reduce las fuerzas de fricción inter-particulares generando que las partículas se reacomoden. Comúnmente se obtienen muy buenos resultados en suelos friccionantes (Rojas, 2014).

Como se mencionó, la compactación juega un papel importante en el desempeño de cada material y su efecto puede incidir drásticamente en las propiedades mecánicas del mismo. A este respecto, Alvarez et al. (2019) analizaron el efecto de la recompactación de probetas realizadas con material de subbase granular, entendiendo el procedimiento de recompactación como una sucesión de ciclos de compactación para una misma muestra de material pétreo; para esto emplearon parámetros de caracterización física y mecánica, con el fin de determinar el efecto de la recompactación de las probetas en términos de granulometría y en la respuesta mecánica (CBR, parámetros obtenidos de triaxial estático y módulo resiliente) del material. Para el desarrollo del proyecto se utilizaron 4 muestras de subbase granular obtenidas de diferentes fuentes de producción y el objetivo final fue evaluar los efectos de procesos sucesivos de compactación como mecanismo para generar deterioro

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

en las muestras y simular el daño generado por los procesos de recompactación en campo y cargas repetidas de tránsito. Como resultado encontraron que los materiales se degradaron por la compactación sucesiva generando cambios en su granulometría lo que se vio reflejado en la disminución de la respuesta mecánica del material. Sin embargo, es de anotar que la primera recompactación podría incidir positivamente en la resistencia al corte del material.

Por otra parte, se observó que no existe una influencia de la recompactación en el peso unitario seco de las muestras analizadas, ya que este permanecía constante o incluso se incrementaba un poco con los sucesivos procesos de compactación, por lo que, si se obtuviera un peso unitario bajo en campo y se decidiera disgregar y recompactar, la pérdida en el desempeño de los materiales podría ser apreciable a pesar de obtener densidades mayores. Adicionalmente teniendo en cuenta los resultados encontrados se podría pensar que un material que inicialmente se consideró óptimo bajo los parámetros de granulometría, después de uno o varios procesos de recompactación finalmente sea considerado marginal dados los cambios en su distribución granulométrica.

2.2 Módulo resiliente

Uno de los parámetros utilizados para la caracterización mecánica de un material granular es el módulo resiliente, el cual es un indicador de la rigidez del material y se puede definir como la relación que existe entre la magnitud del esfuerzo desviador cíclico en compresión triaxial y la deformación axial recuperable o resiliente. Este parámetro se ve afectado por múltiples factores tanto intrínsecos como externos del material pétreo evaluado, de allí la necesidad de conocer su comportamiento y el efecto que cada uno de estos factores genera en el comportamiento resiliente de las capas granulares utilizadas en la estructura del

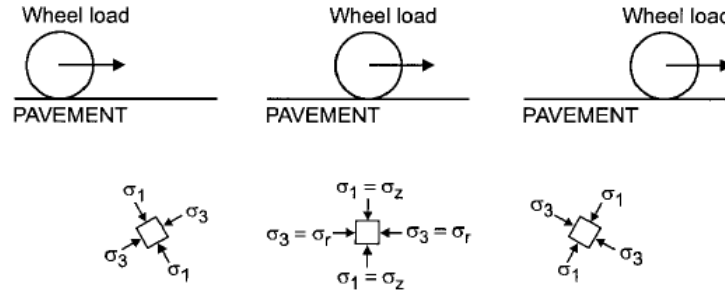
MATERIALES GRANULARES MARGINALES

pavimento pues de esto dependerá que se logre simular en laboratorio las condiciones que experimentará el material en campo. Dicha estructura de pavimento está conformada por capas de material granular y una capa de rodadura (e.g., concreto asfáltico, concreto hidráulico, o adoquines-arena de sello-arena de soporte) y en conjunto son las encargadas de disipar los esfuerzos generados por el tránsito. Estos esfuerzos generan en las capas estructurales y subrasante deformaciones tanto resilientes como permanentes. Sin embargo, la mayoría de métodos para el diseño estructural de pavimentos consideran un comportamiento elástico y lineal de los materiales. No obstante, esto es una aproximación que corresponde quizá a niveles de esfuerzo muy bajos. Adicionalmente esta visión convencional no permite considerar la influencia del esfuerzo aplicado en el cálculo del módulo de rigidez como lo proponen Rondón & Reyes (2015). Es por ello que a través de los años se han venido desarrollando estudios tanto de laboratorio como in situ concentrados en el desarrollo de ecuaciones matemáticas que calculen aproximadamente el comportamiento tanto elástico como plástico del material granular y de los suelos de fundación (Lekarp et. al, 2000).

Entender el comportamiento de los esfuerzos inducidos por el tráfico y simularlos en laboratorio ha sido un reto para los investigadores en el área. La figura 8 muestra el estado tensional de esfuerzos en la estructura cuando es sometida a pulsos de carga debido al paso de un eje vehicular. Dicho comportamiento se simula en laboratorio a través de ensayos triaxiales cíclicos.

Figura 8

Esfuerzos bajo la carga de un eje vehicular en movimiento



Nota: tomado de Lekarp, et al (2000)

El concepto de módulo resiliente ha sido utilizado para representar las características no lineales esfuerzo-deformación de un suelo. A lo largo del tiempo se han propuesto diferentes modelos matemáticos, que incluyen el efecto del estado de esfuerzos en el módulo resiliente para simular el módulo resiliente de los suelos incorporando la relación existente entre el estado de esfuerzos y el comportamiento resiliente del material acorde con Liang et al (2008).

2.2.1 Factores que influyen en el comportamiento del Módulo Resiliente:

El comportamiento elasto-plástico no lineal de las capas de un pavimento bajo pulsos de carga es representado por el módulo resiliente y la relación de Poisson. Sin embargo, estas respuestas son afectadas por varios factores, por lo cual es importante tenerlos en cuenta a la hora de simular en laboratorio las condiciones de campo con el fin de representar lo más cercano posible el comportamiento que tendrán dichos materiales en su vida útil. Algunos de estos factores han sido estudiados Rondon & Reyes (2007), Mousa, et al (2017), Vidal & Osorio(2006), a continuación se presentan las principales conclusiones de estos estudios:

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

2.2.1.1 Estado de esfuerzos

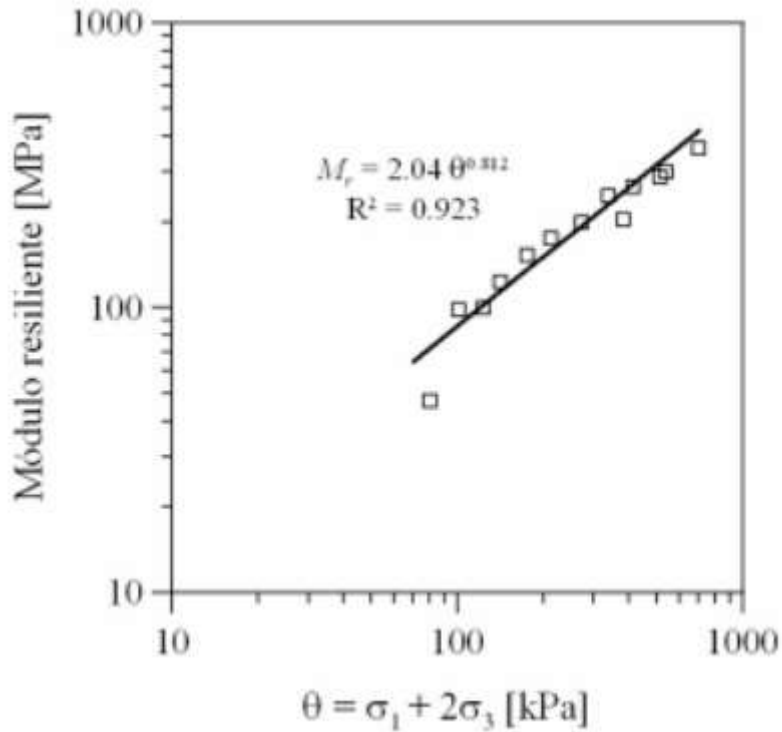
Los autores concuerdan en que el factor con mayor influencia en el cálculo del módulo resiliente es el estado de esfuerzos y su incidencia va a depender del tipo de material a tratar. Mousa, et al (2017) realizaron ensayos para calcular el módulo resiliente tanto en materiales de bases y subbases como en subrasantes (tres muestras arcillosas y dos con presencia de limos) y concluyeron que a medida que aumentaron los esfuerzos de confinamiento y el esfuerzo desviador, el módulo aumento para los materiales de bases y subbases, pero disminuyó para las subrasantes, también notaron que el impacto del esfuerzo de confinamiento sobre la rigidez fue menos pronunciado en las arcillas.

Rondón & Reyes (2007) concluyeron que el esfuerzo desviador no tiene mayor incidencia en el módulo en materiales granulares siempre que no se aproxime al esfuerzo de falla, pero aclaran que la literatura se contradice. Mencionan también que el valor del módulo resiliente depende principalmente de la presión de confinamiento y mantiene una relación de proporcionalidad directa con la suma de los esfuerzos principales para el caso de suelos granulares (Figura 9).

Figura 9

Variación del módulo resiliente con el esfuerzo de confinamiento Θ

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



Nota. Tomado de Rondón & Reyes (2012)

Por otro lado, Rondón & Reyes (2012), el Instituto de Transportes de México (2000), y Vidan & Osorio (2006) mencionan que en suelos finos el aumento del esfuerzo desviador disminuye el valor del módulo, mientras que la presión de confinamiento no tiene mayor incidencia. Sin embargo, cierta disminución es significativa para esfuerzos desviadores menores a 40 KPa, para esfuerzos mayores su incidencia no es tan importante.

2.2.1.2 Relación entre succión y contenido de humedad

La succión total se puede definir como el trabajo por unidad de volumen requerido para transportar una unidad de masa desde un nivel de referencia de agua pura hacia el agua del suelo bajo consideración. Este potencial químico del agua está dado por la suma de las componentes incluidas en la ecuación (1):

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

$$\psi = \psi_c + \psi_0 + \psi_g + \psi_z \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde, $\psi_c = (p_w - p_a)$ es la succión matricial, diferencia entre la presión de agua, p_w , y la presión de aire, p_a ; $\psi_0 = CmRT$, es el potencial osmótico definido por Van t'Hoff, donde C es una constante adimensional, m es la concentración molar de un soluto, R es la constante de los gases ideales y T es la temperatura absoluta (usualmente en unidades Kelvin); $\psi_g = (p_a - p_{atm})$, es el potencial de la presión de gas, diferencia entre la presión de aire, p_a , y la presión atmosférica, p_{atm} ; y $\psi_z = \gamma_w \cdot z$ es el potencial gravitacional definido como el producto entre el peso unitario del agua, γ_w , y la profundidad medida desde el nivel de la tabla de agua (z).

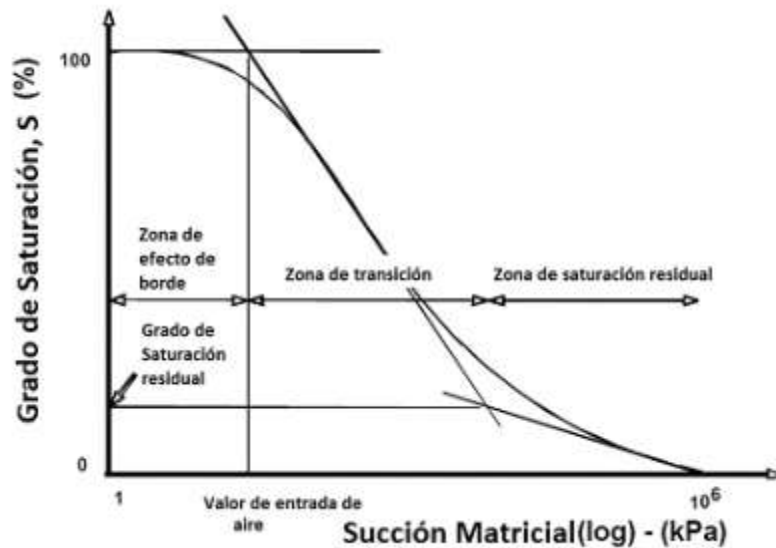
La succión modifica el comportamiento esfuerzo – deformación de los suelos, incluyendo los materiales granulares empleados como capas estructurales de pavimentos; su magnitud depende, entre otros, del tamaño y distribución de las partículas de suelo, el tamaño y distribución de los vacíos, del grado de saturación del suelo y de la temperatura. Razón por la cual muchos autores han dirigido sus estudios a analizar el efecto de este parámetro en el comportamiento resiliente de los materiales, es el caso de Lekarp et. al (2000) quienes concluyeron que la presión de poros controla el comportamiento de deformación en oposición al nivel de saturación, teniendo en cuenta que a medida que aumenta la saturación la succión disminuye (figura 10). Así mismo Caicedo et. al (2011) reportan que el módulo es mayor cuando el contenido de agua decrece por que se incrementan las fuerzas de capilaridad en los meniscos del fluido de poros como lo establece Li (2018) (ver figura 11). También Liang et. al (2008) realizaron estudios al respecto encontrando que la succión osmótica no tiene incidencia en el estado de esfuerzos del suelo mientras que la matricial sí. Por lo tanto,

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

esta última es la que juega un papel importante a la hora de calcular el módulo resiliente de un suelo. Lekarp et. al (2000), Mousa et. al (2017), y Rondon & Reyes (2007) concuerdan en que el módulo resiliente disminuye con el aumento del contenido de agua y que su impacto es mayor en suelos finos que en suelos granulares; también encontraron que el comportamiento resiliente de materiales granulares saturados es idéntico al seco cuando se permite drenaje en el ensayo. En el caso particular de este proyecto, el marco de referencia estará asociado a la succión total (potencial químico total), porque incluye todos los componentes de la succión y se puede definir desde variables ambientales cuantificables (humedad relativa y temperatura o mediante la técnica del papel filtro).

Figura 10

Curva característica de succión en un suelo.

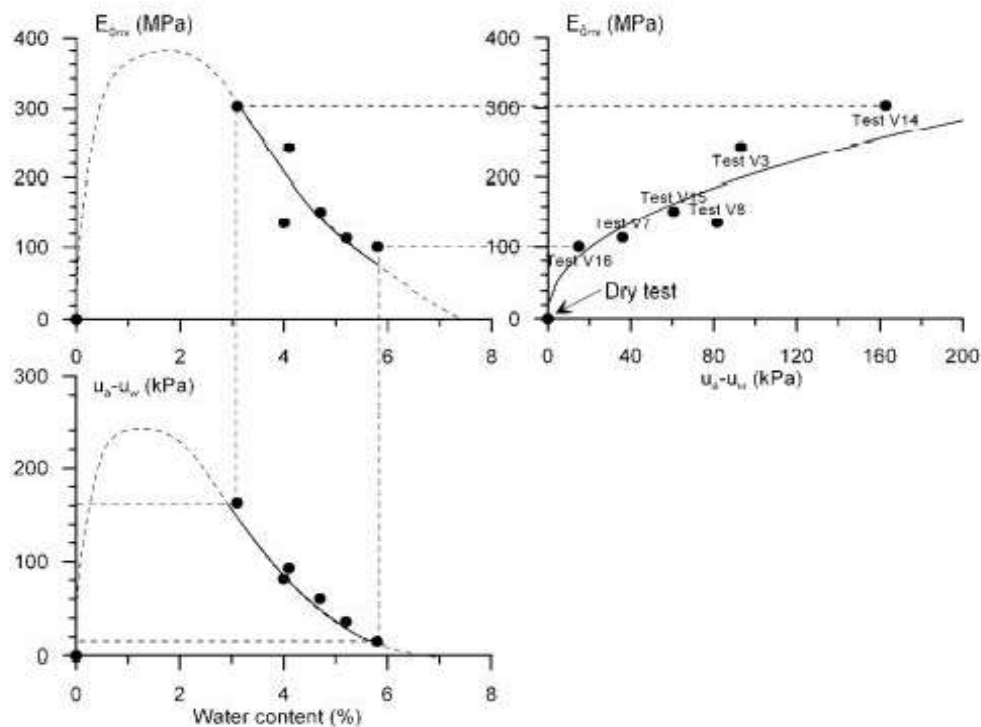


Nota. Tomado de Meza (2012)

Figura 11

Relación entre el módulo resiliente, contenido de agua y succión para una muestra con 10% de finos e índice de plasticidad cero

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



Nota. Tomado de Li (2018)

2.2.1.3 Efecto de la granulometría y el contenido de finos

Los materiales granulares están compuestos por un gran número de partículas generalmente de diferentes tamaños y proporciones variables. La literatura indica que la rigidez y las propiedades dinámicas del suelo granular dependen en gran parte de la distribución de tamaño de las partículas. Sin embargo, este tema no es del todo claro, Lekarp et. al (2000) y Caicedo et. al (2011) encuentran en la literatura resultados contradictorios al respecto y el efecto del contenido de finos no es completamente claro. Hicks & Monismith (1971) encontraron que el módulo resiliente es afectado por la distribución granulométrica de los suelos; para materiales con partículas parcialmente fracturadas el módulo decreció con el incremento de contenido de finos. Sin embargo, para muestras con partículas totalmente fracturadas el módulo incrementó acorde al incremento del contenido de finos. De acuerdo

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

con Lekarp et. al (2000) para materiales con igual contenido de finos y una distribución granulométrica similar el módulo incrementa cuando el tamaño máximo de la partícula es mayor; esto debido a que cuando se trasmite las cargas a menor número de contactos entre partículas menor es la deformación generada.

2.3 Deformación permanente

Otro de los factores importantes e influyentes cuando se estudia el comportamiento elastoplástico de un material granular tipo subbase es la deformación permanente; cuando a un material granular se le inducen ciclos de carga y descarga como sucede con las capas que conforman la estructura de un pavimento en su vida útil, este material presenta una deformación total; parte de esta es recuperada y se le denomina deformación resiliente; sin embargo, aquella deformación que no se recupera se acumula con cada repetición del ciclo de carga, a esta deformación se le denomina deformación permanente.

Li et. al (2017) con el fin de entender el comportamiento de materiales granulares marginales, estudiaron la deformación permanente de dos materiales granulares con diferentes características geológicas y minerales bajo repeticiones de carga y diferentes contenidos de humedad. Uno de estos materiales cumplía a cabalidad con la norma TNZ M/4 de Nueva Zelanda (Transit New Zeland, 2006), mientras que el segundo material no cumplía con el requisito de índice de arcilla (3% máximo). En la tabla 12 se muestran las propiedades de los materiales utilizados en este estudio.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Tabla 12

Propiedades de las partículas finas contenidas en los dos materiales estudiados por Li et. al (2017)

Aggregate	Sand Equivalent	Clay Index	Plasticity Index
Requirement NZTA M/4 specification	Minimum 40	Maximum 3.0	Maximum 5 or nonplastic (NP)
M/4-compliant aggregate	40	1.0	Nonplastic
Marginal aggregate	28	3.4	10

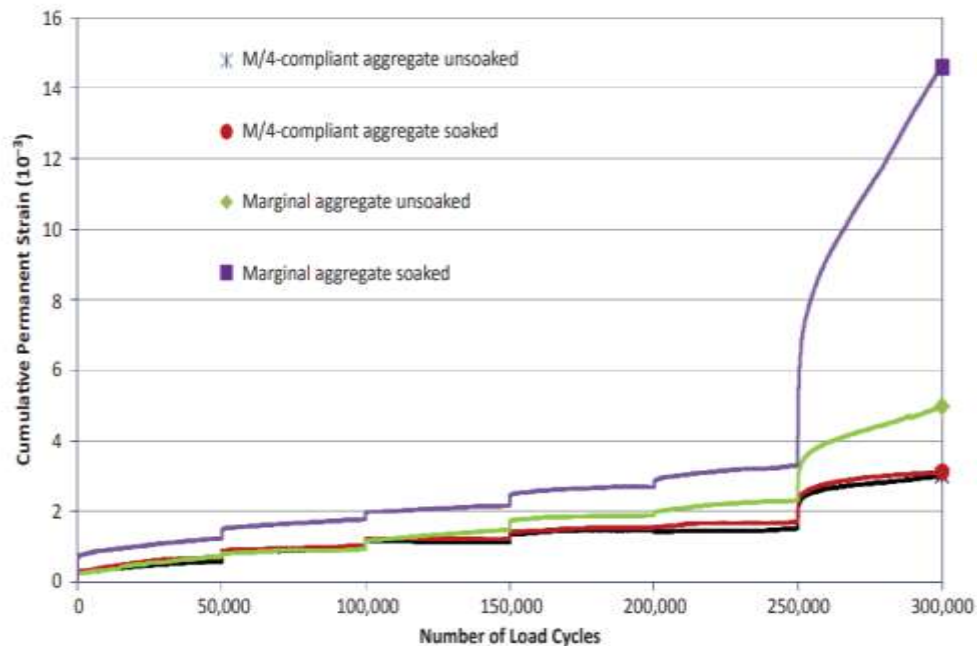
Nota. Tomado de Li et. al (2017)

Los resultados de este estudio determinaron que la muestra que cumplía con la normatividad presenta un buen comportamiento y es poco susceptible a los cambios de humedad. Mientras que la muestra con material granular marginal presenta un comportamiento aceptable en cuanto a la deformación permanente para las condiciones secas, pero en condiciones húmedas la muestra presenta deformaciones permanentes acumuladas relevantes, como se puede observar en la figura 12.

Figura 12

Deformación permanente vs número de ciclos de carga para muestras convencionales y marginales secas y húmedas

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



Nota. Tomado de Li et. al (2017)

2.4 Materiales granulares estabilizados

Como se observó anteriormente, tanto en términos de módulo resiliente como de deformación permanente, las características intrínsecas de cada material afectan de manera directa el comportamiento resiliente del mismo. Dicha afectación se amplifica si se trata de un material marginal en condiciones húmedas tal cual lo demostraron Li et. al (2017). No obstante, algunos autores han concentrado sus esfuerzos en lograr estabilizar los materiales considerados como marginales con el fin de potenciar su uso y convertirlos en materiales de un comportamiento mecánico adecuado que pueda ser usado en proyectos viales sin inconvenientes.

Por ejemplo, Berthelot et. al (2010) estudiaron el efecto de estabilizar con cemento varios materiales tipo base granular, entre ellos dos marginales (con mayor contenido de finos

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

y de arenas finas de lo permitido por la normatividad). Todas las muestras presentaron un mejor comportamiento mecánico cuando fueron tratadas con 3% de cemento. Sin embargo, la base granular marginal que excedía levemente los límites de finos fue la que presentó la mayor mejora en cuanto a sus propiedades.

Rodríguez et. al (2006), a partir de ensayos de Proctor y CBR, compararon el comportamiento de un material granular tipo subbase sin modificar y el mismo con la adición de desechos de PVC, encontrando que las características propias del material utilizado como aditivo proporciona al suelo estabilizado un mayor CBR. Por tanto, un mejor comportamiento ante las cargas y sollicitaciones que enfrenta cuando es usado para la conformación de estructuras de pavimento. Los resultados arrojaron que el material granular mejoró su CBR a partir de la adición de desechos de PVC de 1,8%. También cuando se utilizaron porcentajes de adición superiores o iguales a 3% la resistencia aumentó a pesar de que su peso específico disminuyó. Como conclusión se obtuvo que la mezcla entre material granular y desecho de PVC cumplió con los requerimientos de resistencia (CBR) exigidos en pavimentos.

Siguiendo esta línea, pero aplicada a la materia prima para la elaboración de concretos, y ante los altos costos para la obtención de materiales de alta calidad para la producción de concretos asfálticos, con el inconveniente de que las fuentes de agregados pétreos cercanas al estado de Texas no cumplen a cabalidad con las especificaciones mínimas para su uso, el Texas Transportation Institute (1992) de Texas realizaron un estudio con el cual corroboraron la viabilidad de utilizar estos materiales adicionándoles un recubrimiento con cemento; esto mejora su desempeño y los convierte en materiales aptos para la construcción de pavimentos flexibles.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Por otro lado, Gomez (2018), estudió el comportamiento geotécnico de arcillas compactadas de grano fino y alta plasticidad con y sin adición de arena bien gradada. Durante el desarrollo del proyecto se compactaron las muestras tanto en la parte húmeda de la curva de compactación como en la parte seca, encontrándose variación en la distribución acorde al sitio de la curva sobre el cual fueron trabajadas. Las probetas compactadas en el lado seco de la humedad óptima desarrollaron una micro-fábrica abierta, conformada fundamentalmente por agregados de arcilla, macro poros y conectores largos, mientras que las compactadas al lado húmedo se caracterizaron por presentar una micro-fábrica tipo matriz continua formada fundamentalmente por la disposición homogénea de los agregados de arcilla y los poros de tamaño reducido entre ellas. Así mismo, se concluyó que con la adición de solo 10% de material granular en las arcillas se modificaron los parámetros expansivos con una reducción de la presión de expansión de un 51% y 62 % de la expansión libre. Cuando la adición de arena fue de 20% la reducción de las propiedades expansivas mostraron un 98% y 94% de la presión de hinchamiento, llegando a valores casi despreciables. Con la adición de 10 y 20% de arena al material arcilloso se mejoraron considerablemente las propiedades tanto estáticas como dinámicas del material. Por lo tanto, para este tipo de suelos arcillosos, a priori no adecuados y rechazados para su uso como material de construcción, mediante la compactación y estabilización se ha conseguido que el material mejore sus propiedades geotécnicas y pase a ser un material adecuado para su puesta en obra.

Por otro lado, Bartley (2001) estudió un método de caracterización y análisis del efecto de la adición de cal en un material marginal el cual no cumplía el índice de meteorización exigido por las especificaciones en Nueva Zelanda. Para ello, seleccionaron cinco muestras que fueron monitoreadas en laboratorio enfocándose en los cambios

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

producidos por la adición de cal en el índice de plasticidad y el índice de meteorización. Como resultado concluyeron que el índice de meteorización no es un buen indicativo para caracterizar los cambios en los materiales marginales cuando son modificados con cal, mientras que el índice de plasticidad muestra una mejor relación con los cambios presentados y el comportamiento de dichos materiales en campo.

2.5 Nuevos métodos de clasificación de materiales granulares

Teniendo presente el concepto de marginalidad de materiales granulares y el comportamiento especial presentado por este tipo de materiales, algunos autores han dirigido sus esfuerzos en estandarizar metodologías de caracterización particulares que permitan la utilización de los mismos bajo ciertas consideraciones.

En el caso de Harloff (2020) realizó el seguimiento y control a la construcción de terraplenes con materiales marginales utilizados en el proyecto concesión vial “Vías del NUS” en Colombia, para ello la constructora encargada del proyecto realizó una especificación particular que permitió el uso de materiales de la zona los cuales no cumplieron inicialmente con las características generales que exige la normatividad INVIAS (2013) para la realización de terraplenes, dicha especificación se resume en la tabla 13.

Tabla 13

Especificación particular desarrollada para el proyecto concesión vial “Vías del NUS” en Colombia

Característica	Norma de ensayo INVIAS	Material tipo 1	Material tipo 2	Material tipo 3
		Corona y cemento	Cimiento y núcleo	Núcleo
Tamaño máximo (mm)	E 123	75	100	75

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Porcentaje que pasa el tamiz N° 10 en masa, máximo	E 123	80	80	NA
Porcentaje que pasa el tamiz N° 200 en masa, máximo	E 123	25	35	60
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E 121	1	3	7
Límite líquido, máximo (%)	E 125	30	40	55
Índice de plasticidad, Máximo (%)	E 126	10	15	25
CBR de laboratorio, mínimo (%)	E 148	10	5	3
Expansión en prueba CBR, máximo (%)	E 148	0	2	2
Índice de colapso, máximo (%)	E 157	2	2	2
Contenido de sales solubles, máximo (%)	E 158	0.2	0.2	NA

Nota. Tomado de Harloff (2020)

El estudio como tal consistió en el control y seguimiento a las densidades alcanzadas en campo con la utilización de este material marginal, encontrándose que el uso de suelos marginales en la conformación de terraplenes funciona, se obtiene porcentajes de compactación superiores al 95% del peso unitario seco determinado según el ensayo de compactación Proctor realizado. También se observó, que la energía de compactación influye directamente en la conformación de cada capa del terraplén y el exceso de esta puede provocar problemas al generar cambios de granulometría del material usado, arrojando porcentajes de compactación más elevados a los esperados y que no significa necesariamente que la capa tendrá un mejor desempeño.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Por otro lado, en Nueva Zelanda una de las principales fallas en los pavimentos es el ahuellamiento superficial y esto ha creado la necesidad de estudiar sus causas y las propiedades en los materiales que la producen. Arnold et. al (2008), concluyen que, aunque es muy poco probable que los materiales reciclados cumplan con los requisitos de las especificaciones, estos pueden llegar a tener un buen comportamiento y desempeño en estructuras de pavimento. Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrolló un estudio que incluyó una amplia gama de materiales entre los cuales se encuentran materiales convencionales (que cumplen con la especificación), materiales reciclados, y materiales marginales o alternativos como los denominaron. Una de las principales conclusiones es que el método comúnmente utilizado en este país indicado por Austroroads (Austroroads, 2008) no clasifica el comportamiento de los materiales como se esperaba, por lo que no lo consideraron adecuado. También se encontró que su nuevo método para la predicción del ahuellamiento del pavimento utilizando el ensayo de carga triaxial cíclica mostró un buen desempeño y se recomienda su uso.

Siguiendo esta misma línea, Vic Roads (2006) desarrolló un estudio en el sureste de Victoria (Australia), teniendo en cuenta que en el lugar es complicado y costoso adquirir materiales pétreos que cumplan con las especificaciones técnicas, por lo cual, las autoridades locales han optado por la utilización de materiales marginales en vías de bajos volúmenes de tránsito. La investigación consistió en el análisis del comportamiento de estos materiales marginales en campo versus su comportamiento en el laboratorio siendo estos analizados bajo el ensayo de triaxial de carga cíclica; se tomaron muestras aleatorias de 10 sitios diferentes en los cuales se construyeron vías con materiales granulares. Estos materiales están compuestos principalmente por escoria, ceniza volcánica, rocas calizas o combinación de

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

estas. El estudio mostró que caracterizando estos materiales bajo el ensayo triaxial de carga cíclica se tiene un buen comportamiento y la comparación entre los resultados de campo y la predicción de laboratorio fueron similares; adicionalmente, se encontró que el desempeño de estos materiales mejora con el aumento de la densidad. Sin embargo, el documento es claro en su alcance y advierte que para futuras investigaciones se deberán tener en cuenta diferentes condiciones de humedad, densidad, y tamaño de los materiales.

Otro de los autores comprometidos con el desarrollo de nuevas metodologías de caracterización de materiales granulares es Li (2018), quien reconoce la importancia que tiene el uso de materiales marginales en la reducción de costos de construcción, así como en la disminución del impacto ambiental generado durante la misma. Estos materiales denominados marginales los definen como cualquier material que no cumple en su totalidad todos los requisitos mínimos exigidos por la normatividad para un país o región. El proyecto se enfocó en dos situaciones fundamentales, la primera entender la marginalidad de los materiales y la segunda mejorar el comportamiento de estos materiales basados en la causa de su marginalidad; para ello se realizaron pruebas de caracterización tales como difracción de rayos X, examen petrográfico, pH del material, CBR, y ensayos triaxiales dinámicos. En total, fueron estudiadas cinco muestras diferentes. Como resultados de la investigación se propuso el método Analytic Hierarchy Process (AHP) para la caracterización de materiales el cual permite describirlos de forma cuantitativa, conocer sus propiedades, y así poder seleccionar con una perspectiva más amplia su posible zona de uso. También se concluyó que bajo los actuales métodos de caracterización de materiales su desempeño en campo puede no ser el mejor como se prevé dependiendo de ciertas condiciones. Li (2018) Utilizó la metodología de compactación por vibración para la fabricación de sus probetas de ensayo,

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

utilizando un martillo eléctrico con una energía de 1050 W con una frecuencia de 2000 golpes por minuto, se compactaron probetas en dos capas iguales con un tiempo de compactación de 180 s por capa.

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE MATERIAL GRANULAR MARGINAL

Con el objeto de evaluar preliminarmente el efecto que tiene el método de compactación sobre un material granular marginal en términos de rigidez, contenido de humedad o succión y granulometría; se seleccionó una cantera cercana al área metropolitana de Bucaramanga, que no cumple con los estándares convencionales estipulados para subbase por la norma INVIAS. La condición de marginalidad de este material se debe a: la distribución granulométrica, el límite líquido, índice de plasticidad y desgaste en la máquina de los ángeles. Por otra parte, este material, se modificó para ajustar las condiciones de granulometría con las especificaciones de subbase, pero dejando otros factores como el desgaste, el límite líquido y el índice de plasticidad fuera de los límites de la especificación colombiana. A partir de este material, se compactaron muestras de 15cm de diámetro y aproximadamente 22cm de longitud mediante tres técnicas; Proctor, giratorio y vibratorio, dado que el objeto de este proyecto es preliminar y se busca de manera inicial observar los efectos producidos por el método de compactación para posteriormente sugerir el enfoque que se le debe dar a futuras investigaciones en el área, se decidió trabajar con una sola muestra por cada método de compactación. Se estableció la curva de compactación, la densidad y humedad óptima tomando como referencia la compactación por metodología Proctor. Se realizaron los ensayos triaxiales dinámicos para la determinación del módulo

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

resiliente siguiendo los protocolos estipulados por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Finalmente, las muestras se sometieron a humedecimiento por transferencia de vapor y se midió el módulo resiliente nuevamente, después de equilibrar las probetas a contenidos de humedad más altos. A continuación, se describe en detalle cada uno de los procedimientos experimentales, así como las características de la muestra objeto de estudio.

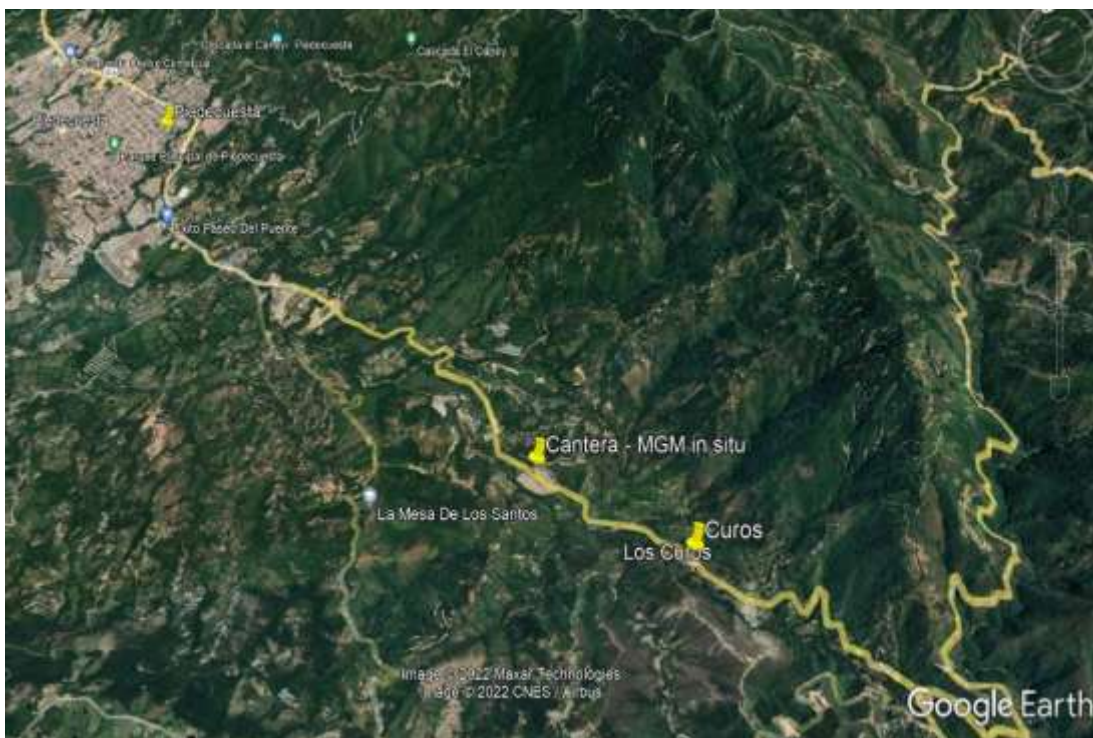
3.1 Geología

El material granular marginal se tomó de una cantera ubicada en la vía Bucaramanga – Curos en un sector conocido como “El Chivo” tal como se muestra en la figura 13. Esta cantera, no se encuentra en explotación al momento de realizar este estudio. La muestra recolectada corresponde a un material granular marginal de granulometría muy cercana a la estipulada por la norma INVIAS (2013) (INVIAS, 2013) para una subbase, sin embargo la misma se encuentra por fuera de las franjas granulométricas que establece dicha especificación como se observa en la figura 15, esta muestra presentó un desgaste en la máquina de los ángeles de 60.73% y un índice de plasticidad de 11.39%, lo cual se sale de lo estipulado por la normatividad Colombiana por lo que se ratificó su calidad de material granular marginal.

Figura 13

Localización del sitio donde fue tomada la muestra de MGM-in situ.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



Según el mapa geológico Colombiano (Servicio geológico Colombiano, 2015), el material recolectado pertenece a la edad Jurásico, unidad geológica granito de Pescadero conformado por granodioritas que varían de sienogranitos a tonalitas y de cuarzomonzonitas a cuarzomonzodioritas, cuyo símbolo es J-Pi tal cual como se puede observar en la figura 14. Esta unidad geológica fue llamada así por los afloramientos presentes en la población de Pescadero, municipio de Umpala; acorde con el estudio realizado por Dwight E & Goldsmith (1973) a las planchas H12 y H13 de la cartografía geológica Colombiana correspondiente al sector de Bucaramanga y de Pamplona respectivamente, el granito de Pescadero está cubierto por la formación Jordán del Jurásico, al norte el granito de Pescadero pasa pórvido riolítico expuesto a lo largo de la carretera al sur del municipio de Piedecuesta.

Figura 14

Geología del sector de la toma de muestra.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES



Nota. Tomado de (Servicio geológico Colombiano, 2015)

De manera general el granito de pescadero es una unidad geológica en la cual se puede encontrar un suelo arenoso, poroso, de color claro; dicha unidad se encuentra localizada cerca a la población de los Curos, donde se encuentra apreciablemente brechada y meteorizada. Al contrario, hacia el sur se encuentra más sana y fresca, aunque intensamente diaclasada y fallada debido a su proximidad con la falla de Bucaramanga. El granito de Pescadero en el marco geológico se encuentra encuadrado en el sector occidental del macizo de Santander, el cual hace parte de un bloque regional de forma triangular conformado por las fallas de Santa Marta-Bucaramanga en el costado occidental, la falla Oca en el Norte y la falla de Bocono en el costado oriental como lo mencionan Zapata et. al (2016).

3.2 Calidad del material granular marginal

La fase experimental inició con la realización de un ensayo granulométrico a la muestra recolectada de la cantera, el cual arrojó una granulometría muy similar a las estipuladas

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

actualmente en los documentos técnicos del INVIAS (2013) para un material granular tipo subbase; sin embargo la distribución granulométrica se encontró ligeramente por encima y con un contenido de finos elevado acorde a de lo indicado en la especificación por lo que se clasificó la muestra ensayada como un material granular marginal (figura 15). ; Para continuar con el proceso de caracterización se realizaron los ensayos básicos acorde a lo estipulado en la especificación INVIAS 320-13 donde se indican los requisitos mínimos que se deben tener en cuenta para el transporte, colocación, humedecimiento o aireación, extensión y conformación, compactación, y terminado de material de subbase granular. Esta especificación clasifica el material de subbase en tres grandes grupos como lo son clase A, clase B, y clase C que tendrían un uso para nivel de tránsito 3 (NT3), nivel de tránsito 2 (NT2), y nivel de tránsito 1 (NT1), respectivamente.

Dentro de los ensayos mínimos requeridos para caracterizar el material de subbase granular se tienen: desgaste en la máquina de los ángeles y degradación por abrasión en el equipo micro-Deval, para evaluar la dureza del material, pérdida en ensayo de solidez en sulfatos para evaluar la durabilidad, límite líquido, límite plástico, equivalente de arena, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable para observar su limpieza, CBR para analizar su capacidad de soporte. Así mismo, se tienen estipuladas dos franjas granulométricas, una superior (LS-INVIAS) y una inferior (LI –INVIAS), para cada tipo de subbase establecida.

En la tabla 14 se presenta los datos obtenidos durante el proceso de evaluación de calidad del material granular marginal objeto de estudio de este proyecto, donde se encontró que adicional a la granulometría los agregados pétreos tampoco cumplían con el requisito de

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

desgaste en la máquina de los ángeles, límite líquido e índice de plasticidad, ratificando así su calificación como material granular marginal.

Tabla 14

Resultados de ensayos de caracterización del material granular marginal

ENSAYO	NORMA	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	CUMPLE
Desgaste en la máquina de los ángeles	INV 218-13	60,73	50% máximo	NO
Perdida en ensayo de solidez en sulfatos	INV 220-13	3,70%	12% máximo	SI
Límite líquido	INV E 125	39,93%	25% máximo	NO
Índice de plasticidad	INV E 125 y E 126	11,39	6% máximo	NO
Equivalente de arena	INV E 133-13	48%	25% mínimo	SI
Gravedad específica (material fino)	INV E 128	2,574	-	-

Cabe resaltar que la muestra se tomó de una cantera que no se encontraba en funcionamiento en el momento de su recolección, por lo tanto, el material no ha sido triturado ni ha sido sometido a procesos de clasificación a través de tamizado. Una vez la muestra se encontró en laboratorio, se retiraron las partículas retenidas en el tamiz de 50 mm con el fin de simular el proceso de cernido que tendría lugar en la producción de material tipo subbase lo que originó la necesidad de realizar nuevamente un análisis granulométrico al material granular marginal natural (MGM-in situ). La granulometría obtenida se muestra en la tabla 15 y la figura 15.

Tabla 15

Granulometría original del MGM-in situ

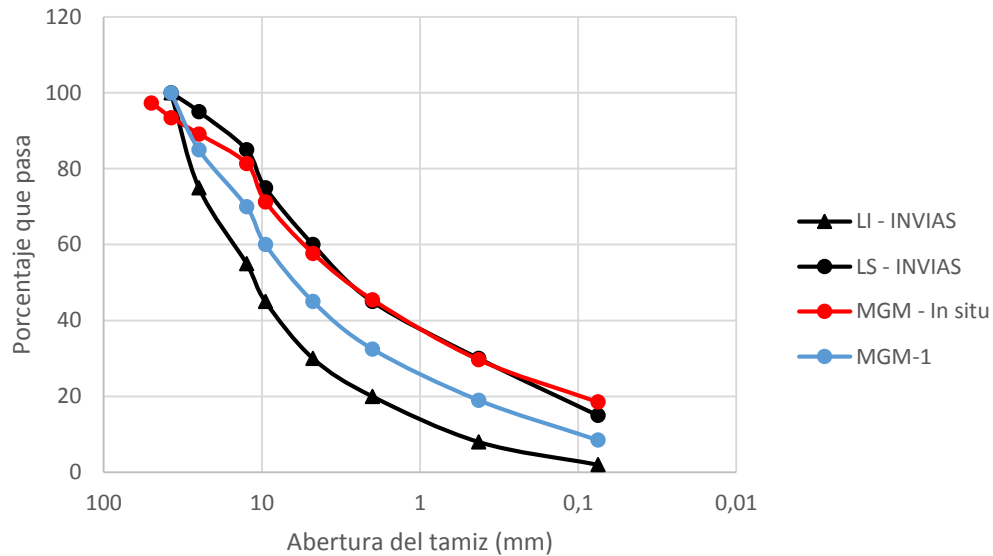
Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa
50 mm	50	267	2,7%	2,7%	97,3%
37.5 mm	37,5	380	3,8%	6,5%	93,4%

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

25 mm	25	433	4,4%	10,9%	89,1%
12.5 mm	12,5	765	7,7%	18,6%	81,4%
9.5 mm	9,5	998	10,1%	28,7%	71,3%
4.75 mm	4,75	1345	13,6%	42,3%	57,7%
2 mm	2	1210	12,2%	54,5%	45,5%
0.4 mm	0,425	1567	15,83%	70,35%	29,65%
0.08 mm	0,075	1100	11,11%	81,46%	18,54%
P 200		1835	18,54%	100,00%	0,00%

Figura 15

Análisis granulométrico de la muestra MGM in situ y MGM-1



En la Figura 15 se observa la granulometría presentada por el material MGM- in situ el cual excede los límites especificados por la norma INVIAS (2013) en el tamiz 0,075mm; con el fin de eliminar la variable granulométrica en las condiciones del proyecto y tener un mejor control sobre la misma, se decidió trabajar con una granulometría ajustada ,la cual se estableció como la curva promedio de los dos límites estipulados en la especificación INVIAS para un material de subbase, tal como se observa en la figura 15 (MGM-1).

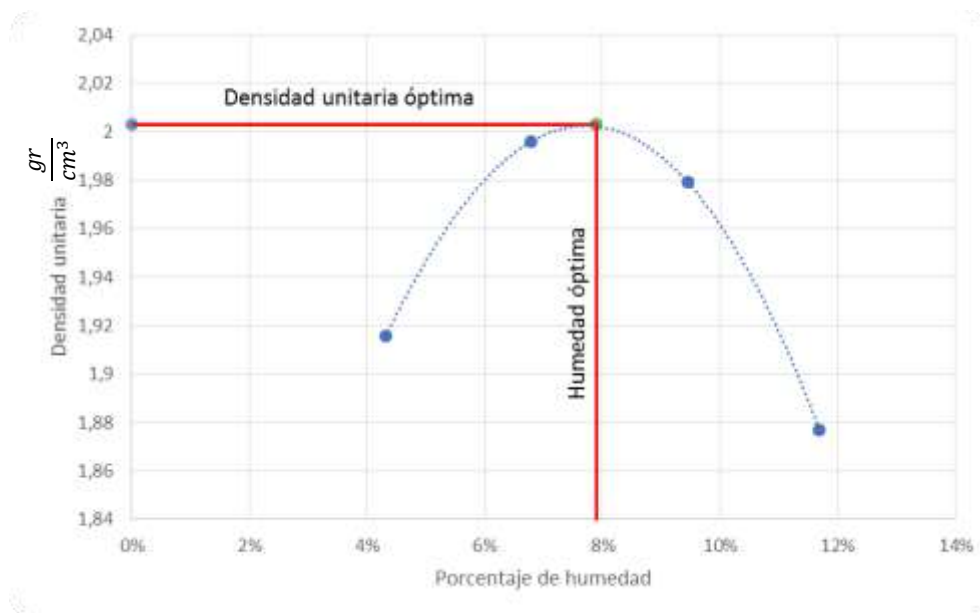
MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Para lograr obtener esta granulometría y no presentar variaciones en la misma se separó el material recolectado de la cantera, por tamaños acorde a los tamices utilizados para la caracterización de material de subbase granular, los cuales fueron: tamiz 37.5mm, tamiz 25mm, tamiz 12.5mm, tamiz 9.5mm, tamiz 4.75mm, tamiz 2mm, tamiz 0,425mm, y tamiz 0.075mm y se recolectó el material natural que pasa tamiz 0.075mm; una vez separado por tamaños se procedió a lavar cada grupo de materiales con excepción de los finos. De esta manera se garantizó que cuando se preparara la muestra no se presentaran variaciones significativas en la granulometría.

Posteriormente se realizó el ensayo de compactación Proctor modificado, siguiendo las recomendaciones de la norma INVIAS E 142, compactando en 5 capas y aplicando 56 golpes por cada capa, con el fin de obtener la humedad óptima y densidad seca máxima tal como se presenta en la figura 16.

Figura 16

Relación densidad unitaria seca vs contenido de humedad



MATERIALES GRANULARES MARGINALES

3.2.1 Compactación

Teniendo ya el material caracterizado y luego de calcular la densidad unitaria máxima y la humedad óptima de compactación por la metodología Proctor, se procedió a compactar las probetas para ensayarlas en la maquina triaxial. Para esto se seleccionaron tres métodos de compactación los cuales fueron, compactación por Proctor, compactación giratoria y compactación por vibración, con el objeto de fabricar una probeta por cada uno de estos métodos y así obtener preliminarmente una comparación en los resultados de rigidez para un material granular marginal utilizando métodos de compactación diferentes. El proceso de compactación consiste en la aplicación de energía con el fin de reducir vacíos e incrementar la densidad del material con lo cual se logran mejoras como:

- Aumentar la resistencia al corte y así mismo mejorar la capacidad de soporte del material.
- Reducir la compresibilidad y los asentamientos.
- Reducir el volumen de vacíos.
- Reducir y controlar los potenciales de expansión y contracción.

Así lo reportan Camacho et. al (2007) quienes adicionalmente mencionan que los métodos comúnmente utilizados para la compactación de suelos en laboratorio son: compactación por impacto, compactación Harvard miniatura, y compactación giratoria.

Siguiendo el protocolo de adición de agua definido en el apéndice A, se procedió a compactar las probetas teniendo en cuenta las siguientes consideraciones para cada uno de los tres métodos seleccionados.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

3.2.1.1 Compactación por la metodología Proctor

Este método es de los más comunes y usados en los ensayos de laboratorio; sin embargo, no es común compactar probetas de 20 cm de altura. Las dimensiones de la probeta se estipularon así para evitar que la relación entre altura de la probeta/tamaño máximo de la partícula generara distorsión en el resultado ya que el tamaño máximo nominal de la partícula es de 37.5 mm. La metodología de compactación Proctor consiste en la compactación mediante la caída libre de un martillo de 44.5 N desde una altura de 0.46 m, produciendo una energía de 2700 KN-m/m³. Para garantizar esta energía y teniendo en cuenta que la altura del molde va a variar respecto al ensayo tradicional de Proctor modificado se realizó el cálculo del número de golpes utilizando la ecuación 2 la cual rige la energía utilizada en el ensayo Proctor modificado, de la cual se despejó la variable N y se obtuvo la ecuación 3 que se utilizó finalmente para el cálculo del número de golpes por capa que garantizara mantener la energía del método.

$$Ee = \frac{N*n*W*h}{V} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$N = \frac{Ee*V}{n*W*h} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

Ee = energía específica $(KN - \frac{m}{m^3})$

N = número de golpes por capa

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

n = número de capas del suelo (se definió con base en la altura de capa utilizada en el ensayo de compactación Proctor)

W = peso del martillo (N)

H = altura de caída libre del martillo (m)

V = volumen del suelo compactado (m^3)

Teniendo en cuenta lo anterior y aplicando la ecuación 3 se tiene:

$$N = \frac{(2700KN - \frac{m}{m^3}) * 0,0035342m^3}{9 * 44,48N * 0,457m} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$N = 52 \text{ golpes por capa} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Las ecuaciones 4 y 5 nos muestran que para mantener la energía de compactación del método para una probeta de 15 cm de diámetro y 20 cm de altura se debe realizar el proceso de compactación en 9 capas aplicando 52 golpes por capa. Con lo anterior definido se procedió a compactar las probetas, utilizando un molde dividido verticalmente como el mostrado en la figura 17, esto con el fin de que permitiera la fácil extracción de las probetas.

Figura 17

Probeta compactada mediante la metodología Proctor.



MATERIALES GRANULARES MARGINALES

3.2.1.2 Compactación por la metodología giratoria

Este tipo de compactación trabaja por presión y amasado; consiste en la aplicación de acciones simultáneas como la presión vertical y la acción giratoria, con un ángulo de inclinación respecto al eje vertical ejercida por el equipo tratando de simular los procesos llevados a cabo en campo. Si bien es cierto que inicialmente este equipo se desarrolló para la compactación de mezclas asfálticas, desde 1962 se conocen estudios de materiales tipo subbase compactados con este aparato obteniéndose que este método simula mejor el proceso de compactación en campo, es más versátil, permite un mayor control de las variables y es más rápido que el método convencional según lo expresan Camacho et. Al (2007)

Para efectos del presente estudio se compactaron probetas de 15 cm de diámetro y una altura de 22 cm en una sola capa. La máquina (figura 19a) se configuró a una velocidad de 30 revoluciones por minuto, un ángulo interno de 1.16° , un esfuerzo vertical de compactación de 600 KPa y se utilizaron 160 giros. Para definir dicho número de giros se realizaron probetas de prueba encontrándose que después de los 160 giros las variaciones no eran significativas tal como se puede observar en la Figura 18 y para evitar posible afectación a la estructura del material debido al proceso de compactación se decidió trabajar con este número de giros. En la figura 19b se observa una imagen de una de las probetas compactadas con el compactador giratorio.

Figura 18

Altura de la probeta vs giros de compactación

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

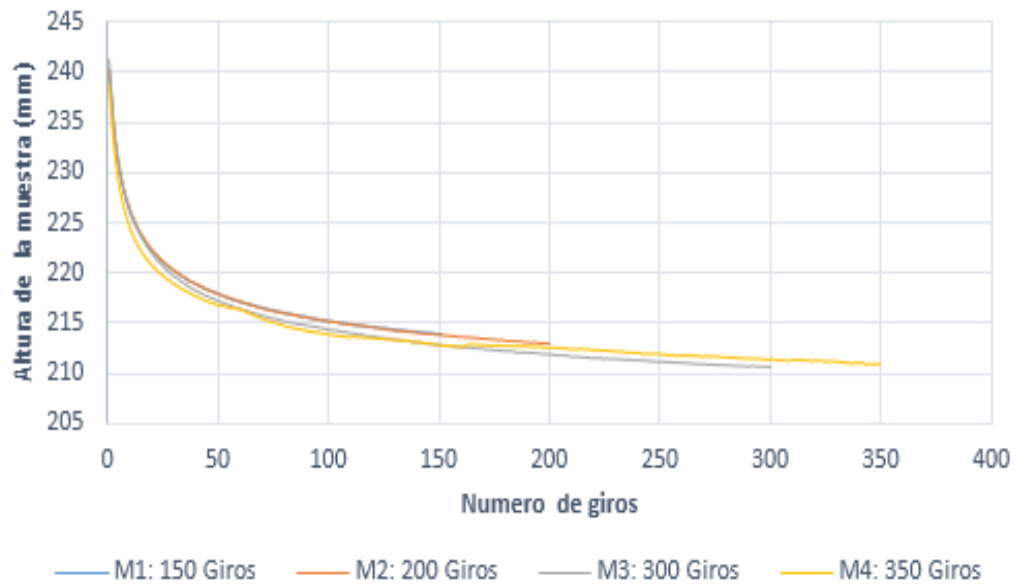


Figura 19

(a) Compactador giratorio y (b) probeta compactada con el compactador giratorio.



(a)



(b)

3.2.1.3 Compactación por la metodología de vibración

En campo se utilizan actualmente métodos de compactación que mezclan los métodos tradicionales como rodillos lisos y patecabra incluyéndoles el efecto de vibración,

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

especialmente en materiales granulares ya que se obtiene un mejor efecto del proceso; sin embargo, en laboratorio no han sido muy empleados a nivel nacional e internacional los métodos de compactación vibratorios. Para el caso del presente proyecto se compactaron las probetas con la ayuda de un martillo vibratorio siguiendo los parámetros establecidos en la norma ASTM D 7382-20 (ASTM, 2020) la cual sugiere compactar las probetas en tres capas exponiéndolas al efecto de vibración por un lapso de 51 s.

Durante el proceso, el martillo fue manipulado por dos personas las cuales se encargaron de que los golpes o pulsos fueran generados de manera vertical y acorde con la distribución diametral sugerida por la norma de ensayo. Así mismo, cabe resaltar que el martillo no se accionó directamente sobre el material sino que fue necesario utilizar una placa de acero cilíndrica que transmitió al suelo los pulsos generados por el martillo.

Una vez realizadas las probetas para cada uno de los métodos, siguiendo los parámetros anteriormente mencionados, se procedió a determinar el módulo resiliente del material granular marginal objeto de este estudio tal como se describe a continuación.

3.3 Módulo Resiliente

Con las probetas ya fabricadas las cuales contaron con un diámetro promedio de 15 cm y altura aproximada de 20 cm, se procedió a evaluar su comportamiento resiliente utilizando el equipo triaxial dinámico siguiendo los protocolos estipulados por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en su especificación T 307 -99 (AASHTO, 2007). Adicionalmente, se fabricaron desecadores de tamaño 50 cm x 50 cm x 50 cm con el fin de poder controlar el proceso de equilibrado de la humedad en las probetas, pues el plan de trabajo consistió en ensayar las probetas a la humedad óptima

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

calculada en el ensayo de compactación Proctor (8%) y posteriormente someterlas a un proceso de humedecimiento para luego volverlas a ensayar en la cámara triaxial y poder observar su comportamiento con la fluctuación de humedad para cada uno de los métodos de compactación. Las probetas ensayadas presentaron las características que se muestran en la tabla 16

Tabla 16

Características de las probetas ensayadas

Probeta	Método de compactación	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Densidad (g/cm^3)	Humedad inicial	Humedad final
1	Proctor	15,5	19,7	2,18	8%	9,95%
2	Giratorio	15	21,5	2,14	8%	9,86%
3	Vibración	15,5	19,5	2,19	8%	9,40%

Teniendo en cuenta que los materiales que conforman una estructura de pavimento están sujetos a diferentes estados de esfuerzos que varían acorde a su localización y espesor dentro de la estructura, la presión de cámara y número de aplicaciones de carga aplicadas a cada probeta se tomaron de la norma AASHTO T307-99 (AASHTO, 2007) y se muestra en la tabla 17, este estado de esfuerzos simula las condiciones de campo que presenta un material tipo subbase bajo una estructura de pavimento la cual presenta cargas cíclicas debidas al tráfico. Los resultados correspondientes se presentan en la figura 20.

Tabla 17

Presión de cámara y número de ciclos aplicados a las probetas

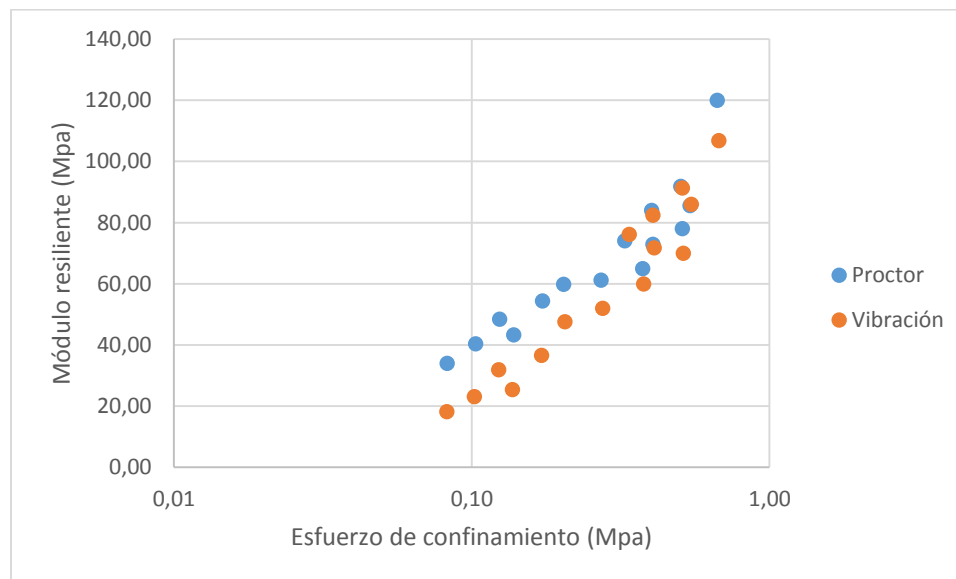
Secuencia No	Presión de cámara KPa	Número de aplicaciones de carga
--------------	--------------------------	---------------------------------

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

0	103.4	500
1	20.7	100
2	20.7	100
3	20.7	100
4	34.5	100
5	34.5	100
6	34.5	100
7	68.9	100
8	68.9	100
9	68.9	100
10	103.4	100
11	103.4	100
12	103.4	100
13	137.9	100
14	137.9	100
15	137.9	100

Figura 20

Módulo resiliente vs esfuerzo de confinamiento para probetas fabricadas mediante los métodos de compactación Proctor y vibración con un 8% de humedad



Las probetas fueron compactadas con la humedad óptima de 8%. Debido a fallas técnicas en el equipo triaxial dinámico no fue posible registrar resultados de la probeta

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

compactada por la metodología giratoria para la humedad óptima. Sin embargo, en la figura 20 se muestra la comparación entre los resultados de las probetas compactadas por la metodología Proctor y por vibración. Se puede observar claramente como los resultados para el módulo resiliente de una probeta preparada inicialmente con las mismas condiciones de humedad y granulometría pero por dos métodos de compactación diferentes presentan variación de rigidez, encontrándose que la probeta compactada por la metodología Proctor mostró valores de módulo resiliente alrededor de 27% mayores que la probeta compactada por vibración. Como se muestra en la figura 20 ambas probetas muestran un comportamiento similar sin embargo las diferencias se marcan en los valores bajos del esfuerzo de confinamiento (desde 0,08Mpa hasta 0,28 Mpa), pues a partir del esfuerzo de confinamiento de 0,34Mpa en adelante las diferencias disminuyeron. Es de acotar que las densidades alcanzadas son de 2,18 g/cm³ y 2,19 g/cm³ para la probeta compactada por Proctor y por vibración, respectivamente, luego la diferencia es mínima en este parámetro. Ambas probetas fueron sometidas a las mismas presiones de cámara y condiciones de ensayo en general, por lo que una de las causas de la variación presentada en cuanto al valor del módulo podría ser la distribución y empaquetamiento de las partículas producido por cada método de compactación.

Posteriormente las probetas fueron sometidas a un proceso de humedecimiento el cual se logró introduciendo las mismas en un desecador de tamaño 50x50x50 cm creado para este proyecto (figura 21), el cual contenía en su interior una bandeja metálica con agua. Las probetas compactadas por la metodología Proctor y con el compactador giratorio tuvieron un tiempo de humedecimiento de 14 días y ganaron un porcentaje de humedad de 1,95 y 1,86 puntos porcentuales respectivamente, mientras que la probeta compactada por vibración tuvo

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

un tiempo de humedecimiento de 8 días en los cuales logró aumentar su humedad en 1,4 puntos porcentuales, los detalles se muestran en la tabla 18.

Figura 21

Desecador en acrílico de 50x50x50cm



Tabla 18

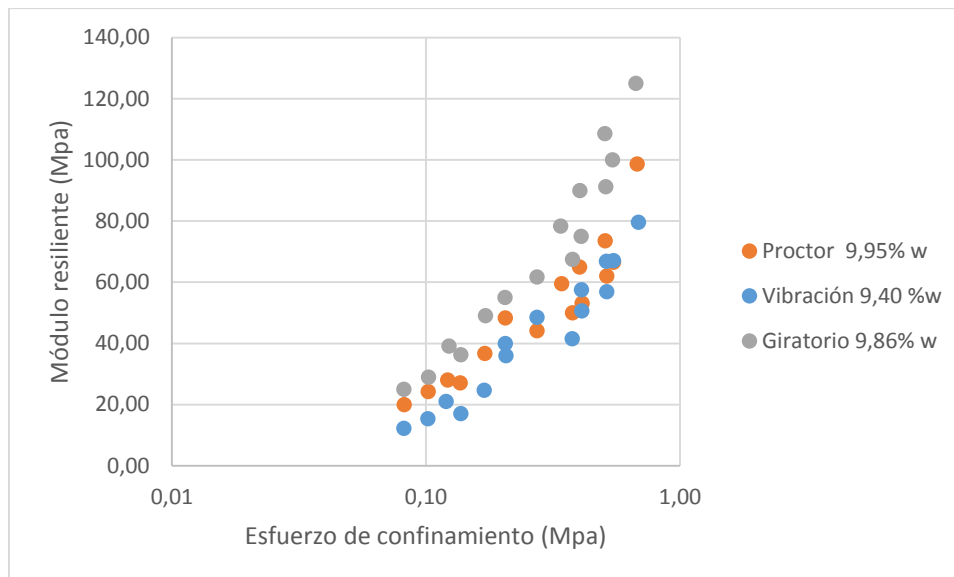
Fluctuación de la humedad en el ciclo de humedecimiento

PROBETA	Humedad Inicial	Humedad final	Variación en la humedad	Días en humedecimiento
Proctor	8%	9,95%	+ 1,95%	14
Giratorio	8%	9,86%	+ 1,86%	14
Vibración	8%	9,40%	+1,40%	8

Una vez terminado el ciclo de humedecimiento, las muestras fueron ensayadas en el equipo triaxial nuevamente, obteniéndose los resultados que se muestran en la figura 22.

Figura 22

Módulo resiliente vs esfuerzo de confinamiento para las probetas compactadas por compactación Proctor, giratorio, y por vibración después del ciclo de humedecimiento.



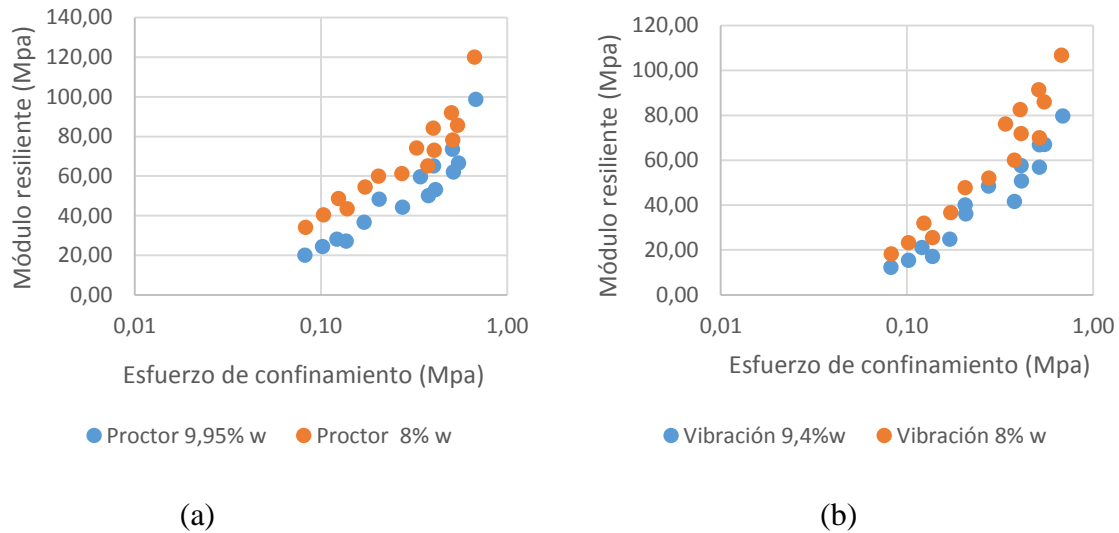
Se observó que después del ciclo de humedecimiento las muestras compactadas por la metodología Proctor y por vibración presentaron un comportamiento resiliente muy similar con la misma tendencia y pendientes muy parecidas, mientras que la muestra compactada a través del compactador giratorio presentó valores de módulo muy superiores a los de los otros dos métodos; Los resultados del módulo presentados por la probeta compactada por la metodología giratoria arrojaron valores un 35% mayores que las compactadas por la metodología proctor, y alrededor de un 60% mayores que las compactadas por vibración. Por otro lado, los datos presentados en la figura 23 muestran la variación que presenta el módulo resiliente con la fluctuación de la humedad, en este aspecto se encontró que la probeta compactada por Proctor disminuyó su rigidez aproximadamente un 30% luego de haber ganado 1,95 puntos porcentuales de humedad, mientras que la probeta compactada por vibración presentó una disminución en su rigidez alrededor del 40% luego de haber ganado

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

solo 1,4 puntos porcentuales de humedad, lo que está acorde con la literatura que menciona que un aumento en la humedad generará una disminución en el comportamiento resiliente del material.

Figura 23

Comparación de los resultados del módulo resiliente con la fluctuación de la humedad para (a) probetas compactadas por Proctor y (b) probetas compactadas por vibración

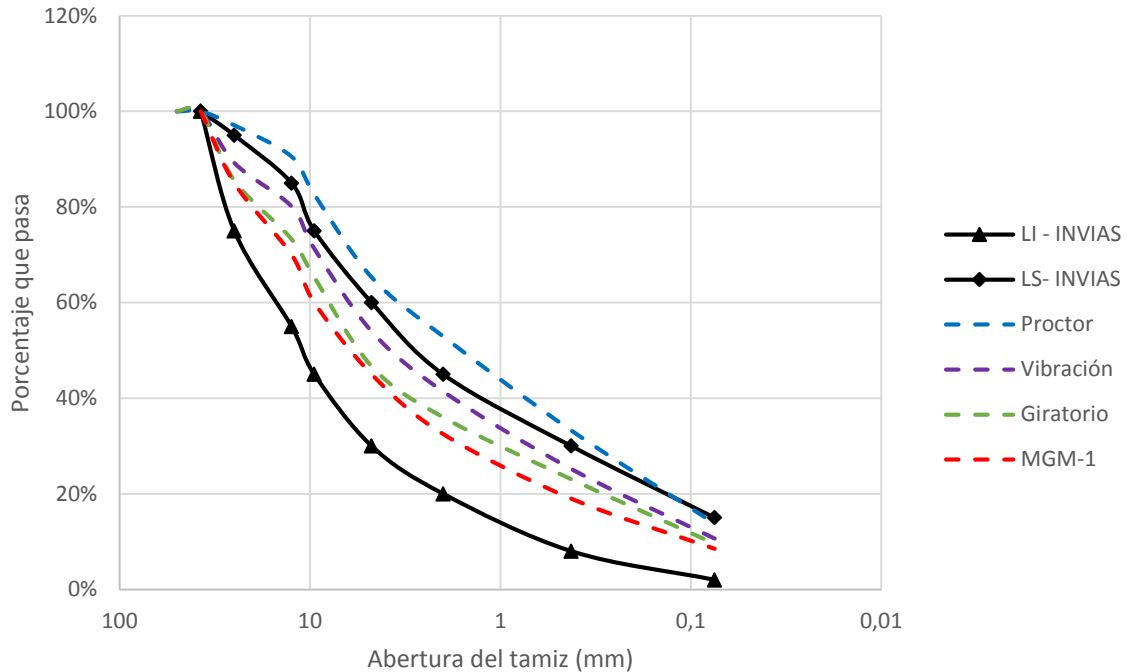


3.4 Análisis granulométrico

Finalmente, posterior al ensayo triaxial dinámico, a las probetas se les realizó un análisis granulométrico con el fin de evaluar la distribución de tamaños final luego de haber sido sometidas a los procesos de compactación y de carga dinámica en el ensayo triaxial. De esta forma se generaron las curvas de granulometría mostradas en las figuras 24.

Figura 24

Comparación de las granulometrías de las probetas luego de ensayadas



La figura 24 muestra que todas las probetas sufrieron cambios en su composición granulométrica y fueron afectadas por el método de compactación el cual las degradó causándole cambios en su conformación. Las tres muestras se desplazaron hacia la parte superior de la gráfica debido a la producción de finos producidos a causa de la compactación. La muestra que presentó la menor afectación fue la compactada con el compactador giratorio, la misma se encuentra dentro de los límites señalados por la especificación INVIAS y aunque mostró sus mayores cambios en los tamaños de arenas, finalizó con un 9,9% de finos (tan solo un 1,08 punto porcentual por encima de la granulometría inicial).

La muestra compactada por la metodología de vibración tuvo un mayor cambio y presentó variaciones a lo largo de su distribución granulométrica y a pesar de estar aún dentro

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

de los límites establecidos por la normatividad INVIAS se alejó de la distribución inicial y se acercó al límite superior (LS INVIAS) de las franjas granulométricas, terminó con un 10,7% de finos aumentando en 2,20 puntos porcentuales con respecto a la granulometría original. Finalmente, la muestra compactada por la metodología Proctor fue la que presentó los mayores cambios saliéndose de las franjas granulométricas de INVIAS y alejándose bruscamente de la granulometría inicial con que fue preparada; finalizó con un porcentaje de finos de 13,8% mostrando una diferencia de 5,3 puntos porcentuales por encima de la inicial.

Estos cambios granulométricos se pueden atribuir a las características propias de cada una de las metodologías utilizadas y su mecanismo de transmitir la energía al suelo. Por ejemplo, la metodología Proctor utiliza un martillo con el cual se impacta directamente contra la muestra lo que estaría generando que algunas partículas se desintegren en cada golpe causando las variaciones ya mencionadas; por otro lado, la compactación giratoria utiliza una técnica de amasado y presión lo que generaría un impacto menor en las partículas como tal que conforman la muestra, y finalmente se utilizó una metodología que presentó valores de granulometría intermedios, como lo es la de vibración, que si bien es cierto la energía utilizada fue suficiente para lograr causar variaciones significativas en la probeta no fueron tan elevadas como las mostradas por la metodología Proctor.

3.5 Succión

Paralelamente y con el fin de incluir el efecto de la succión y observar si el método de compactación tiene alguna repercusión en este parámetro se fabricaron probetas adicionales de menor tamaño con el objetivo de lograr disminuir los tiempos de equilibrio de su humedad. Las características de estas probetas se observan en la tabla 19 y la figura 25.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Tabla 19

Características de las probetas para ensayo de succión.

Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Humedad (%)	Densidad
Proctor	15,5	4,5	8	2,17
Giratorio	15	12	8	2,11
Vibración	15,5	4,6	8	2,20

Figura 25

Probetas para la realización del ensayo de succión, incluyendo (a) probeta compactada por la metodología giratoria y (b) probetas tipo compactadas por vibración y Proctor.



(a)

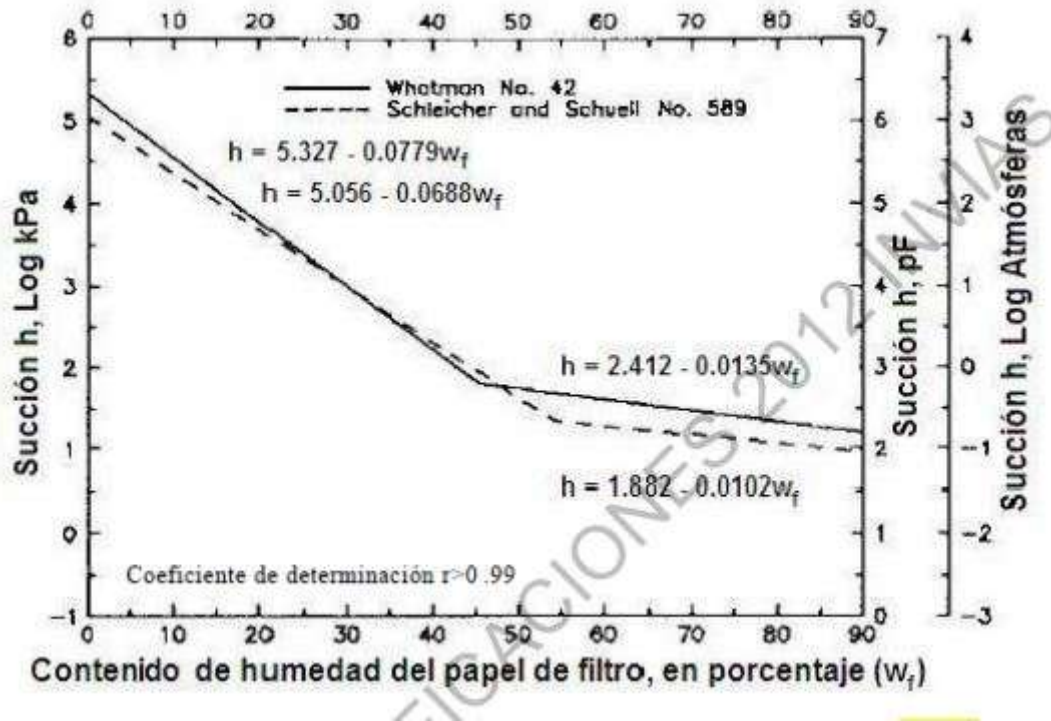


(b)

Para medir la succión del material se utilizó la técnica del papel filtro, siguiendo lo estipulado en la norma INV E 159 – 13 (INVIAS, 2013), denominado “Determinación de la succión de un suelo usando el papel filtro”. El papel filtro utilizado es el Whatman No. 42 y la curva de calibración adoptada para los cálculos es la presentada en la figura 26. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 20.

Figura 26

Curva de calibración succión-humedad para humedecimiento de papel filtro



Nota: tomado de (INVIAS, 2013)

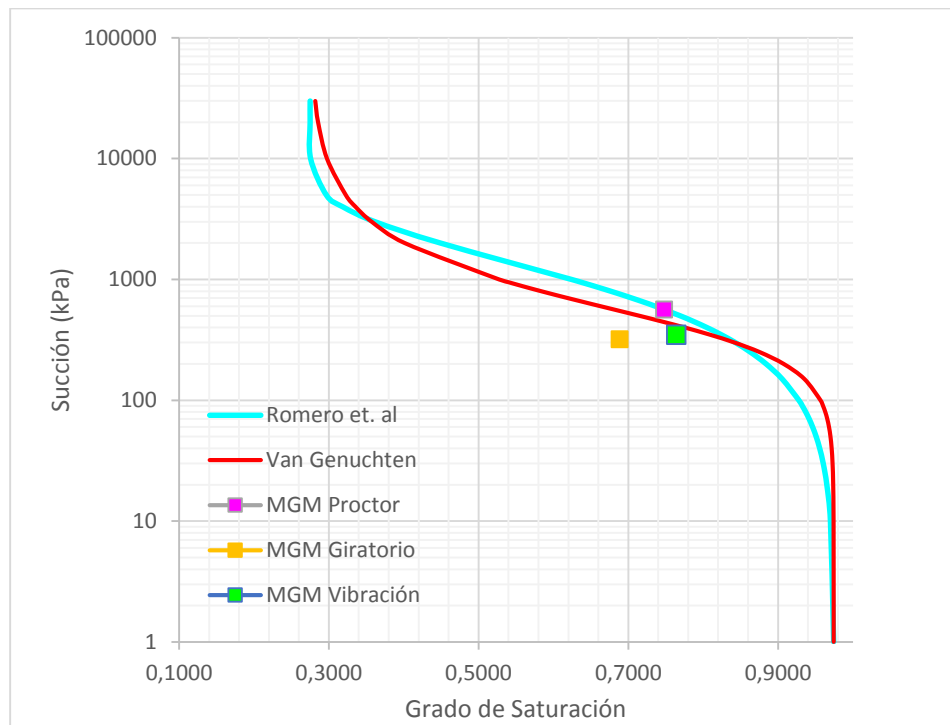
Tabla 20

Resultados ensayo de succión por el método de papel filtro.

Probeta	Masa de la bolsa hermética (g)	Masa del filtro húmedo + bolsa (g)	Masa del filtro seco + bolsa (g)	Masa del agua en papel filtro (g)	Masa del papel Filtro seco (g)	% humedad Papel filtro	Succión (Log KPa)	Succión (KPa)
Proctor	4,7037	5,3327	5,1765	0,1562	0,4723	33%	2,7508	563,44
Giratorio	4,8563	5,3024	5,1238	0,1786	0,4932	36%	2,5062	320,80
Vibración	4,7187	5,3214	5,1673	0,1541	0,4312	35%	2,5429	349,02

Figura 27

Ajuste preliminar a la curva de retención



En la figura 27 se realizó un ajuste preliminar a la curva de retención del material comparándolo con la curva establecida con el modelo de Van Genuchten (Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech, 2021), y con la obtenida por Romero et. al (s.f), allí se puede observar como los datos para las probetas compactadas por Proctor y por vibración coincide con las curvas encontradas en la literatura, mientras que la probeta compactada por la metodología giratoria se aleja un poco de las mismas, esto se puede deber a los cambios estructurales causados por el método de compactación en cada una de las probetas.

CONCLUSIONES

- ✓ Realizada la revisión en la literatura, los principales resultados encontrados en cuanto a especificaciones técnicas para material de subbase sugieren: a) Respecto a la distribución granulométrica de los materiales convencionales, los porcentajes de finos varían entre 0% y 12% principalmente. Comparativamente, con la normativa colombiana que estipula este rango de 0% a 15%, estos valores están ligeramente inferiores siendo un poco más estrictos en el contenido de finos de este tipo de material. b) Respecto al DMA, la mayoría de las especificaciones coinciden en un valor límite de desgaste del 50% como máximo, excepto Chile cuyo parámetro se encuentra en 35% máximo. c) Respecto al índice de plasticidad las especificaciones concuerdan en un máximo del 6% para este ítem excepto por la normatividad Española siendo esta la única presentada que exige un material tipo no plástico (NP). d) En cuanto a los valores de CBR exigidos estos varían desde un 30% al 50% como mínimo exigido en las diferentes especificaciones. En general los requerimientos establecidos en la norma INVIAS están acorde con los exigidos por sus similares en otros países, las principales variaciones se muestran en las distribuciones granulométricas.
- ✓ Los tres métodos de compactación estudiados generaron cambios en las granulometrías de las probetas iniciales debido a la magnitud y forma de aplicación de la energía en cada método. Esto causó que se degradara el material granular y se modificara su composición granulométrica. Sin embargo, se puede decir que el método que menos daño causó al material granular marginal fue el método giratorio, el cual mantuvo la granulometría final muy cerca de la granulometría inicial. Por otro

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

lado, el método de compactación Proctor fue el que causó mayor daño en las probetas, causando cambios significativos en su granulometría y aumentando en 5,3 puntos porcentuales su contenido de finos. Esto se puede atribuir a dos factores principalmente, la forma en que se aplica la energía que genera cambios en la granulometría del material y así mismo las características propias del material el cual posee un alto valor de desgaste en la máquina de los Ángeles, lo que causaría que este tipo de compactación por impacto cause un mayor daño comparado con los otros métodos de compactación evaluados. La probeta compactada por vibración presentó cambios significativos en su granulometría; no obstante, se mantuvo dentro de los límites establecidos por la especificación granulométrica INVIAS y los cambios no fueron tan drásticos como la probeta compactada por la metodología Proctor.

- ✓ De manera preliminar se observó que el método de compactación afectó el comportamiento resiliente del material granular. La probeta compactada por vibración fue la que presentó los menores valores del módulo resiliente, seguida por la probeta compactada por la metodología Proctor que presentó unos valores ligeramente superiores a la anterior. Finalmente, la probeta compactada con el compactador giratorio fue la que presentó los mayores valores de módulo resiliente. Adicionalmente se encontró que con el aumento de la humedad de las probetas los resultados del módulo disminuyeron aproximadamente en un rango de 30% al 40%. Sin embargo se requiere profundizar y realizar ensayos a un número mayor de probetas en futuras investigaciones.
- ✓ Los resultados obtenidos de la medición de succión con la técnica del papel filtro mostraron valores de succión similares para los métodos de compactación de

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

vibración y compactación giratoria arrojando resultados de 320,8 KPa y 349,02 KPa respectivamente mientras la probeta compactada por la metodología Proctor presentó un valor de 563,43 KPa, un tanto superior a las anteriores, las probetas ensayadas fueron compactadas con una humedad optima del 8%. Por otro lado comparando los resultados con las curvas de retención establecidas por el modelo Van Genuchten se observó que las probetas compactadas por la metodologías de Proctor y vibración se ajustan a dicho modelo, mientras que la probeta compactada por la metodología giratoria se aleja del mismo, mostrando una mayor resistencia a la saturación lo que puede ir de la mano con los cambios estructurales presentados en cada probeta debidos a cada metodología de compactación.

- ✓ En los protocolos de compactación se debe tener especial cuidado con la metodología utilizada para adicionar el agua al material ya que este es un factor altamente sensible que puede variar con facilidad si no se tiene la precaución debida. Para este proyecto se adicionó el agua con la ayuda de un aspersor y realizando la mezcla manualmente; el proceso de adición se realizó en procesos cíclicos de adición y mezclado el cual duró un tiempo aproximado de 10 min, obteniéndose una variación de +/- 0,2 % en la humedad deseada.

RECOMENDACIONES

- ✓ Para futuras investigaciones se sugiere realizar ensayos de módulo resiliente a probetas en condiciones saturadas con el fin de analizar su comportamiento en el estado más crítico.
- ✓ Realizar el cálculo del contenido de humedad óptima y densidad máxima por cada método de compactación, para analizar si existe inferencia en el mismo.
- ✓ Realizar el análisis de rigidez a las probetas sometidas a ciclos de humedecimiento – secado con el fin de observar como la fluctuación de humedad afecta el comportamiento mecánico de los materiales granulares marginales.
- ✓ Estudiar el comportamiento de los materiales granulares marginales con condiciones granulométricas naturales y con la variación del contenido de finos para explorar como este puede afectar el comportamiento mecánico del mismo.
- ✓ Realizar mediciones de succión para una gama amplia de contenidos de humedad, y así obtener la curva de retención para cada probeta compactada por diferentes métodos de compactación.

Bibliografía

- Mousa, R., Gabr, A., Arab, M., Azam, A., & Badawy, S. (2017). Resilient modulus for unbound granular materials and subgrade soils in Egypt. *ASCMCES-17*.
- AASHTO. (2004). Materials for aggregates and soil-aggregates subbase, base and surface course.
- Alvares Lugo, A. E., Espinoza Ruiz, L. V., Ortiz Rivera, P., Hurtado Robayo, M. D., Cotes de la Hoz, M. E., & Lopez Esalas, Y. M. (2019). Evaluación de la degradación por compactación de materiales granulares tipo Subbase. *EIA*, 13-25.
- Arnold, G., Werkmeister, S., & Alabaster, D. (2007). The effect of grading on the performance of basecourse aggregate. *Land Transport New Zealand Research Report*, 55.
- Arnold, G., Werkmeister, s., & Werkmeister, D. (2008). Aggregates and Alternative . *Land Transport New Zealand Research Report 335* .
- ASTM. (2020). Standard test methods for determination of maximum dry unit weight of granular soils using a vibrating hammer.
- Austroroads. (2008). Guide to pavement technology Part 4A: granular base and subbase materials.
- Bartley, F. (2001). Weathering characteristics of modified marginal aggregates. *transfund New Zeland Research* .

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Berthelot, C., Podborochynski, D., Marjerison, B., & Saarenketo, T. (2010). Mechanistic characterization of cement stabilized marginal granular base materials for road construction. *NRC research press*.

BRAJA M, D. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México DC: Cengage Learning.

Caicedo, B., Coronado, O., Fleureau, J., & Gomez, C. (2011). Resilient behaviour of non standard unbound. *Road materials and pavement desings*.

Camacho Tauta, J. F., Reyes Ortiz, O. J., & Mendez Gonzales, D. F. (2007). ensayo de compactación giratorio en suelos como alternativa al ensayo de compactación proctor. *Ciencia e ingenieria Neogranadina*, 67-81.

Dwight E, W., & Goldsmith, R. (1973). Geologia de los cuadrangulos H12 de Bucaramanga y H13 Pamplona departamento de Santander. *Boletin Geologico*.

Federal Highway Administration. (2014). Standard specification for construction of roads and bridges on federal highway projects. *FP-14*.

Gomez de Santos, C. (2018). Comportamiento geotécnico de suelos arcillos compactados, respuestas a cargas estáticas y dinamicas. *Universidad complutense de Madrid*.

Harloff Argote, J. (2020). Seguimiento y control de calidad a la construcción de terraplenes con suelos marginales. *Universidad de Antioquia*.

Hicks, R., & Monismith, C. (1971). Factor influencing the resilient response of granular materials. *Highway research record*, 15-31.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Instituto de transportes de México. (2000). módulo de resiliencia en suelos finos y materiales granulares.

INVIAS. (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. *Instituto Nacional de Vias - Colombia*.

Lekarp, F., Isacsson, U., & Andrew, D. (2000). State of the art I: resilient response of unbound aggregate. *Journal of transportation engineering*.

Li, W. (2018). Characterisation and evaluation of marginal basecourse aggregate and the performance improvement with stabilisers. *Universidad de Auckland*.

Li, W., Wilson, D., Larkin, T., & Black, P. (2017). Permanent strain behavior of marginal granular material. *Journal of the transportation research board*, 54 - 63.

Liang, R. Y., Khasawneh, M. A., & Rababah, S. (2008). Predicting moisture - depend resilient modulus of cohesive soils using soils suction concept. *Journal of transportation engineering*.

Meza Ochoa, V. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra. *Boletín ciencias de la tierra*.

Ministerio de obras Publicas de Chile. (2018). Manual de carreteras: especificaciones técnicas generales de construcción.

Ministerio de Transporte y comunicaciones Peru. (2013). Manual de carreteras: especificaciones técnicas generales para la construcción.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Ministerio del Fomento - España. (2001). Pliego de prescripciones Técnicas generales para obras de carreteras y puentes. *PG-3*.

Oficina Nacional de Normalización Cuba. (2004). Carreteras - Pavimentos flexibles- metodo de calculo. *NC*.

Rico Rodriguez, A., & Del Castillo Mejia, H. (1992). Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte. *Instituto Mexicano del Transporte*.

Rodriguez Cifuentes, A., & Cáceres Lopez, O. (2021). Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa en la construcción de vías. *Universidad Militar Nueva Granada*.

Rodriguez Rincon, E., Rondon Quintana, H. A., Veles Pinzon, D. M., & Aguirre Aguirre, L. C. (2006). Influencia de la inclusión de desecho de pvc sobre el CBR de un material tipo Sub base. *Ingenierias , Universidad de Medellin*.

Rojas Quintero, L. M. (2014). Evaluación del módulo resiliente y deformación permanente en material arcillosos con presencia de material friccional. *Pontificia Universidad Javeriana*.

Romero, E. EE Alonso & A. Lloret (s.f). Efecto de las lluvias en terraplenes. Departamento de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña

Rondon Quintana , H. A., Reyer Lizcano, F., & Sanchez Cotte, E. H. (2012). Comportamiento resiliente de materiales finogranulares en subrasantes. *Tecnura*.

Rondon Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. (2007). Comportamiento Resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento. *Ingenierias*.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Rondon Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. (2015). *Pavimentos, materiales construcción y diseño*. Bogota: Eco ediciones.

Servicio geológico Colombiano. (2015). Mapa geológico colombiano. *SGC*.

Texas Transportation Institute. (1992). Cement Coating Marginal Aggregates For Use in asphalt pavements. Research report *1253 I-F*.

Transit New Zeland. (1986). Notes on subbase aggregate specification. *TNZ M/3*.

Transit New Zeland. (2006). Specification for base course aggregate. *TNZ M/4*.

Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech. (2021). Code_bright 2021 user's guide. Department of civil and environmental engineering.

Vic Roads. (2006). Predicting the performance of marginal roadbase materials. *Geopave materials technology*.

Vidal Valencia, J., & Osorio Mora, R. I. (2006). Comportamiento resiliente de suelos fino granulares. *universidad EAFIT*.

Zapata G, G., Correa M, A., Rodriguez G, G., & Arango M, M. (2016). Catálogo de las unidades Litoestratigráficas de Colombia - Granito de Pescadero. *Servicio Geológico Colombiano*.

APENDICES

Apéndice A, protocolo de adición de agua

Para iniciar con los procesos de compactación, se consideró necesario establecer un protocolo para la adición del agua a la muestra esto con el fin de evitar variaciones en la humedad de la misma y que dichas variaciones fueran a afectar los resultados y análisis posteriores, el mismo consistió en lo siguiente:

1. El material deberá estar completamente seco para lo cual se dejará secar durante al menos 16 h en un horno a una temperatura de 110°C, posteriormente se mantendrá a temperatura ambiente por un tiempo aproximado de 2 h con el fin de que el material se enfríe y no presente variación en el peso debido a la temperatura así mismo que no vaya a evaporar el agua a adicionar.
2. Estando el material completamente seco y a temperatura ambiente se procede a depositarlo sobre el recipiente metálico (figura 1) donde se realizará la adición de agua.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Figura 1

Material depositado sobre bandeja metálica para adición de agua



3. Se calcula la cantidad de agua a adicionar para obtener la humedad deseada en el caso de este estudio una humedad de 8%, esta cantidad de agua se medirá en gramos y se utilizará una balanza para tal efecto con el fin de evitar errores en la lectura producidos por el factor humano.
4. Con la ayuda de un aspersor manual similar al mostrado en la figura 2, se agrega agua hasta que el material se vea superficialmente húmedo. En este momento y utilizando guantes de látex o algún material no absorbente se procede a mezclar homogéneamente hasta que el material se vea de una misma tonalidad. En ese punto, se utiliza nuevamente el aspersor con el fin de adicionar una nueva masa de agua y se repite el procedimiento hasta finalizar con la cantidad de agua que se calculó inicialmente. Se realiza en promedio 8 repeticiones del ciclo adición-mezclado; sin embargo, depende de la cantidad de agua a adicionar.

MATERIALES GRANULARES MARGINALES

Figura 2

Aspersor manual para adición de agua



Se realizaron 5 pruebas de ensayo encontrándose que la variación presentada fue de +/- 0,2% tal como se muestra en la tabla 1 por lo que se aceptó esta metodología y se consideró viable para el proyecto.

Tabla 1

Control de humedad en el protocolo de adición de agua

Humedad deseada		8%				
Muestra	Masa inicial de la muestra g	Agua adicionada g	Masa muestra humedad g	Masa final de la muestra seca g	Contenido de humedad	Diferencia
1	5340	427	5765	5333	8,10%	0,10%
2	5789	463	6255	5781	8,20%	0,20%
3	5544	444	5985	5547	7,90%	-0,10%
4	8100	648	8744	8093	8,04%	0,04%
5	8100	648	8751	8113	7,87%	-0,13%
PROMEDIO					8,02%	