



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado
Ingeniería Civil

Fecha: 15 de febrero de 2021

Autores: Juan David Bolaños Zambrano y Maria Alejandra Coqueco Duque.

Nombre del Proyecto de Grado: PARÁMETROS PARA EL DISEÑO MECANICISTA CON AGREGADOS GRANULARES RECICLADOS DERIVADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN SANTIAGO DE CALI.

Director: Dr. Iván Fernando Otálvaro Calle

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

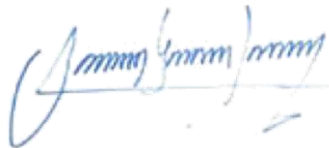
Firma de Director(a) del Proyecto de Grado

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado
en cumplimiento de los requisitos exigidos por la
Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar
el título de Ingeniero Civil.



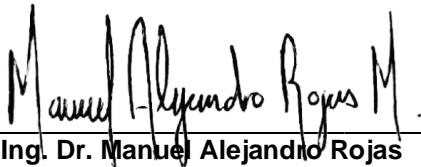
PhD. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano de la Facultad de Ingeniería



Ing. PhD. Orlando Cundumí Sanchez
Director Carrera de Ingeniería



Ing. Dr. Iván Fernando Otálvaro Calle.
Director Trabajo de Grado



Ing. Dr. Manuel Alejandro Rojas
Jurado 1



Ing. Mg. Javier Alexander Pérez
Jurado 2



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Santiago de Cali, 3 de febrero de 2021

Doctor
ORLANDO CUNDUMÍ SÁNCHEZ
Director
Programa de Ingeniería Civil
La Seccional

Asunto: finalización de trabajo de grado

Apreciado profesor Cundumi,

Por medio de la presente hago constar que el proyecto de grado titulado “PARÁMETROS PARA EL DISEÑO MECANICISTA CON AGREGADOS GRANULARES RECICLADOS DERIVADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN SANTIAGO DE CALI”; realizado por los estudiantes Maria Alejandra Coqueco Duque y Juan David Bolaños Zambrano, se encuentra terminado y listo para ser sometido a revisión y evaluación.

Atentamente,

IVÁN FERNANDO OTÁLVARO CALLE, Dr.

Profesor Asociado

Facultad de Ingeniería y Ciencias

e-mail: ifotalvaro@javerianacali.edu.co

Teléfono: (057 2) 3219173



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Santiago de Cali, 3 de Febrero de 2021

Doctor
ORLANDO CUNDUMÍ SÁNCHEZ
Director
Programa de Ingeniería Civil
La Seccional

Asunto: presentación de trabajo de grado

Apreciado profesor Cundumi,

Por medio de la presente le presentamos a usted el proyecto de grado titulado “PARÁMETROS PARA EL DISEÑO MECANICISTA CON AGREGADOS GRANULARES RECICLADOS DERIVADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN SANTIAGO DE CALI”; para ser sujeto de evaluación de los respectivos jurados.

Esperamos que este proyecto cumpla con todos los requerimientos académicos necesarios para su respectiva aprobación.

Atentamente,

MARIA ALEJANDRA COQUECO DUQUE
mariacoqueco@javerianacali.edu.co
Teléfono: 311 355 00 89

JUAN DAVID BOLAÑOS ZAMBRANO
juandb17@javerianacali.edu.co
Teléfono: 318 312 29 67



**PARÁMETROS PARA EL DISEÑO MECANICISTA CON AGREGADOS
GRANULARES RECICLADOS DERIVADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN EN SANTIAGO DE CALI.**

Trabajo Dirigido de Grado – Programa de Ingeniería Civil

Presentado por:

Juan David Bolaños Zambrano

Maria Alejandra Coqueco Duque

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Febrero de 2021

Agradecimientos

Agradecemos su constante apoyo a Iván Fernando Otálvaro por hacer esto posible, al igual que a Alejandra María Gómez y a todos los profesores de la Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali por su buena disposición.

Gracias a nuestros padres por su amor y comprensión en todo el proceso y por habernos dado la oportunidad de pertenecer a una universidad de alta calidad educativa.

Resumen

Durante el siglo pasado la población mundial creció de forma exponencial, y con este crecimiento se incrementó de igual forma el impacto ambiental sobre el planeta, marcado por el uso de recursos naturales no renovables, la emisión de gases efecto invernadero y la disposición de residuos sólidos. Dentro de la generación y disposición de residuos sólidos, un contribuyente de alto impacto es el sector de la construcción. Sector que no sólo tiene una alta tasa de generación de residuos, sino un consumo importante de recursos naturales no renovables, como lo son los agregados pétreos. En particular, para el territorio colombiano se ha venido trabajando para cambiar este impacto ambiental negativo, a partir de diferentes directrices gubernamentales se está trabajando por la incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) en las nuevas construcciones. En principio, uno de los primeros problemas es la reticencia de los constructores a emplear nuevos materiales y en especial residuos, este problema seguido por el bajo número de investigaciones que contribuyan a utilizar en diferentes formas los RCD dentro de las nuevas construcciones. En este trabajo se aborda el segundo problema mencionado, recopilando información de laboratorio acerca del comportamiento cíclico de agregados granulares reciclados derivados de RCD para su uso como bases granulares dentro de la estructura del pavimento. Una vez recopilados y analizados los datos es propuesta una ecuación empírica para estimar el módulo de resiliencia de los agregados derivados de RCD. El desempeño de la nueva expresión es aceptable para estimar el módulo de resiliencia a partir de variables como la composición del residuo, la presencia de contaminantes como suelos finos e incluso la adición de cemento.

Abstract

During the last century, the world population grew exponentially, and with this growth the environmental impact on the planet also increased, marked by the use of non-renewable natural resources, the emission of greenhouse gases and the disposal of solid waste. Inside the generation and disposal of solid waste, a high impact contributor is the construction sector. This sector not only has a high rate of waste generation, but also a significant consumption of non-renewable natural resources, such as stone aggregates. In particular, for the Colombian territory, work has been done to change this negative environmental impact, based on different government guidelines, work is being done on the incorporation of construction and demolition waste (CDW) in new buildings. In the beginning, one of the first problems is the reluctance of builders to use new materials and special waste, this problem followed by the low number of investigations that contributes to using CDWs in different ways within new constructions. In this work the second mentioned problem is approached, compiling laboratory information about the cyclical behavior of recycled granular aggregates derived from CDW for use as granular bases within the pavement structure. Once the data have been collected and analyzed, an empirical equation is proposed to estimate the resilience modulus of the aggregates derived from CDW. The performance of the new expression is acceptable to estimate the modulus of resilience from variables such as the composition of the residue, the presence of contaminants such as fine soils and even the addition of cement.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Identificación del problema	2
1.2	Objetivos	5
1.2.1.	Objetivo general.....	5
1.2.2.	Objetivos específicos	5
1.3.	Justificación y alcance.....	5
1.4.	Metodología de la investigación	7
1.5.	Organización del documento escrito.....	9
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
2.1.	Comportamiento bajo cargas cíclicas de los materiales del pavimento	10
2.1.1.	Esfuerzos inducidos a la estructura del pavimento	10
2.1.2.	Módulo de resiliencia.....	12
2.1.3.	Obtención del Mr a partir de ensayos de laboratorio	16
2.1.4.	Obtención del Mr a partir de relaciones empíricas	20
2.2.	Uso de los RCD.....	26
2.2.1.	Material de relleno.....	27
2.2.2.	Material de base y subbase	27
2.2.3.	Agregado de concreto.....	31
2.3.	Generación de RCD	33

3.	CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN DE SANTIAGO DE CALI	38
3.1.	Clasificación de la composición.....	38
3.2.	Características como base granular para pavimentos.....	39
3.2.1.	Características de gradación	40
3.2.2.	Dureza.....	46
3.2.3.	Límites de Atterberg.....	46
3.2.4.	Características de compactación.....	48
3.2.5.	Resistencia a la compresión simple	52
3.2.6.	Índice de soporte de California (CBR).....	56
3.2.7.	Módulo resiliente.....	60
4.	ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL MÓDULO RESILIENTE DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD.	67
4.1.	Efecto de la adición de cemento en el Mr	67
4.2.	Efecto del contenido de humedad en el Mr.....	68
4.3.	Efecto de la composición del RCD en el Mr.....	69
4.4.	Efecto de la contaminación con suelo al RCD.....	72
5.	RELACIONES PROPUESTAS PARA ESTIMAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA DE AGREGADOS DERIVADOS DE RCD	73
5.1.	Modelo de Seed et al. (1962).	73

5.2.	Modelo de la guía MEPDG (NCHRP, 2004).....	75
5.3.	Modelo de propuesto.....	81
6.	CONCLUSIONES.....	87
6.1.	Conclusiones.....	87
6.2.	Recomendaciones para trabajos futuros.....	90
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Secuencia de carga en el ensayo de módulo resiliente mediante el triaxial cíclico (AASHTO T307-99).....	18
Tabla 2. Ecuaciones empíricas para obtener el módulo de resiliencia a partir del CBR (modificada de Gopalakrishnan & Thompson, 2007).....	21
Tabla 3. Ecuaciones empíricas para obtener el módulo de resiliencia a partir de la resistencia a la compresión simple.	21
Tabla 4. Ecuaciones de predicción del Mr a partir de pruebas en suelos de Virginia.	24
Tabla 5. Aplicaciones de RCD investigadas por distintos autores.	27
Tabla 6. Índices de generación de residuos de construcción y demolición en función del área construida.....	34
Tabla 7. Caracterización de la composición de los agregados derivados de RCD para Santiago de Cali.....	39
Tabla 8. Niveles de tránsito y clases de bases según INVIAS.....	40
Tabla 9. Valores de módulo de finura (Mf) y coeficientes de uniformidad y curvatura (Cu y Cc)	45
Tabla 10. CBR de mezclas de suelo con RCD (Alcalde & Lopez, 2015)	59
Tabla 11. Resultados del ajuste del modelo de Seed et al. (1962) para las bases derivadas de RCD.	74
Tabla 12. Resultados del ajuste del modelo de Seed et al. (1962) para las bases derivadas de mezclas de RCD con suelo.	75
Tabla 13. Resultados del ajuste del modelo de MEPDG (NCHRP, 2004) para las bases derivadas de RCD sin restricciones.....	76

Tabla 14. Resultados del ajuste del modelo de MEPDG (NCHRP, 2004) para las bases derivadas de RCD con restricciones.....	77
Tabla 15. Resultados del ajuste del modelo de MEPDG (NCHRP, 2004) para las bases derivadas de mezclas de RCD con suelo sin restricciones.....	78
Tabla 16. Resultados del ajuste del modelo de MEPDG (NCHRP, 2004) para las bases derivadas de mezclas de RCD con suelo con restricciones.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esfuerzos inducidos en la estructura del pavimento bajo un vehículo que se mueve a velocidad constante (Garnica et al., 2001).....	11
Figura 2. Variación del esfuerzo y la deformación vertical en un pavimento instrumentado (Brown, 1996).	12
Figura 3. Definición conceptual del módulo de resiliencia (Modificado de Thavathurairaja, 2017).	13
Figura 4. Efecto del esfuerzo desviador en el Mr (Seed et al., 1962).	14
Figura 5. Influencia de la succión matricial en el módulo resiliente (Ng, Zhou, Yuan, & Xu, 2013).	14
Figura 6. Efecto del tipo de compactación en laboratorio en el Mr (modificado de Kim & Siddiki, 2006; apud. Lee et al. 1995).....	15
Figura 7. Influencia del contenido de agua y el peso unitario seco en el Mr (modificado de Kim & Siddiki, 2006; apud. Lee et al. 1995).	16
Figura 8. Triaxial cíclico: (a) celda triaxial; (b) aplicación de esfuerzos durante el ensayo (Leite, Motta, Vasconcelos, & Bernucci, 2011).	17
Figura 9. Aumento de módulo de resiliencia en función de la humedad de compactación del RCD.	29
Figura 10. Influencia del reemplazo en los agregados naturales por RCD en la resistencia a la flexotracción (Perez & Caicedo, 2014).....	33
Figura 11. Distribución del estado de la construcción a nivel nacional (Camacol-Valle, 2017)..	35
Figura 12. Licencias de construcción otorgadas en Santiago de Cali (Camacol-Valle, 2017).....	36
Figura 13. Proyección de la generación de RCD con la ecuación (33).	37

Figura 14. Comparación granulométrica RCD con INVIAS para subbase granular (Barrera & Olmedo, 2015).	40
Figura 15. Comparación granulométrías RCD con INVIAS para base granular (Barrera & Olmedo, 2015).	41
Figura 16. Curva granulométrica del RCD como agregado para base (Embus & Quintero, 2015).	41
Figura 17. Curva granulométrica del RCD como agregado para subbase (Embus & Quintero, 2015)	42
Figura 18. Curva granulométrica del RCD como agregado para base (Rengifo & Chavez, 2015).	42
Figura 19. Curva granulométrica del RCD como agregado para subbase (Rengifo & Chavez, 2015).	43
Figura 20. Curva granulométrica del RCD-R como material para sub-base granular (Alcalde & Lopez, 2015).	44
Figura 21. Curva granulométrica del RCD-R como material de afirmado (Alcalde & Lopez, 2015).	44
Figura 22. Granulometría por tamizado junto con la granulometría por hidrómetro del suelo empleado en las mezclas (Alcalde & Lopez, 2015).	45
Figura 23. Curva granulométrica del RCD-R-R ajustada por método Fuller y Thompson como material de Sub-base (Alcalde & Lopez, 2015).	45
Figura 24. Resultados del desgaste en la máquina de Los Ángeles.	46
Figura 25. Resultados de límite líquido para los RCD estudiados.	47
Figura 26. Resultados de humedad óptima de los RCD en Santiago de Cali.	48

Figura 27. Resultados de peso unitario seco máximo de los RCD en Santiago de Cali.	48
Figura 28. Resultados de absorción de los RCD en Santiago de Cali.	49
Figura 29. Curvas de compactación de los RCD en Santiago de Cali.	50
Figura 30. Curva de compactación para cada combinación (Alcalde & Lopez, 2015).	51
Figura 31. Resistencia a la compresión obtenida por los diferentes autores.	52
Figura 32. Efecto del tiempo de curado en las curvas esfuerzo vs deformación (Barrera & Olmedo, 2015).	53
Figura 33. Efecto del tiempo de curado en las curvas esfuerzo vs deformación (Embus & Quintero, 2015).	53
Figura 34. Efecto de la adición de cemento en la curva esfuerzo vs deformación a 28 días (Barrera & Olmedo, 2015)	54
Figura 35. Influencia de la composición del RCD-R en la resistencia a la compresión uniaxial. (Rengifo & Chavez, 2015).	55
Figura 36. Influencia de la adición de suelo en el RCD-R en la resistencia a la compresión uniaxial (Alcalde & Lopez, 2015).	56
Figura 37. Valores de referencia del CBR para RCD de Santiago de Cali.	56
Figura 38. Influencia de la adición de cemento en el CBR (Barrera & Olmedo, 2015).	57
Figura 39. Efecto de la humedad en el CBR (Embus & Quintero, 2015).	58
Figura 40. Efecto de la composición de la base con RCD en el CBR (Rengifo & Chavez, 2015).	58
Figura 41. Influencia del contenido de suelo y el contenido de humedad en el CBR.	59
Figura 42. Módulo de resiliencia para RCD sin adición de cemento (Barrera & Olmedo, 2015).	61

Figura 43. Efecto de la adición de cemento y la edad en el módulo de resiliencia (Barrera & Olmedo, 2015).	61
Figura 44. Efecto la humedad en el Módulo de resiliencia (Embus & Quintero, 2015).	63
Figura 45. Influencia de la humedad en el módulo de resiliencia (Embus & Quintero, 2015). ...	63
Figura 46. Módulo de resiliencia (Rengifo & Chavez, 2015).....	64
Figura 47. Módulo de resiliencia (Rengifo & Chavez, 2015).....	65
Figura 48. Módulo de resiliencia (Alcalde & Lopez, 2015).....	66
Figura 49. Módulo de resiliencia (Alcalde & Lopez, 2015).	66
Figura 50. Comparación del módulo de resiliencia a los 7 días (izquierda) y 28 días (derecha) (Barrera & Olmedo, 2015).....	68
Figura 51. Comparación del módulo de resiliencia con humedades (Embus & Quintero, 2015)	69
Figura 52. Módulo de resiliencia $25\%R_u+R_c/75\%R_b$ y $50\%R_u+R_c/50\%R_b$ (Rengifo & Chavez, 2015).	70
Figura 53. Módulo de resiliencia $50\%R_u+R_c/50\%R_b$ M2 y $50\%R_u+R_c/50\%R_b$ M3 (Rengifo & Chavez, 2015).	70
Figura 54. Módulo de resiliencia $75\%R_u+R_c/25\%R_b$ M2 y $75\%R_u+R_c/25\%R_b$ M3 (Rengifo & Chavez, 2015).	71
Figura 55. Módulo de resiliencia $75\%R_u+R_c/25\%R_b$ M4 y $100\%R_u+R_c$ M1 (Rengifo & Chavez, 2015).	71
Figura 56. Módulo de resiliencia $100\%R_u+R_c$ M2 (Rengifo & Chavez, 2015)	72
Figura 57. Módulo de resiliencia comparación M1 (izquierda) y M2 (derecha) (Alcalde & Lopez, 2015).	72

Figura 58. Influencia de diferentes factores en el parámetro k_1 del modelo del módulo de resiliencia.....	79
Figura 59. Influencia de diferentes factores en el parámetro k_2 del modelo del módulo de resiliencia.....	80
Figura 60. Influencia de diferentes factores en el parámetro k_3 del modelo del módulo de resiliencia.....	81
Figura 61. Predicción del M_r con el modelo propuesto para adiciones en el contenido de cemento.	84
Figura 62. Predicción del M_r con el modelo propuesto para cambios en la composición en función del contenido de residuos cerámicos.....	85
Figura 63. Predicción del M_r con el modelo propuesto para contaminación con suelo.	86

LISTA DE ABREVIATURAS

%clay: Porcentaje de suelo más fino que 0.002mm

σ_{Ciclico} : esfuerzo cíclico

$\sigma_{\text{dMáx}}$: esfuerzo desviador máximo

p_a : presión de referencia

γ_d : peso unitario seco

σ_1 : esfuerzo principal

σ_3 : esfuerzo de confinamiento o esfuerzo principal menor

σ_d : esfuerzo desviador

τ_{oct} : esfuerzo cortante octaédrico

a=Modulo tangente inicial de la curva esfuerzo-deformación

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ATC = área total construida en el periodo de observación

C= contenido de cemento en peso

CBR: índice de soporte de California.

CONPES: Consejo Nacional de Política Económica y Social

IGR^V = es el índice de generación volumétrica que puede oscilar entre 0.050 y 0.071

INVIAS: Instituto Nacional de Vías

k_1, k_2, k_3 : coeficientes de regresión en la ecuación que representa al M_r en función de θ y τ_{oct} .

LIC: es el total de metros cuadrados licenciados para el periodo de dos años atrás

LL: Limite liquido

M1: muestra 1

M2: muestra 2

MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide

Mr: módulo de resiliencia

OC: es el total de obra construida culminada

OI: es la obra iniciada

OP: es la obra en proceso

P200: porcentaje de material que pasa la malla No.200

P_{3/8}: Porcentaje de material que pasa el tamiz 3/8"

P₄: Porcentaje de material que pasa el tamiz #4

P₄₀= Porcentaje de material que pasa el tamiz #40

PI: índice de plasticidad

Qu: resistencia en compresión última

q_u=Resistencia en compresión no confinada

Rb: cerámicos, ladrillo de arcilla y tejas, bloques cerámicos blancos (azulejos).

Rc: concreto, productos de concreto, morteros y bloques de concreto

RCD: residuos de construcción y demolición

RCD-R: agregados reciclados derivados de residuos de construcción y demolición

Ru: agregados no ligados, piedras naturales y agregados con algún contenido de concreto

Sr: Grado de saturación

Sr=100%: curva de saturación de agua teórica

Su: esfuerzo para alcanzar una deformación axial

Tc: tiempo de curado

w: humedad gravimétrica

w_{opt}=Contenido de humedad optimo

Ws=Contenido de agua de los especímenes

γ_{opt} = Peso unitario seco máximo en condición de humedad optima

γ_d : peso unitario seco

μ : relación de Poisson

θ : esfuerzo volumétrico o bulk stress o suma de los esfuerzos principales o $3p$

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad ambiental ha sido siempre un término que se relaciona directamente con las prácticas de ingeniería, las cuales con el paso del tiempo se han ido modificando o acoplando a las necesidades del medio ambiente, sin embargo, es apenas desde la década de 1960 que se toman iniciativas fuertes frente al tema, iniciando por los países desarrollados de la época y 10 años después, se inicia lentamente la concientización en los países en desarrollo. En la actualidad, existen prácticas como la reutilización de los residuos de construcción y demolición (RCD) para su incorporación, por ejemplo, en estructuras de concreto nuevas. Para el caso de Colombia, se ha instaurado la resolución 0472 expedida por el ministerio de ambiente y desarrollo en el año 2017, que especifica una utilización obligatoria, para grandes generadores, del 2% de RCD aprovechables (porcentaje del peso total de materiales utilizados en la obra) con un aumento anual del 2% desde el año de vigencia de la resolución (en el 2020 deberían haberse reutilizado un 8% de residuos, lo cual normalmente no se cumple).

En este estudio, se pretende analizar la posibilidad de incorporar dichos materiales en las capas granulares como bases o subbases de las vías, teniendo como parámetro de aceptación el módulo de resiliencia. Para esto, se requiere primero conocer la composición misma de los RCD, con el fin de verificar la viabilidad que hay de incorporarlos con fines estructurales en las vías.

Los RCD varían de acuerdo con los materiales y las técnicas constructivas locales, razón por la cual es necesario conocer el comportamiento de los agregados reciclados para definir su potencial real de aprovechamiento. La presente propuesta de trabajo de grado tiene como objeto recopilar los trabajos locales de caracterización cíclica de bases granulares con agregados reciclados y proponer unos valores típicos para el diseño de pavimentos con estos materiales para la ciudad de Santiago de Cali.

1.1. Identificación del problema

La metodología de diseño de pavimentos más empleada en Colombia, es la definida por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para el diseño de pavimentos flexibles, que está basada en una ecuación donde se obtiene el número estructural SN que termina siendo un indicativo del espesor de la estructura del pavimento. En esta metodología las variables de diseño son: el número estimado de ejes equivalentes de 8.2 ton en el período de diseño; la variabilidad del tráfico y el error en la predicción del mismo; de la diferencia entre índice de servicio inicial y final; el número estructural; y del módulo resiliente, como único parámetro de diseño que refleja el tipo de material. En 2008 la AASHTO adoptó como guía de diseño la “*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*” (MEPDG), una parte importante de los estados miembros adoptaron inmediatamente esta guía, mientras que algunos se concentraron en crear bancos de datos con las variables de entrada necesarias para diseñar con el nuevo método.

Para la nueva metodología MEPDG uno de los conjuntos de datos de entrada está conformado por las características de todas las capas ligadas y no ligadas. En este conjunto de datos se incluyen parámetros y propiedades como: el módulo resiliente (M_r); la relación de Poisson (μ); el peso unitario seco (γ_d), la humedad gravimétrica (w), características de gradación y los límites de Atterberg. En la guía el módulo resiliente es considerado el parámetro clave de entrada, ya que es el que tiene mayor impacto en la respuesta estructural de la estructura del pavimento, y por lo tanto controla su diseño y desempeño (Thavathurairaja, 2017).

Al analizar la AASHTO-93 (AASHTO, 1993) y la MEPDG (NCHRP, 2004) ambas metodologías incluyen como parámetro básico de los materiales ligados y no ligados el módulo de resiliencia, así que la determinación del mismo influye en los resultados de diseño y desempeño. En países como Colombia, este parámetro es supuesto o definido a partir de correlaciones con otras

propiedades, comúnmente el índice soporte de California o CBR, en especial para los materiales no ligados que conforman la estructura del pavimento.

De lo anterior, es claro que países como Colombia requieren un cambio de paradigma en el diseño de pavimentos flexibles, ya que mantener los proyectos viales con parámetros obtenidos de correlaciones pueden estar generando espesores o insuficientes o sobre diseñados en las capas del pavimento. A esto se le suma que en el país se viene incrementando la legislación y acciones que permiten reducir el impacto en el medio ambiente, y hay en la actualidad resoluciones y Leyes que obligan y favorecen el uso de agregados reciclados derivados de residuos de construcción y demolición RCD.

Si para los agregados naturales aún se tienen vacíos en el conocimiento, y escasas bases de datos, para los agregados derivados de RCD esto es aún mayor. Es por eso, que el presente estudio se plantea la posibilidad de evaluar un agregado derivado de RCD de forma directa mediante el parámetro de módulo de resiliencia (M_r), el cual, hasta el momento, no ha sido tenido en cuenta como parámetro decisivo para definir si es o no utilizable un RCD como estructura de un pavimento, por lo que a partir de investigaciones y correlaciones, se propondrá un modelo que represente los valores aceptables de M_r para que un agregado, sea aceptado como base o subbase de un pavimento.

United Nations (2019), en su documento “perspectivas de población 2019” proyecta un incremento de población mundial de aproximadamente 1000 millones de habitantes al año 2030, lo que, de acuerdo con el DANE (2004), representa un incremento en la contaminación de 4’200,000 toneladas de CO_2 equivalente adicional (0,0042 ton CO_2 / hab), razón por la que en los últimos años, la mayoría de países están enfocando sus estrategias, acciones y campañas, en mitigar el impacto medio ambiental desde todas las perspectivas, incluyendo al sector de la

construcción, por lo tanto, es importante investigar distintas maneras de permitir la incorporación de materiales reciclados en las construcciones de la actualidad. Además de esto, es importante recalcar que la contaminación o generación de RCD viene en aumento en la ciudad de Cali desde hace varios años, pues tan solo en 2018, según el informe de la Contraloría General de Santiago de Cali (2019), se generaron aproximadamente 700 mil toneladas de residuos, lo cual representó un aumento de 50 mil toneladas de residuos con respecto al año 2017, mostrando una tendencia cada vez más inclinada, al aumento de generación de residuos en la ciudad, incumpliendo cada año con lo estipulado en la política nacional para la gestión integral de residuos sólidos CONPES 3874 de 2016.

De acuerdo con UIS-UPME (2018), en Colombia, ha venido en aumento la incorporación de RCD en las construcciones debido a la resolución 0472 de 2017, en donde se especifica que las metas de aprovechamiento de residuos en obra deberán iniciar en el año 2018 con un porcentaje de utilización obligatoria del 2% y un aumento anual del 2% hasta llegar al 30%, en el caso de los grandes generadores de RCD (aquellos que requieren de licencias de construcción y/o intervención y ocupación del espacio público).

Es por todo lo anterior, que se considera de carácter urgente la implementación de los RCD en distintos usos dentro de la industria de la construcción, pues de lo contrario se continuará con una tendencia a la contaminación excesiva sin porcentajes de reutilización aceptables. Por lo tanto, encontrar la manera de que estos agregados formen parte de la estructura de un pavimento, podría aportar a la mitigación de este tipo de contaminación o impacto ambiental.

1.2 Objetivos

La presente investigación se llevó a cabo a partir de un objetivo general y varios específicos.

1.2.1. Objetivo general

Establecer una relación empírica que permita obtener el módulo de resiliencia de materiales granulares derivados de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Santiago de Cali.

1.2.2. Objetivos específicos

- Recopilar resultados de caracterización de materiales granulares derivados de RCD para el diseño del pavimento.
- Analizar el efecto de diferentes variables en el comportamiento cíclico de los RCD disponibles en la ciudad de Santiago de Cali.
- Calibrar un modelo matemático que permita inferir el módulo de resiliencia a partir las variables que influyen el mismo.

1.3. Justificación y alcance

Debido a que en los últimos años la contaminación al medio ambiente ha venido en aumento, el tema se ha convertido en un factor importante a tener en cuenta al tomar cualquier decisión o ejecutar alguna acción, en cualquiera que sea el entorno. Es por eso, que este trabajo pretende contribuir a la reducción del impacto medioambiental negativo que se está generando desde el sector de la construcción, indagando acerca de la posibilidad de incorporar, desde la etapa de diseño de cualquier proyecto, los residuos generados en la construcción y demolición (RCD)

de proyectos de ingeniería que van desde estructuras de puentes o edificios, hasta los mismos acabados de una vivienda. En este caso, se evaluarán parámetros mecánicos de los RCD a partir de investigaciones de distintas fuentes, con el fin de identificar si cuentan con las características necesarias para ser incluidos en la estructura del pavimento de una vía, ya sea como base o subbase.

Según Beja et al. (2020), los RCD tienen un potencial alto de reutilización en la estructura del pavimento agregando aditivos hidráulicos como el cemento portland, y que, a pesar de lo concluido en sus estudios, sería recomendable incluir en las investigaciones próximas, configuraciones de carga que incluyan distintos tipos de ejes o pesos vehiculares, con el fin de simular una situación real a la escala de una vía principal como las intermunicipales de alto tráfico y, además, tráfico pesado. Sin embargo, se considera que aún queda un lecho amplio por investigar en el tema de incorporación de RCD en las estructuras de pavimento y que los resultados obtenidos hasta el momento, no son suficientes para mitigar en gran escala el impacto generado por la construcción al medio ambiente, por lo que es apenas el primer paso hacia lo que es una aplicación más amplia de los RCD en la subbase o posible base de un pavimento de, incluso, tráfico pesado.

Debido a que no existen normativas o guías de diseño a nivel local que contengan bases de datos del módulo de resiliencia de agregados derivados de RCD, esta investigación pretende hallar un modelo matemático teórico que sea útil para el diseño de la estructura del pavimento.

El alcance del trabajo es de grado determinístico, a partir del análisis de resultados obtenidos de distintas fuentes, acerca de la utilización de los RCD en la estructura del pavimento. La caracterización y análisis se enfocarán principalmente en la relación que existe entre el módulo de resiliencia de los RCD con los distintos parámetros mecánicos típicos del diseño de un pavimento, además de en la comparación de los RCD con los materiales típicos empleados en las

bases o subbases de los pavimentos. Lo anterior, se pretende representar finalmente con un modelo matemático calibrado.

1.4. Metodología de la investigación

El documento aquí presentado es una investigación basada en datos obtenidos por otros autores, por lo que, en resumen, esta es una recopilación de datos y un posterior análisis de los mismos. Por tanto, se presenta la metodología que se llevará a cabo para la organización de los datos recopilados y para el análisis de los mismos.

El procedimiento será en primera instancia investigar acerca de los conceptos necesarios como lo son las definiciones de algunos esfuerzos, de los tipos de materiales que existen en la categoría de RCD y, por otro lado, reconocer algunas variables de influencia en el comportamiento mecánico de este tipo de agregados reciclados, siempre centrándose en la ciudad de Santiago de Cali. Lo anterior se denominará como la revisión bibliográfica, la cual contendrá dentro de sí definiciones y conceptos importantes para el entendimiento de los capítulos de resultados, análisis y conclusiones. Luego, se recopilarán los datos de 4 fuentes principalmente que han investigado las propiedades mecánicas de los agregados RCD, así como 4 distintas variables de influencia en el mismo, como lo son: la adición de cemento a las muestras, la composición del RCD, la contaminación con suelo del RCD y el contenido de humedad del material.

Estas fuentes nombradas, en sus investigaciones realizan ensayos de caracterización de los agregados como dureza, límites de Atterberg, entre otros, así como ensayos de caracterización mecánica como el de resistencia a la compresión, índice de soporte de California (CBR), ensayo de compresión triaxial, entre otros. Por lo tanto, los resultados que en la presente investigación se obtengan estarán directamente asociados a la calidad de los ensayos llevados a cabo por las 4 fuentes tenidas en cuenta para el análisis de los datos, por lo que es posible que a lo largo del

documento se encuentren datos de ensayos que parezcan incorrectos, pues estos no se pueden modificar ni corregir debido a que las instalaciones de laboratorios durante el desarrollo de la presente investigación, se encuentran cerradas debido a la pandemia COVID-19.

Los datos recopilados que se utilizaran para el ajuste de modelos constitutivos que predigan el M_r , se ordenan en un mismo libro de Excel (Ver anexo 1), junto con la obtención de variables de esfuerzo necesarias en cada formulación y los ajustes de los modelos. Este libro contendrá principalmente los datos obtenidos de los ensayos de compresión triaxial por cada uno de los autores, de los cuales se calcularán, el esfuerzo volumétrico y la cortante octaédrica, además de posteriormente aplicar distintos modelos para el cálculo del módulo resiliente.

Posteriormente se analizan estos datos recopilados con el fin de identificar los factores de influencia en el comportamiento mecánico (en especial en el módulo resiliente) de un RCD. De este modo, se adoptan el modelo propuesto por Seed et al. (1962) y por la guía MEPDG (2004) para el cálculo del módulo resiliente, además, en el mismo libro de Excel mencionado anteriormente, se utiliza la herramienta solver de Excel, para hacer una regresión y así, calcular el valor de los coeficientes de regresión de cada una de las ecuaciones mencionadas. El procedimiento anterior fue llevado a cabo con 3 iteraciones en las que se iban incluyendo restricciones al solver para ajustar aún más los coeficientes hallados y de esta manera, lograr un ajuste al modelo matemático que estime de una mejor manera el módulo resiliente, es decir, que arroje valores de R^2 más altos.

Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos se plantea el modelo propuesto para la estimación del M_r , así como las limitaciones para la aplicabilidad del mismo. Por otro lado, se evalúa el desempeño del modelo propuesto en donde se observa que tan precisa es la estimación con respecto a un M_r obtenido en el laboratorio y se dan las recomendaciones para trabajos futuros.

1.5. Organización del documento escrito

En el Capítulo 1 está contenida la identificación del problema, los objetivos y el alcance de la investigación.

El Capítulo 2 presenta la revisión bibliográfica, el mismo está dividido en tres partes fundamentales. En la primera parte se incluye el marco teórico como tal, haciendo énfasis en el comportamiento cíclico de los materiales que constituyen la estructura del pavimento. En la segunda parte, se hace una revisión bibliográfica de la utilización de RCD como material de pavimento. Y finalmente, en la tercera parte, se hace un breve análisis de la generación de RCD, con el fin de cuantificar cuál es el potencial de disponibilidad del material para la ciudad de Santiago de Cali.

Dentro del Capítulo 3 se consigna la recopilación de resultados de caracterización de RCD haciendo énfasis en el módulo resiliente.

El Capítulo 4 incluye el análisis de las variables que tienen influencia en el módulo de resiliencia de agregados derivados de RCD, efectuada a partir de los resultados recopilados en el Capítulo 3.

A seguir, en el Capítulo 5 se consignan las propuestas para estimar el módulo de resiliencia de agregados derivados de RCD.

Finalmente, en el Capítulo 6 son incluidas las conclusiones y sugerencias para trabajos futuros.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se incluye la revisión bibliográfica necesaria para contextualizar la temática, el mismo está dividido en tres partes fundamentales. Como se muestra a continuación, primero se definen conceptos y se analiza el comportamiento teórico de los RCD, luego se revisa la utilización común de los mismos y, por último, se cuantifica la disponibilidad de los agregados RCD en la ciudad de Santiago de Cali.

2.1.Comportamiento bajo cargas cíclicas de los materiales del pavimento

El diseño del pavimento desde los enfoques modernos, diseño mecanicista o mecánica de pavimentos, estudia su macro estructura como un sistema de capas sujetas a las cargas de los vehículos, que son cíclicas. De forma similar a otras áreas como la mecánica de suelos, estudia la forma como los materiales se deforman bajo la acción de cargas externas y su desempeño hasta la condición de rotura, estos análisis o cálculos permiten así dimensionar la estructura del pavimento. En este orden de ideas los ensayos dinámicos ante las cargas repetidas de las diferentes capas que componen la estructura del pavimento permiten obtener parámetros necesarios en el diseño del mismo. A continuación, son definidas las variables inducidas por cargas externas, como los parámetros básicos de diseño desde el abordaje mecanicista.

2.1.1. Esfuerzos inducidos a la estructura del pavimento

De acuerdo con Garnica et al. (2001) el campo de esfuerzos inducidos en la estructura del pavimento debido a la acción del tráfico de vehículos es muy complejo, ya que en todo momento los elementos que constituyen las capas del pavimento están sometidas a pulsos de carga que ocasionan esfuerzos normales y cortantes. En la Figura 1 se presenta una representación del cambio en los esfuerzos cuando se desplaza una carga a velocidad constante de derecha a izquierda. El

movimiento de la carga genera entonces una rotación de los esfuerzos principales y la aparición de cortantes en planos horizontales y verticales, los cuales eran muy cercanos de cero debido a la condición de esfuerzos geoestáticos iniciales.

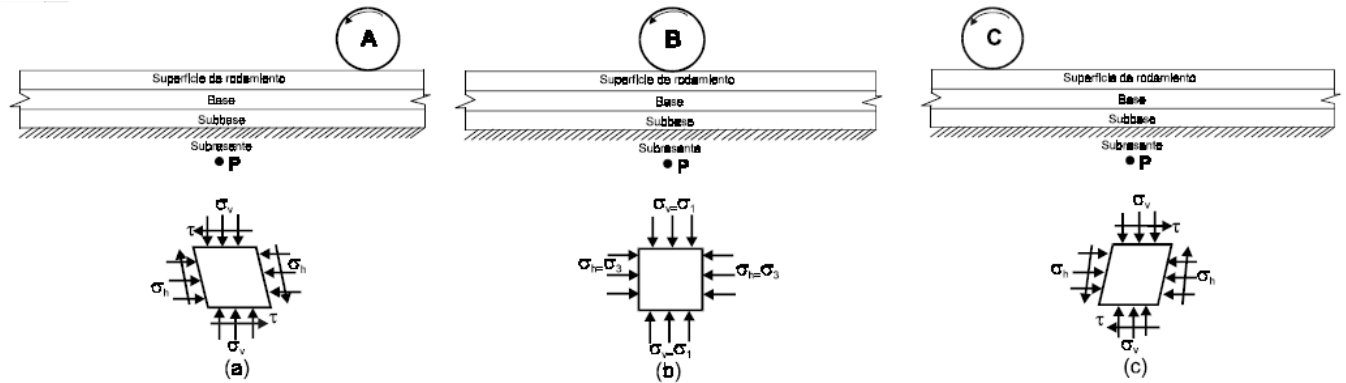


Figura 1. Esfuerzos inducidos en la estructura del pavimento bajo un vehículo que se mueve a velocidad constante (Garnica et al., 2001).

Autores como Brown (1996), han estudiado plenamente el comportamiento esfuerzo deformación en el pavimento, mediante modelos teóricos basados en la teoría de la elasticidad, pruebas de laboratorio y campo, así como modelos mediante el método de los elementos finitos, confirmando la naturaleza de pulso de cargas y rotación de los esfuerzos principales. En la Figura 2 se puede observar como la carga de un vehículo se transmite como un pulso, y la respuesta de deformación sigue este mismo comportamiento, siendo que las máximas deformaciones en el tiempo corresponden a los máximos esfuerzos aplicados. Estos pulsos son repetidos de forma cíclica en la estructura del pavimento con el paso de los vehículos, en términos mecánicos la caracterización de esta respuesta esfuerzo-deformación es fundamental en la comprensión del comportamiento del material, y por ende en el diseño de la estructura del pavimento.

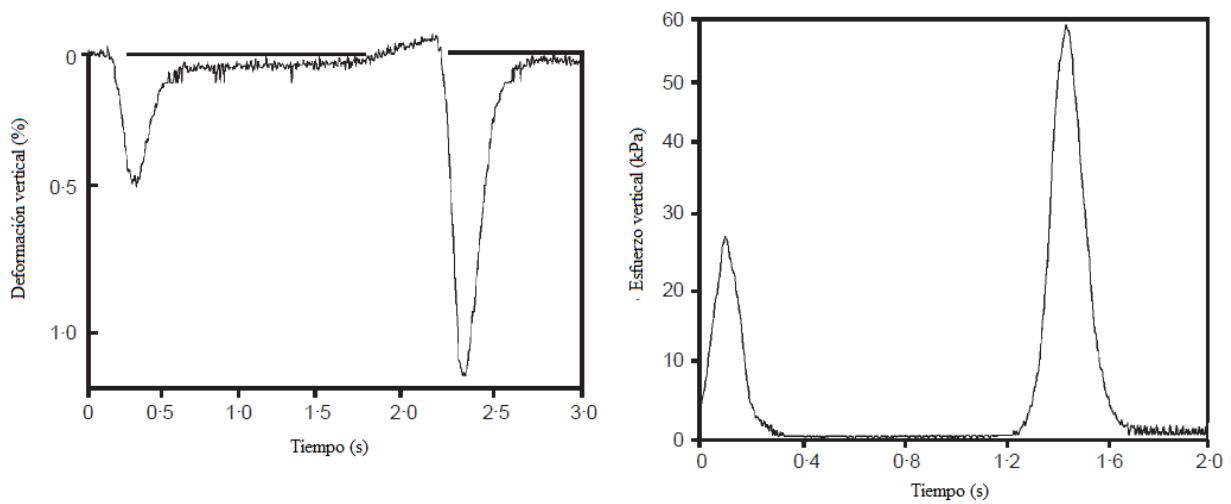


Figura 2. Variación del esfuerzo y la deformación vertical en un pavimento instrumentado (Brown, 1996).

2.1.2. Módulo de resiliencia

El módulo resiliente (M_r), es en esencia similar al módulo de elasticidad, es decir, se puede definir como la relación entre el esfuerzo desviador ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) y la deformación axial elástica experimentada por el material bajo cargas repetidas que pretenden simular la carga del tráfico vehicular. En la Figura 3 se representa el concepto anteriormente definido. Hveem & Carmany (1948) reconocieron que para entender el agrietamiento debido a la fatiga en las superficies de los asfaltos se requería entender la importancia del parámetro llamado módulo dinámico de elasticidad para subrasantes, lo que significa que el comportamiento exhibido en la superficie era función del módulo de resiliencia de los materiales no ligados que subyacían las capas asfálticas, en este caso la base y la subbase.

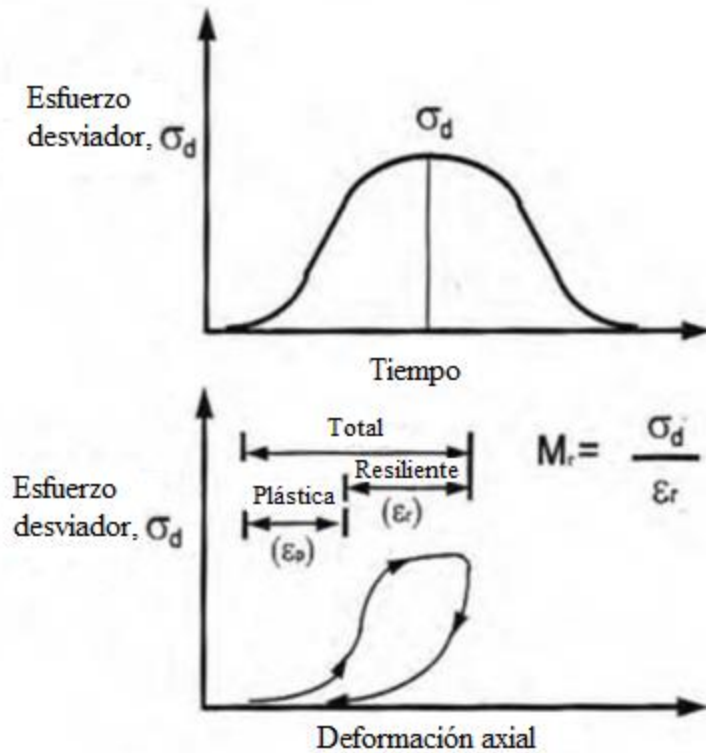


Figura 3. Definición conceptual del módulo de resiliencia (Modificado de Thavathurairaja, 2017).

De acuerdo con Garnica et al. (2001), como se ha determinado en algunos estudios sobre el módulo de resiliencia, este parámetro del suelo no es una propiedad constante, sino que puede ser afectado por algunos factores como el número de aplicaciones del esfuerzo, la tixotropía en arcillas compactadas, magnitud del esfuerzo desviador, método de compactación, grado de compactación y contenido de agua. Desde la definición del módulo de resiliente propuesta por Seed et al. (1962), donde el M_r es la relación entre el esfuerzo desviador y la deformación recuperable (resiliente) axial en el ensayo triaxial cíclico, ha sido mostrado a través de múltiples investigaciones cómo influyen algunas de las variables en el M_r . En la Figura 4 se presenta la influencia de la magnitud del esfuerzo desviador repetido en el M_r .

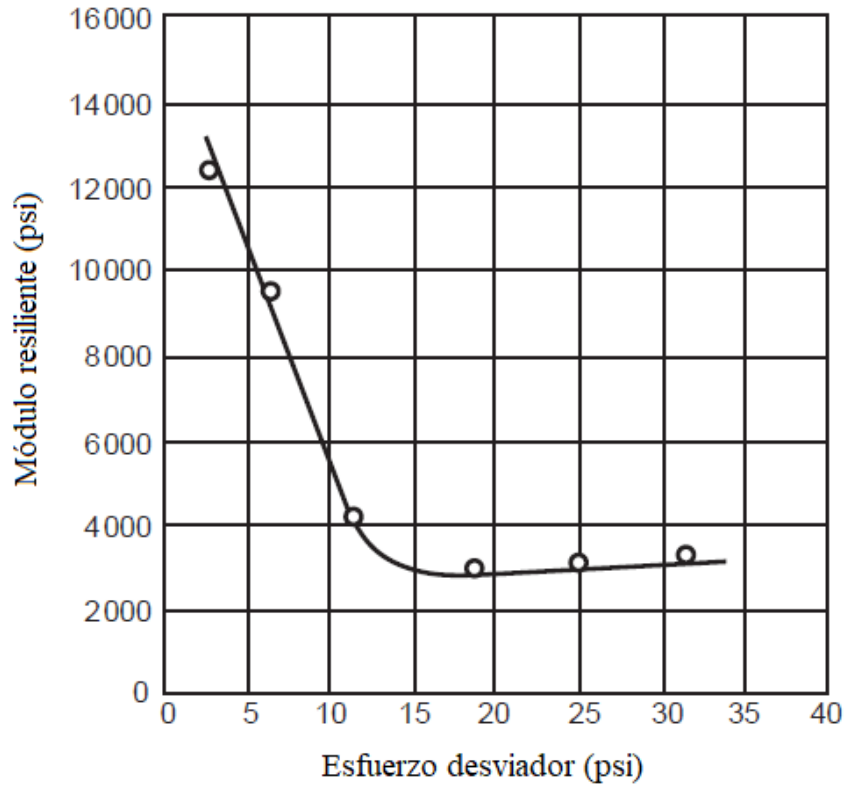


Figura 4. Efecto del esfuerzo desviador en el Mr (Seed et al., 1962).

Posterior al trabajo de Seed et al. (1962) otros autores mostraron la influencia de la succión, dado que usualmente estos materiales no ligados son compactados y no alcanzan la saturación teórica en dicho proceso mecánico. En la Figura 5 se muestra la influencia de la succión en el Mr.

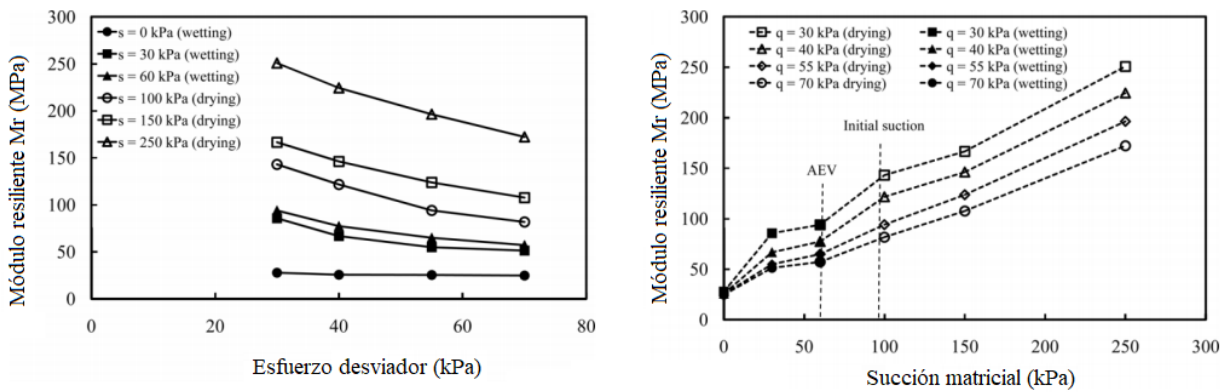


Figura 5. Influencia de la succión matricial en el módulo resiliente (Ng, Zhou, Yuan, & Xu, 2013).

Kim & Siddiki (2006), recopilaron información de la influencia de otras variables en el M_r , tales como el método de compactación (ver Figura 6), incluyendo el peso unitario seco y el contenido de agua (ver Figura 7). De esta forma, es necesario no sólo medir o caracterizar el módulo resiliente, sino también definir las variables que lo afectan, para un diseño adecuado de la estructura del pavimento.

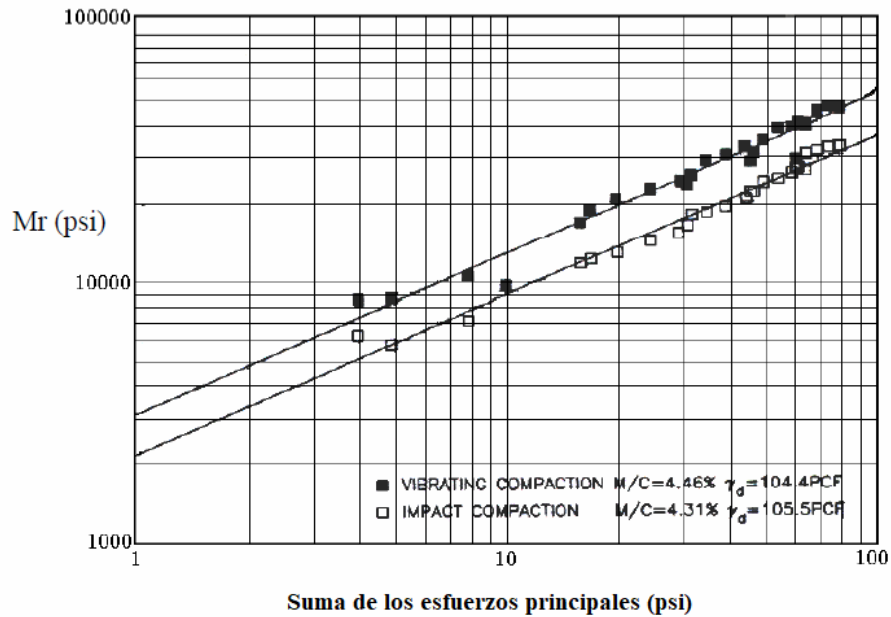


Figura 6. Efecto del tipo de compactación en laboratorio en el M_r (modificado de Kim & Siddiki, 2006; apud. Lee et al. 1995).

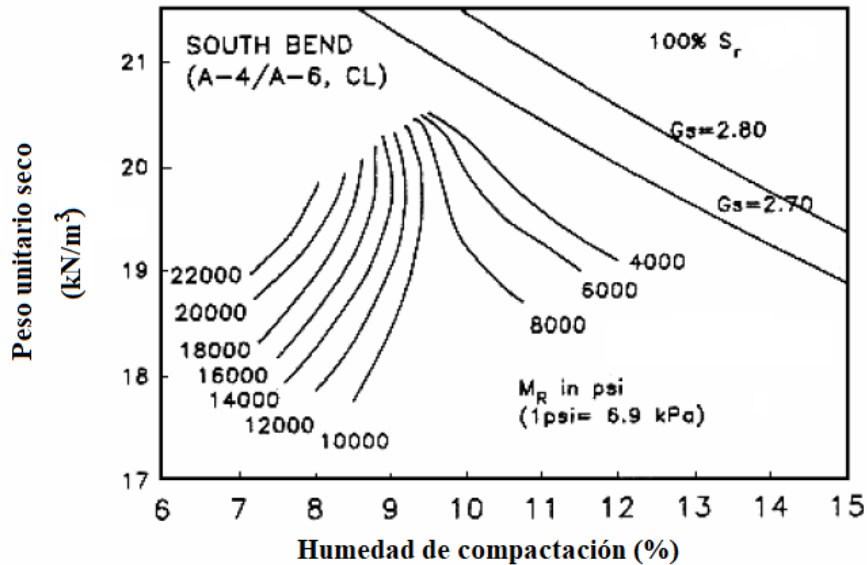


Figura 7. Influencia del contenido de agua y el peso unitario seco en el M_r (modificado de Kim & Siddiki, 2006; apud. Lee et al. 1995).

Dentro de las metodologías empíricas de diseño de pavimentos, el módulo de resiliencia juega un papel fundamental en las características de los materiales que conforman las capas estructurales. El módulo de resiliencia se puede obtener a partir de ensayos de laboratorios como el ensayo triaxial o a partir de correlaciones con otras propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión uniaxial o el índice de soporte CBR, o a través de correlaciones con las propiedades índice, a continuación, se relacionan las formas más comunes para obtener el módulo de resiliencia.

2.1.3. Obtención del M_r a partir de ensayos de laboratorio

Según la norma del Instituto Nacional de Vías - INVIAS (INV 156-5) el procedimiento en el laboratorio se realiza en una cámara de compresión triaxial en la que se dispone una muestra y un fluido para ser objeto de estudio mediante variación fija de carga y alivio, se requiere una duración de la carga de 0,1 segundos y una duración del ciclo entre 1 y 3 segundos.

El Mr se puede medir a partir de una prueba triaxial de carga cíclica o repetida a partir de un efecto generado por una serie de pulsos de presión axial, estos son separados por un intervalo de descarga, aplicado a una muestra de suelo compactado incluyendo una presión de confinamiento constante (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002). En la Figura 8 se muestra la configuración del ensayo triaxial cíclico.

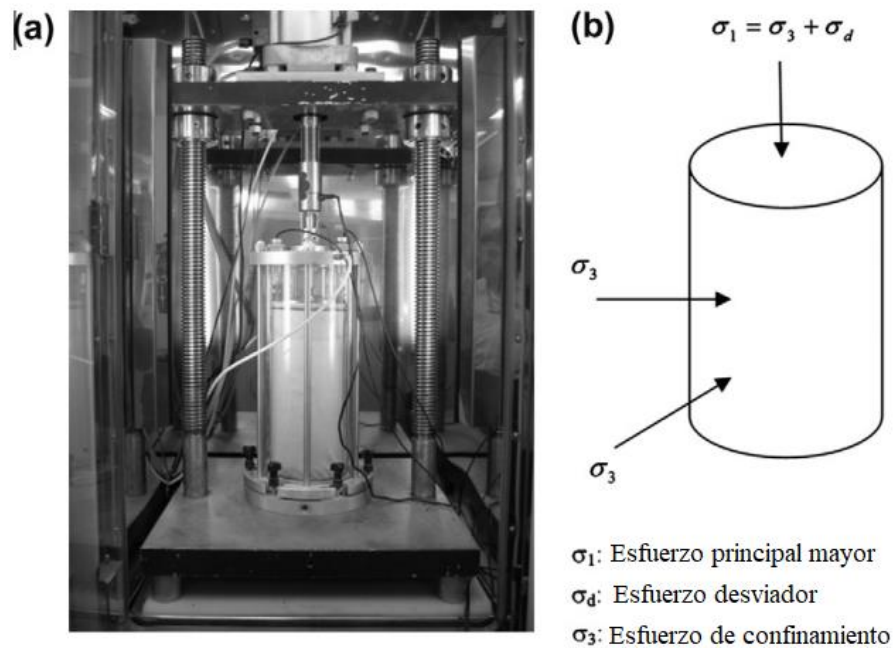


Figura 8. Triaxial cíclico: (a) celda triaxial; (b) aplicación de esfuerzos durante el ensayo (Leite, Motta, Vasconcelos, & Bernucci, 2011).

Cuando el Mr es obtenido a partir de ensayos de laboratorio se suelen efectuar diferentes solicitaciones sobre el material, manteniendo la presión de confinamiento constante y subiendo la relación esfuerzo desviador presión de confinamiento (σ_d/σ_3), razón por la cual se obtiene un barrido de combinaciones tal como se ilustra en la Tabla 1. Debido a esto en el diseño se adopta un modelo lineal elástico (caso de la AASHTO-93 y la MEPDG), modelo que es alimentado a su vez por un modelo del módulo donde los valores son función del estado de esfuerzos. Estos modelos son llamados también relaciones constitutivas dependientes del estado de esfuerzos.

El primer modelo fue propuesto por Seed et al. (1962) para suelos granulares como:

$$Mr = k_1 \theta^{k_2} \quad (1)$$

donde, k_1 y k_2 son los parámetros o coeficientes de regresión; y θ es la suma de los esfuerzos principales o bulk stress. Este modelo describe el Mr sólo como una función del esfuerzo de confinamiento, e ignora el efecto del esfuerzo desviador. En la Tabla 1 se muestra la secuencia de carga típica del ensayo de carga triaxial llevado a cabo para obtener la aproximación de las ecuaciones (1) y (2).

Tabla 1. Secuencia de carga en el ensayo de módulo resiliente mediante el triaxial cíclico (AASHTO T307-99).

Secuencia	Esfuerzo de confinamiento σ_3 (kPa)	Esfuerzo desviador máximo $\sigma_{dM\acute{a}x.}$ (kPa)	Esfuerzo cíclico $\sigma_{C\acute{i}clico}$ (kPa)	Esfuerzo constante $0.1 \cdot \sigma_{dM\acute{a}x.}$ (kPa)	Número de ciclos de carga
0	103,4	103,4	93,1	10,3	500-1000
1	20,7	20,7	18,6	2,1	100
2	20,7	41,4	37,3	4,1	100
3	20,7	62,1	55,9	6,2	100
4	34,5	34,5	31,0	6,9	100
5	34,5	68,9	62,0	10,3	100
6	34,5	103,4	93,1	10,3	100
7	68,9	68,9	62,0	6,9	100
8	68,9	137,9	124,1	13,8	100
9	68,9	206,8	186,1	20,7	100
10	103,4	68,9	62,0	6,9	100
11	103,4	103,4	93,1	10,3	100
12	103,4	206,8	186,1	20,7	100
13	137,9	103,4	93,1	10,3	100
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100
15	137,9	275,8	248,2	27,6	100

En contraste el modelo definido para suelos finos es función del esfuerzo desviador:

$$Mr = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad (2)$$

donde, k_1 y k_2 son los parámetros o coeficientes de regresión; y σ_d es la diferencia de los esfuerzos principales o esfuerzo desviador.

Uzan (1985) propone el denominado modelo universal, presentando una dependencia tanto del esfuerzo volumétrico como del esfuerzo desviador para predecir el Mr de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)^{k_3} \quad (3)$$

donde, k_1 , k_2 y k_3 son los parámetros o coeficientes de regresión; θ es la suma de los esfuerzos principales o bulk stress en las mismas unidades de p_a ; p_a es una presión de referencia igual a $100 \text{ kPa} \approx 1 \text{ kgf/cm}^2 \approx 200 \text{ psf} \approx 14,5 \text{ psi}$, y σ_d es la diferencia de los esfuerzos principales o esfuerzo desviador en las mismas unidades de p_a .

En la guía MEPDG (NCHRP, 2004) es propuesta la siguiente ecuación para determinar el módulo de resiliencia:

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4)$$

donde, k_1 , k_2 y k_3 son los parámetros o coeficientes de regresión; θ es la suma de los esfuerzos principales o bulk stress en las mismas unidades de p_a ; p_a es una presión de referencia igual a $100 \text{ kPa} \approx 1 \text{ kgf/cm}^2 \approx 200 \text{ psf} \approx 14,5 \text{ psi}$, y τ_{oct} es el esfuerzo cortante octaédrico en las mismas unidades de p_a . Las dos variables de estado de esfuerzos se pueden calcular a partir de los esfuerzos principales como:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad \text{ó} \quad \theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 \quad \text{para el ensayo triaxial } \sigma_2 = \sigma_3 \quad (5)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad \text{ó} \quad \tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d \quad \text{para el triaxial} \quad (6)$$

donde, σ_1 es el esfuerzo principal mayor; σ_2 es el esfuerzo principal intermedio; y σ_3 es el esfuerzo principal menor o esfuerzo de confinamiento.

Múltiples modelos constitutivos han sido propuestos, considerando extensiones de los anteriores u otras formas matemáticas como el modelo bilineal de Thompson & Robnett (1979), el hiperbólico de Drumm et al. (1990) o el semilogarítmico de Fredlund et al. (1977), sin tanto éxito como los anteriores.

2.1.4. Obtención del Mr a partir de relaciones empíricas

Se han desarrollado algunas investigaciones debido a que no todas las instituciones y empresas que se dedican al diseño de pavimentos cuentan con los equipos necesarios para obtener los resultados de la prueba del módulo de resiliencia, por lo tanto, se han establecido algunas correlaciones entre el módulo resiliente y otras características del material, las más comunes se basan en el índice de soporte de California (CBR), la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), y el valor R, así como las desarrolladas a partir de las propiedades índice de los materiales no ligados. En el presente documento serán revisadas las correlaciones entre el módulo resiliente en función del CBR y la UCS que son ensayos de mayor ejecución en el país.

Relaciones derivadas a partir del CBR: en la Tabla 2 se resumen algunas relaciones empíricas para obtener el Mr a partir del CBR, sin embargo según Kim & Siddiki (2006) se ha observado que estas correlaciones tienen algunas desventajas, ya que se han aplicado a ciertos tipos de suelos y los resultados obtenidos son variables y han tenido una desviación considerable.

Tabla 2. Ecuaciones empíricas para obtener el módulo de resiliencia a partir del CBR (modificada de Gopalakrishnan & Thompson, 2007).

Ecuación	Referencia
$Mr(ksi) = 1,42 \cdot CBR$ suelos con $CBR > 10$	(7) (Heukelom & Klomp, 1962)
$Mr(psi) = 5409 \cdot CBR^{0,71}$	(8) (Green & Hall, 1975)
$Mr(psi) = 3000 \cdot CBR^{0,65}$	(9) South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR)
$Mr(psi) = 2555 \cdot CBR^{0,64}$	(10) (Powell et al., 1984)
$Mr(psi) = 3116 \cdot CBR^{0,67797}$	(11) (Webb & Campbell, 1986)
$Mr(psi) = 10^{(0,85 \log(CBR) + 2,971)}$	(12) (Newcomb & Birgisson, 1999)
$Log(Mr[ksi]) = 1,0016 + 0,043 \cdot CBR - 1,9557 \left(\frac{Log(\sigma_d)}{CBR} \right) - 0,1705 Log(\sigma_d)$	(13) Lofti (1984) y (Lotfi et al., 1988)
$Mr[psi] = 1545 \cdot CBR, R^2 = 0,87$	(14)
$Mr[psi] = 1545 \cdot CBR^{0,9483}, R^2 = 0,85$	(15) (Gopalakrishnan & Thompson, 2007)

Dónde: Mr es el módulo de resiliencia; CBR es el índice de soporte de California; σ_d es el esfuerzo desviador.

En la Tabla 3 se presentan algunas relaciones empíricas obtenidas a partir del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial o compresión simple, en algunos casos la relación es reportada en función del valor de la resistencia no drenada S_u , y en otros en función de la resistencia a la compresión simple UCS.

Tabla 3. Ecuaciones empíricas para obtener el módulo de resiliencia a partir de la resistencia a la compresión simple.

Ecuación	Referencia
$Mr(\text{con } \sigma_d \text{ hasta } 6\text{psi})[ksi] = 0,86 + 0,317 \cdot UCS[psi]$ $R^2 = 0,468$	(16) (Thompson & Robnett, 1979)
$Mr(psi) = 695,4(Su_{1\%}) - 5,93(Su_{1\%})^2$ $R^2 = 0,97$	(17) Lee et al. (1997)
$Mr(\text{con } \sigma_d \text{ hasta } 6\text{psi})[ksi] = -1,287 + 0,219 \cdot UCS[psi]$ $R^2 = 0,914$	(18) Bejarano and Thompson (1999)
$Mr(\text{con } \sigma_d \text{ hasta } 6\text{psi})[ksi] = -9,23 + 0,7067 \cdot UCS[psi]$ $R^2 = 0,970$	(19) (Gopalakrishnan & Thompson, 2007)

Dónde: Mr es el módulo de resiliencia; UCS es la resistencia a la compresión simple; $Su_{1\%}$ = esfuerzo para alcanzar una deformación axial del 1% en el ensayo de compresión uniaxial; σ_d es el esfuerzo desviador.

Otras ecuaciones han sido obtenidas a partir de propiedades índice mezcladas en algunos casos con algunos resultados de ensayos mecánicos.

También según Hossain & Kim (2014) se puede obtener una correlación a partir de la compactación estática y dinámica como se observa en las ecuaciones (20) y (21).

$$\text{(Compactación estática) } Mr(\text{psi})=7884,2+99,7*Qu+193,1*PI-47,9*P_{200} \quad (20)$$

$$(R)^2=0,86$$

$$\text{(Compactación dinámica) } Mr(\text{psi})=6113+95,1*Qu+173,7*PI-27,8*P_{200} \quad (21)$$

$$(R)^2=0,91$$

donde, Qu es la resistencia en compresión última (psi), el PI es el índice de plasticidad y p200 es el porcentaje de material que pasa la malla No.200.

Según Thompson & Robnett (1979), se realizaron unos estudios a los suelos finos con el fin de obtener una correlación que permitiera obtener el Mr, a partir de esto se propusieron las siguientes expresiones para obtener el Mr a partir del módulo tangencial inicial y la resistencia a la compresión inconfiada (ver ecuaciones (22 y (23), sin embargo, los coeficientes de correlación obtenidos fueron de 0,46 y 0,53 respectivamente.

$$Mr(\text{ksi})=3,49+1,9*\text{módulo tangente inicial} \quad (22)$$

$$Mr(\text{ksi})=0,86+0,307*\text{resistencia en compresión no confinada} \quad (23)$$

Otra de las correlaciones que se puede destacar de las investigaciones es la de Drumm et al. (1990) en la cual se realizaron investigaciones a partir de suelos en Tennessee, a partir de la investigación se determinó la expresión para determinar el Mr como:

$$Mr(\text{ksi})=45,8+0,00052(1/a)+0,188(q_u)+0,45(PI)-0,216(\gamma_d) - 0,25(Sr) - 0,15(P_{200}) \quad (24)$$

$$(R)^2=0,83$$

donde, $M_r(\text{ksi})$ =Valor de módulo de resiliencia; a =Modulo tangente inicial de la curva esfuerzo-deformación (psi); Q_u =Resistencia en compresión no confinada (psi); PI =Índice de plasticidad (%); γ_d =Peso específico seco (pcf); S_r =Grado de saturación (%); y P_{200} =Porcentaje de material que pasa la malla No.200.

Según la anterior investigación, se obtuvo otra expresión según Drumm et al. (1990) en la cual el esfuerzo desviador fue de 2,5 a 25 psi

$$M_r(\text{ksi}) = \frac{(a' + b'\sigma_d)}{\sigma_d}; R^2 = 0,73 \quad (25)$$

$$a' = 318,2 + 0,337(Q_u) + 0,73(\% \text{ clay}) + 2,26(PI) - 0,92(\gamma_d) - 2,19(S) - 0,304(P_{200})$$

$$b' = 2.10 + 0,00039(1/a) + 0.104(Q_u) + 0,09(LL) - 0,1(P_{200})$$

dónde: q_u =Resistencia en compresión no confinada (psi); %clay=Porcentaje de suelo más fino que 0.002mm; PI =Índice de plasticidad (%); γ_d =Peso unitario seco (pcf); S =Grado de saturación (%); P_{200} =Porcentaje de material que pasa la malla No.200; σ_d = Esfuerzo desviador (psi).

Se desarrolló otra ecuación según Hossain (2011) para obtener el módulo de resiliencia según los resultados obtenidos en un estudio de suelos de Oklahoma

$$\frac{M_r}{P_a} = 2494,2 + 0,6(PI) - 8,66(P_{200}) + 16,4(GI) + 165,53(MCR) - 1961(DR) + 185,29\left(\frac{Q_u}{P_a}\right) \quad (26)$$

$$(R)^2 = 0,44$$

donde, M_r (kPa) = Módulo de resiliencia para un esfuerzo desviador de 41.34 kPa y presión de confinamiento de 13,78 kPa; P_a = Presión atmosférica (kPa); PI = Índice de plasticidad (%); P_{200} = Porcentaje de suelo que pasa la malla No. 200; GI = Índice de grupo; MCR = Proporción de contenido de agua (contenido de agua/contenido de agua óptimo); y DR = Proporción de densidad (densidad seca/densidad seca máxima)

Según Hossain & Kim (2014), se realizaron pruebas con suelos de Virginia para obtener el módulo de resiliencia, a partir de este estudio se obtuvieron las siguientes ecuaciones para predecir el Mr, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Ecuaciones de predicción del Mr a partir de pruebas en suelos de Virginia.

Modelo	Muestra preparada para UCS	Modelo de regresión	R ² del modelo	Parámetros del modelo
Resistencia a la compresión no confinada	Compactación estática	$Mr=6062+142Qu$	0,64	Mr=Módulo de resiliencia (psi)
	Compactación por impactos (con pisón Proctor)	$Mr=64283+143Qu$	0,73	Qu=Resistencia a compresión última (psi)
Resistencia a la compresión confinada y propiedades índice	Compactación estática	$Mr=7884,2+99,7Qu+193,1PI-47,9P_{200}$	0,86	PI=Índice de plasticidad (para suelos no plásticos PI=0)
	Compactación por impactos (con pisón Proctor)	$Mr=6113+95,1Qu+173,7PI-27,8P_{200}$	0,91	P_{200} =Porcentaje que pasa la malla No.200
Esfuerzo a 1% de deformación de la prueba de resistencia no confinada	Compactación estática	$Mr=657s_{U\ 1\%}-6,75(s_{U\ 1\%})^2$	0,97	$s_{U\ 1\%}$ =Esfuerzo al 1% de deformación

Otra serie de relaciones empíricas están basadas en encontrar los parámetros de ajuste k_1 , k_2 y k_3 de las relaciones constitutivas presentadas anteriormente.

Yau & Von Quintus (2002), han desarrollado ecuaciones empíricas donde es posible predecir el módulo resiliente (Mr), a partir de distintos parámetros como el contenido de humedad, los límites de Atterberg, la granulometría del material, entre otros, dependiendo del tipo de suelo o material que se esté analizando, como se observa en las ecuaciones (27), (28), (29), (30) y (31).

Material de roca triturada:

$$M_r = [0,7632 + 0,0084(P_{3/8}) + 0,0088(LL) - 0,0371(W_{opt}) - 0,0001(\gamma_{opt})]P_a$$

$$* \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{(2,2159 - 0,0016P_{3/8} + 0,0008LL - 0,038W_{opt} - 0,0006\gamma_{opt} + 2,4 \times 10^{-7} \left[\frac{\gamma_{opt}^2}{P_{40}} \right])}$$

$$* \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{(-1,1720 - 0,00822LL - 0,0014W_{opt} + 0,0005\gamma_{opt})}$$
(27)

donde, LL= Limite liquido; W_{opt} =Contenido de humedad optimo; γ_{opt} = Peso unitario seco máximo en condición de humedad optima; $P_{3/8}$ = Porcentaje de material que pasa el tamiz 3/8"; P_{40} = Porcentaje de material que pasa el tamiz #40; Número de puntos= 853; Error medio al cuadrado= 1699,6 psi; $S_e=41,23$; $S_y=87,42$; $S_e/S_y=0,4716$.

Arenas:

$$M_r = \left[-0,2786 + 0,0097(P_{3/8}) + 0,0219(LL) - 0,0737(PI) \right.$$

$$\left. + 1,8 \times 10^{-7} \left(\frac{\gamma_{opt}^2}{P_{40}} \right) \right] P_a$$

$$* \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{(1,1148 - 0,0053P_{3/8} - 0,0095LL + 0,0325PI + 7,2 \times 10^{-7} \left[\frac{\gamma_{opt}^2}{P_{40}} \right])}$$

$$* \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{(-0,4508 + 0,0029P_{3/8} - 0,0185LL + 0,0798PI)}$$
(28)

donde, PI= Índice de plasticidad; Número de puntos= 2.323; Error medio al cuadrado= 1883,9; $S_e= 43,40$; $S_y= 80,19$; $S_e/S_y=0,5413$.

Suelos de grava de grano grueso:

$$Mr = \left[1,3429 - 0,0051P_{\frac{s}{s}} + 0,0124(\%Clay) + 0,0053(LL) - 0,0231(W_i) \right] p_a$$

$$* [p_a^\theta]^{(0,3311 - 0,0302P_{\frac{3}{s}} - 0,0019(\%Clay) - 0,0050LL - 0,0072PI)}$$

$$+ 0,0093W_s) * \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{(1,5167 - 0,0302P_{\frac{3}{s}} + 0,0435(\%Clay) + 0,0626LL - 0,2353W_s)}$$
(29)

donde, W_s =Contenido de agua de los especímenes; %Clay=Porcentaje de arcilla o material pasa en el tamiz 0,0075; Número de puntos=957; Error medio cuadrado =301,3; S_e =17,36; S_y =26,81; S_e/S_y =0,6474.

Suelos limosos de grano fino:

$$M_r = [1,0480 + 0,0177(\%Clay) + 0,0279(PI) - 0,37(W_s)]P_a * \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{(0,5097-0,0286PI)} * \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{(-0,2218+0,0047(\%Silt)+0,0849PI-0,1399W_s)} \quad (30)$$

donde, %silt=porcentaje de limo fino; Número de puntos=464; Error medio cuadrado=193,0; S_e =13,89; S_y =24,71; S_e/S_y =0,5622.

Suelos arcillosos de grano fino:

$$M_r = [1,3577 + 0,0106(\%Clay) - 0,0437(W_s)]P_a * \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{(0,5193-0,0073P_4+0,0095P_{40}-0,0027P_{200}-0,0030LL-0,0049W_{opt})} * \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{(1,4258-0,0288P_4+0,0303P_{200}+0,0251(\%Silt)+0,0535LL-0,0672W_{opt}-0,0026\gamma_s+0,0025\gamma_s-0,6055\left(\frac{W_s}{W_{opt}}\right))} \quad (31)$$

donde, P_4 =Porcentaje de material que pasa el tamiz #4; P_{200} = Porcentaje de material que pasa el tamiz #200; γ_s =Peso unitario seco del espécimen; Número de puntos = 1.484; Error medio al cuadrado= 557,9; S_e =23,62; S_y =29,22; S_e/S_y = 0,8082.

2.2. Uso de los RCD

A continuación, se presentan algunos de los usos más comunes de los RCD, en donde se especifican sus incorporaciones en distintos proyectos llevados a cabo en varios lugares del mundo.

2.2.1. Material de relleno

Leite et al. (2011), en su trabajo de investigación menciona que una de las primeras aplicaciones de RCD para obras de ingeniería, fue en Lima en el año 1999, quienes se basaron en la posibilidad de que los residuos presentarían la resistencia y dimensiones necesarias en una estructura de contención. De acuerdo con el mismo autor, en el año 2007 evaluó el potencial de los RCD en estructuras de suelo reforzado con geosintéticos por medio de caracterización de las propiedades geotécnicas y la realización de ensayos de caracterización mecánica en laboratorio. Por otro lado, Leite plantea una tabla resumen (ver Tabla 5) donde se muestran varias propuestas investigadas de diferentes autores para las distintas aplicaciones posibles de los RCD en obras geotécnicas.

Tabla 5. Aplicaciones de RCD investigadas por distintos autores (Leite et al., 2011).

Autor	Aplicación	Origen del RCD	Lugar de procesado
Affonso (2005)	Capa de drenaje de vertederos	Construcción, demolición y excavación	En planta eléctrica
Barros (2005)	Sistema de cobertura de vertedero	Construcción, demolición y excavación	En planta eléctrica
Santos (2007)	Estructuras de suelo reforzado	Construcción, demolición y excavación	En planta eléctrica
Araújo Jr. (2010)	Estaca de compactación	Obra en fase de acabados	En laboratorio
Macedo & Lafayette, (2010)	RCD reforzado con fibras sintéticas	Obra en fase de acabados	En laboratorio

2.2.2. Material de base y subbase

Góngora (2011) investigó la influencia del tipo de refuerzo y del material de relleno, en el reforzamiento de una vía no pavimentada, con geo sintéticos, en donde uno de los materiales de relleno investigados fue el RCD-R (residuos de construcción y demolición), el cual mostró el mejor comportamiento mecánico teniendo como referencia la resistencia al número de ciclos de carga

aplicados, los cuales, representan en el ensayo el paso de los vehículos por la carretera. Esto, explica la autora, se puede deber a que el material seleccionado tiene una composición heterogénea y al parecer, granos o elementos más resistentes que el resto de materiales de relleno ensayados.

Gómez (2011), evaluó las propiedades físicas y el comportamiento resiliente de los RCD provenientes de la demolición del estadio Mané Garrincha de la ciudad de Brasilia, Brasil, los cuales fueron ensayados de acuerdo con la normativa para ensayos de agregados convencionales del país. A partir de los ensayos de caracterización física y mecánica efectuados sobre los agregados RCD, se determinó que estos son similares a los agregados calizos utilizados en la ciudad de Brasilia para las bases granulares de los pavimentos. A partir de los resultados obtenidos en el Proctor no se logró establecer una curva de compactación bien definida, sin embargo, se definió la humedad óptima del material en el 13%, pues fue con este contenido de humedad con el que se obtuvo un mejor comportamiento del material. Los índices de rotura obtenidos oscilan entre el 9, 13 y 18% para energías de compactación normal, intermedia y modificada respectivamente, los cuales se calculan basados en la variación de las curvas granulométricas después de pruebas de compactación, por lo anterior, concluye que es potencialmente incorporable en la base de un pavimento.

Habiendo dicho lo anterior, Embus & Quintero (2015) indagaron acerca de la influencia que tiene el contenido de humedad del agregado, en el valor que se obtiene del módulo de resiliencia. Esto lo hicieron con humedades del 10, 11, 13% (humedad óptima del material RCD) y 15%, en donde se observa un considerable aumento del módulo de resiliencia simultáneo con el aumento de la humedad (ver Figura 9), por lo que se podría inferir que un mayor contenido de humedad logra la rehidratación del agregado, pues las muestras de RCD tomadas por estos autores, tienen un contenido de aproximadamente 50% de elementos provenientes de estructuras de

concreto, por lo que el contenido de agua de los agregados contribuye a una rehidratación que genera, en consecuencia, una mayor resistencia que finalmente se observa en los módulos de resiliencia obtenidos para ambas muestras.

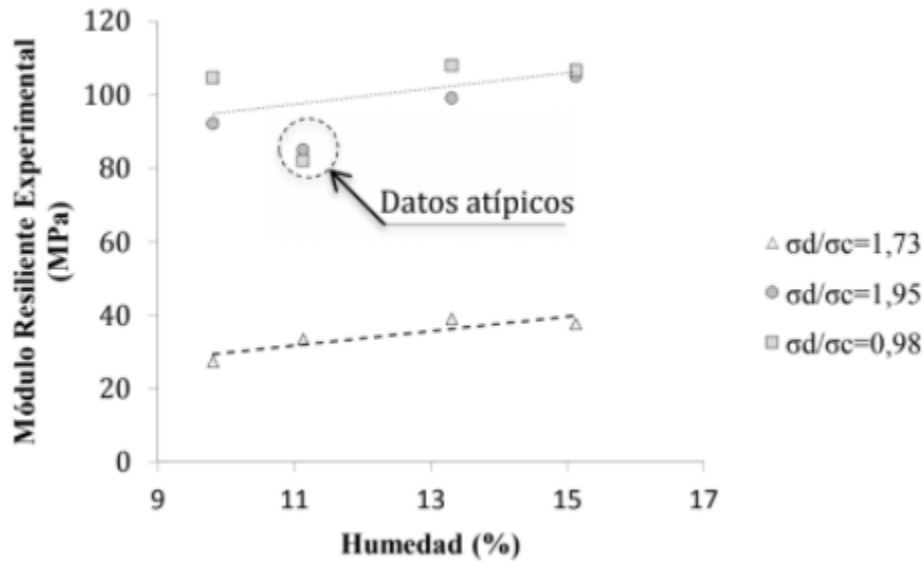


Figura 9. Aumento de módulo de resiliencia en función de la humedad de compactación del RCD.

Barrera & Olmedo (2015), por su parte, analizan el comportamiento mecánico de los RCD para su incorporación en las vías, en este caso, con mezclas que contienen porcentajes de 0, 1, 2 y 5% en peso de sustitución de agregado con cemento portland. Posteriormente, analizan la influencia de este porcentaje de reemplazo en el CBR, en la resistencia a la compresión simple, en el módulo secante, en el módulo de resiliencia, entre otros obtenidos para cada espécimen correspondiente a cada tipo de mezcla, donde, además, mantiene constante en todos los ensayos, la granulometría determinada y la humedad óptima del material granular del 16%. Finalizan afirmando que, en todos los casos, hay un aumento en el resultado de los parámetros analizados a medida que se incrementa la cantidad de cemento incorporado, excepto, en el caso del módulo

secante donde para el 5% de sustitución, se encuentra una disminución de 300 MPa a aproximadamente 250 MPa, con respecto a la mezcla con sustitución del 2%.

En el mismo año, Rengifo & Chavez (2015), indagan acerca de la influencia de la composición misma del RCD que se utilice, para ello, obtuvieron 2 muestras de 10 kg cada una y las caracterizaron con porcentajes de productos pétreos, hormigón y mortero, cerámicos, asfaltos y otros, donde en ambas muestras se obtienen valores cercanos al 50% de contenido de productos pétreos, mientras que el 50% restante se reparte casi equitativamente en hormigón y mortero. Ellos al igual que Barrera & Olmedo (2015), realizaron ensayos de CBR, compresión simple, y determinación de módulo de resiliencia mediante la aplicación de cargas cíclicas. Finalmente, determinan que según INVIAS esta muestra de RCD en particular arroja resultados negativos, pues no se podría utilizar como material granular en bases y subbases, sin embargo, según la Asociación Brasileira de normas técnicas (2004), este podría ser utilizado como base o subbase granular únicamente en pavimentos flexibles. En adición, no se evidencia efecto significativo en el CBR debido a la composición del RCD, mientras que, el módulo de resiliencia crece en cuanto mayor sea la cantidad de productos pétreos, hormigones y morteros en la composición del RCD.

Gómez (2016) expresa que los agregados de tipo RCD vienen siendo cada vez más utilizados como base y sub base en la estructura de los pavimentos, pues en su estudio, indagó acerca del comportamiento mecánico de una base de un pavimento compuesta de áridos reciclados de residuos de construcción, donde se enfoca en la influencia que tienen en el comportamiento, factores como la humedad y el estado de tensiones aplicadas. En base a lo anterior, concluyó que el material que analizó es particularmente sensible a la variación de la humedad y del estado de tensiones aplicadas, pues entre más aumenten estos factores, empeora el comportamiento del RCD utilizado aumentando para mal aspectos como las deformaciones permanentes, por lo que hace

recomendaciones generales para su aplicación como reemplazo parcial o total de una base o sub base de pavimentos flexibles, las cuales indican tener principalmente un buen sistema de drenaje que logre mantener la humedad óptima del material que se utilice, pues especifica que debido a excesivo contacto con el agua, se podría generar acumulación de deformaciones permanentes y un probable colapso total de la estructura del pavimento.

Jimenez & García (2016) investigaron el aprovechamiento de los RCD en proyectos de construcción de pavimentos urbanos, en Colombia. En esta investigación determinaron que los RCD producto de actividades de fresado de carpetas asfálticas, pueden ser reutilizados con fines de producir una capa de aporte estructural, con o sin adición de pétreos nuevos, dependiendo de la composición del agregado resultante de la actividad nombrada.

Beja et al. (2020), proponen una metodología similar a Jiménez & García (2016) en su estudio, pero en esa ocasión, deciden no variar la humedad del agregado, sino la incorporación o no incorporación de aditivos hidráulicos, con el fin de identificar si el hecho de tener material cementante en un agregado reciclado, contribuye o no a la obtención de un mayor módulo de resiliencia. Se muestrearon 3 especímenes, uno sin aditivos hidráulicos y dos más con aditivos hidráulicos (cemento y cal). Comprobó finalmente que la incorporación de aditivos hidráulicos contribuye significativamente en el incremento del módulo de resiliencia, obteniendo valores de módulo de resiliencia a los 28 días de curado de aproximadamente 400 MPa en el caso sin aditivos hidráulicos y de 3000 y 4000 MPa para los adicionados con cal y cemento, respectivamente.

2.2.3. Agregado de concreto

Se realizó un programa experimental en España que según Domingo et al. (2007) evaluó el comportamiento del 20, 50 y 100% de RCD en el concreto estructural, comparando la resistencia mecánica y la trabajabilidad con respecto al agregado natural. Se generó una disminución en la

trabajabilidad debido a que el material de RCD absorbe mayor cantidad de agua que los agregados naturales, además se debe tener en cuenta que a mayor cantidad de material de RCD mayor absorción lo que afectaría más la capacidad de trabajo.

Sin embargo, los resultados de los estudios realizados por Domingo et al. (2007) arrojaron que utilizando un 20% de RCD, el concreto presenta un comportamiento semejante al concreto tradicional, por lo que la resistencia obtenida también es similar. A pesar de lo anterior, se debe tener en cuenta que se presentan disminuciones menores en la resistencia, ya que las partículas de arena natural son más fuertes que la de los agregados reciclados (Mack, Solberg, & Voigt, 1993).

Generalmente los agregados reciclados muestran mayor durabilidad al congelamiento y descongelamiento que un concreto a base de agregado natural. En cuanto a la resistencia a la flexión el concreto con RCD normalmente puede disminuir no más del 10% con respecto al concreto tradicional (Obla et al., 2007).

Lo anterior, representa un reto para aquellos que investiguen esta alternativa, pues en una investigación realizada por Perez & Caicedo (2014), concluyen que en mezclas de concreto en las cuales incorporan reemplazo de agregados naturales con RCD, existe una disminución del 64% en la resistencia de la misma a edades tempranas (debido a materiales cerámicos como el ladrillo), como se observa en la Figura 10, comparado con aquellas que solo tienen como agregados, los agregados naturales. Es apreciable también, que entre más RCD se incorpore, más resistencia pierde la mezcla.

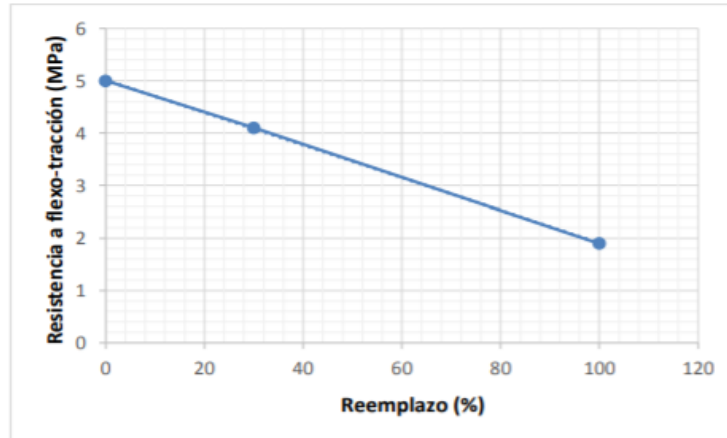


Figura 10. Influencia del reemplazo en los agregados naturales por RCD en la resistencia a la flexotracción (Perez & Caicedo, 2014).

Jimenez & García (2016), presentan como alternativa el aprovechamiento de los RCD de la estación de transferencia del sur de la ciudad de Santiago de Cali la elaboración de ladrillos macizos prensados. Los ladrillos fabricados con los RCD se evaluaron de acuerdo a la norma NTC 4026, obteniendo resistencias a compresión de 17,9 MPa y absorción de agua máxima de 9,79% a los 28 días de curado. Los autores concluyen que es factible utilizar los RCD como agregado para la producción de ladrillos cumpliendo con la normatividad vigente.

2.3. Generación de RCD

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019), se producen aproximadamente 22 millones de toneladas de residuos de construcción al año en Colombia, cifra que es equivalente al 40% del total de residuos sólidos del país. Para la ciudad de Santiago de Cali se producen cerca de 2.500 m³ diarios (912.500 m³ anuales), de este volumen se estima que un 76,6% es aportado por las constructoras y obras de infraestructura, conocida como generación formal y 23,4% es aportado por construcciones y remodelaciones regulares, conocido como sector informal (Robayo Salazar, Matthey Centeno, Silva Urrego, Burgos Galindo, & Delvasto Arjona, 2015).

De acuerdo con Marín (2019), la generación de RCD en el sector formal puede ser estimada a partir de índices de generación, bien sea gravimétricos o volumétricos, en la Tabla 6 se presentan algunos índices definidos para la generación en la literatura, el reportado por Armijos (2019) corresponde a la ciudad de Santiago de Cali, para construcción industrializada y el reportado por Marín (2019) para sistema industrializado. Ambos índices son similares al reportado por Villoria-Sáez (2011), para construcción nueva en España.

Tabla 6. Índices de generación de residuos de construcción y demolición en función del área construida.

Autor	Índice IGR ^V (m ³ /m ²)
Villoria-Sáez (2011)	0,071
Monroy (2015)	0,0155
Agudelo y Rodríguez (2014)	0,144
ICCd (2012)	0,210
Armijos (2019)	0,060
Marín (2019)	0,050

Considerando el uso de índices, se puede estimar la cantidad generada de RCD a partir de la siguiente ecuación:

$$RCD(m^3) = \sum ATC \cdot IGR^V \quad (32)$$

dónde: RCD = es la cantidad en volumen de los residuos de construcción y demolición; ATC = área total construida en el periodo de observación; IGR^V = es el índice de generación volumétrica que puede oscilar entre 0,050 y 0,071, asumiendo como valor medio 0.060 que corresponde al valor reportado por Armijos (2019).

La ecuación (32) presenta una opción atractiva de estimación de los RCD, ya que en la ciudad se puede asumir que el 76,6% de la construcción es licenciada y además se encuentra registrada y es seguida por la asociación gremial Camacol Valle. Sin embargo, dado el flujo de los proyectos en función del tiempo es bastante difícil dicha estimación, de acuerdo con el DANE la industria de la construcción de vivienda se clasifica en cuatro estados: culminada, iniciada, proceso y

paralizada, con las tres primeras podría ser posible estimar la generación de RCD, empleando la siguiente ecuación:

$$ATC(m^2) = P1 \cdot OC + P2 \cdot OI + P3 \cdot OP \quad (33)$$

donde, ATC = es el área total construida para el periodo de análisis; P1, P2 y P3 = son los porcentajes de participación de cada estado de obra en el período analizado; OC = es el total de obra construida culminada; OI = es la obra iniciada; y OP = es la obra en proceso. De acuerdo con Camacol-Valle (2017), la distribución de los estados de construcción para vivienda son entre el 76 y 79% para construcciones en proceso, y del orden del 29% para culminadas e iniciadas. En la Figura 11 se presenta la distribución para los acumulados de los años 2016 y 2017 en metros cuadrados. Para el año 2017 en Santiago de Cali el área culminada fue de 197.323 m², el área iniciada de 392.166 m², el área de obras en curso de 1'577.620 m² y paralizadas de 829.991 m², siendo la distribución del orden del 9, 18 y 73% respectivamente.

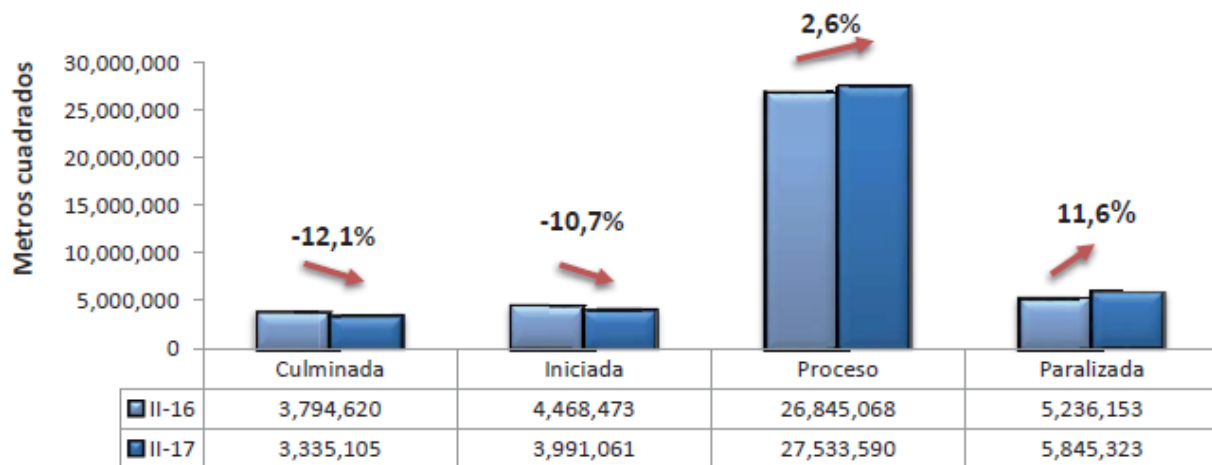


Figura 11. Distribución del estado de la construcción a nivel nacional (Camacol-Valle, 2017).

Una opción alternativa de estimación es a partir de los metros cuadrados licenciados, ya que serían independientes del estado de la obra, sin embargo, es importante aclarar que este tiene un

retardo entre la obtención de la licencia y el inicio de obra como tal, debido en muchos casos a las ventas del proyecto. Asumiendo que en promedio se tiene una brecha del orden de dos años entre el licenciamiento y el inicio de obra el ATC se puede calcular como:

$$ATC(m^2) = LIC^{i-2} \quad (34)$$

donde, ATC = es el área total construida para el periodo de análisis; y LIC = es el total de metros cuadrados licenciados para el periodo de dos años atrás. En la Figura 12 se muestra el histórico de licencias de construcción acumuladas de forma anual según (Camacol-Valle, 2017). En general el promedio anual de licencias de construcción es del orden del 1'000.000.

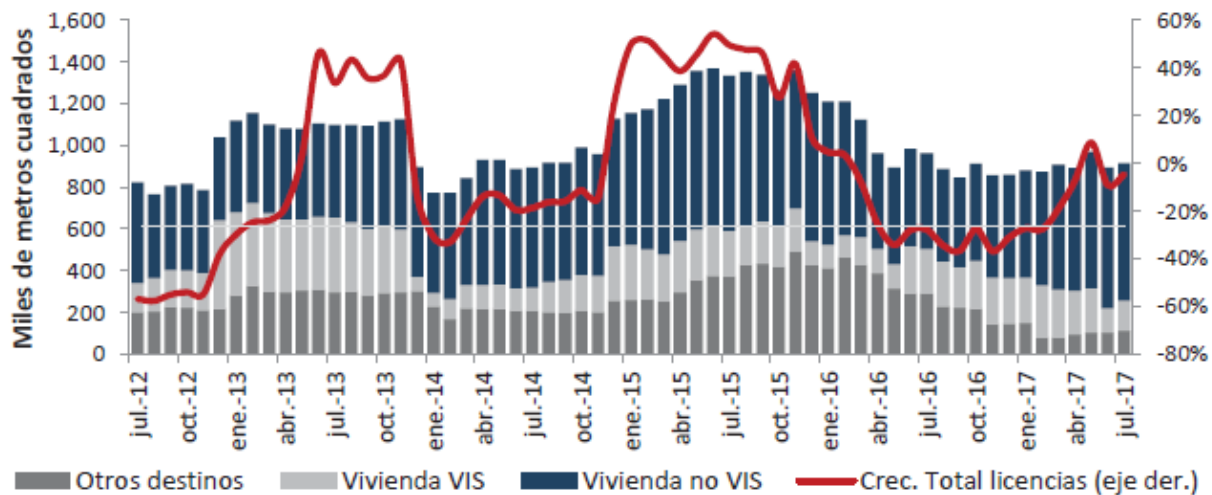


Figura 12. Licencias de construcción otorgadas en Santiago de Cali (Camacol-Valle, 2017).

Empleando la ecuación (33), y los reportes de licencias de nuevas construcciones y remodelaciones de Cali en cifras (Departamento Administrativo de Planeación, 2020), se llevó a cabo la estimación de generación de RCD en la ciudad (ver Figura 13). La proyección a partir de los índices mencionados oscila alrededor de la proyección efectuada por el DAGMA, para el año inmediatamente anterior (2020) la generación de RCD está cercana a los 482.000 m³ anuales, cifra

inferior a la de 912.500 m³ anuales suministrada por Robayo Salazar et al. (2015), finalmente equivaliendo a la mitad de la misma.

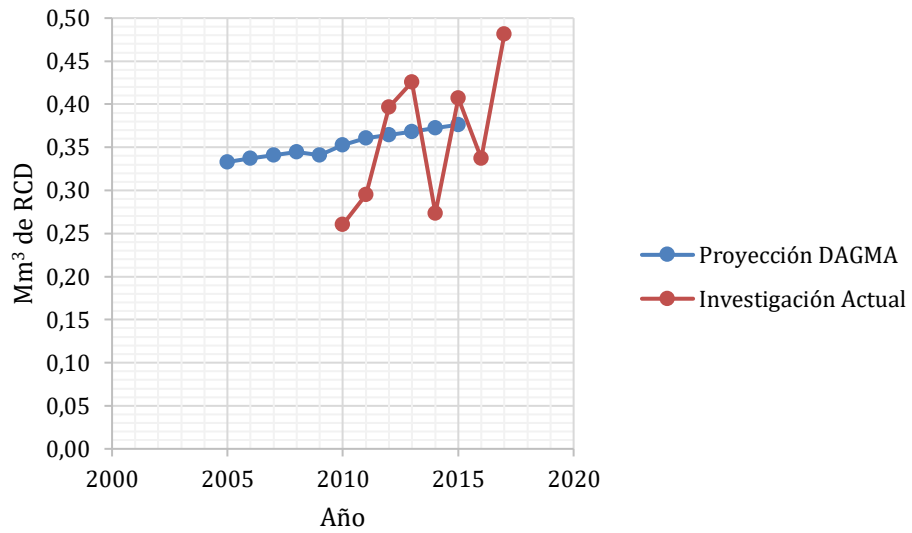


Figura 13. Proyección de la generación de RCD con la ecuación (33).

3. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN DE SANTIAGO DE CALI

En términos generales las Universidades públicas y privadas de la ciudad se han preocupado por la caracterización de los RCD, en este capítulo se resumen algunos de los resultados más relevantes de la misma, teniendo como foco aquellos trabajos que recopilaron información acerca del módulo de resiliencia, donde se analizó el material para ser empleado como parte de la estructura del pavimento, en la mayoría de los casos como base granular.

3.1. Clasificación de la composición

La composición del material fue realizada por todos los trabajos previos siguiendo los parámetros de la Norma Europea EN 933-11 del 2009. Esta norma europea describe un método simple para el estudio de agregados gruesos reciclados con fines de identificación y estimación de las proporciones relativas de su composición, la cual es determinada por inspección visual después de tamizaje mecánico y dejar la muestra bajo agua para retirar y medir el material flotante. La norma mencionada divide la composición de las partículas no flotantes en seis categorías: i) Rc que corresponde a concretos, productos de concreto, morteros y bloques de concreto; ii) Ru que corresponde a agregados no tratados, roca natural y agregados tratados con conglomerantes hidráulicos; iii) Rb que corresponde a elementos de mampostería de arcilla (ladrillos y tejas), unidades cerámicas de albañilería de silicio calcio y concreto aireado no flotante; iv) Ra que corresponde a materiales bituminosos; v) Rg que corresponde a vidrio y vi) X que corresponde a otros, por ejemplo materiales cohesivos como arcilla y limos, varios como metales ferrosos y no ferrosos, madera no flotante, plástico y caucho, y elementos de yeso.

En general los residuos de construcción y demolición tienen una composición que refleja los materiales regionales y las costumbres constructivas de la zona. En Colombia no hay una directriz propia de clasificación de la composición, más allá de la categorización en RCD aprovechables y no aprovechables. Diferentes trabajos han caracterizado los RCD de la ciudad de Santiago de Cali, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Caracterización de la composición de los agregados derivados de RCD para Santiago de Cali según la norma EN 933-11.

Categoría	Embus & Quintero (2015)	Rengifo & Chavez (2015)	Barrera & Olmedo (2015)	Alcalde & Lopez (2015)	Caicedo & Pérez (2015)
Rc	51-54%	46-52%	47%	62%	64%
Ru	23-24%	25-29%	25%	16%	14%
Rb	21-24%	23-25%	23%	21%	22%
Ra	0%	0%	0%	0%	0%
Rg	0-0,3%	0%	2%	0%	0%
X	0-0,1%	0-1%	4%	1%	0%

Al analizar los resultados de la Tabla 7 se aprecia que de los materiales reciclados trabajados se destaca que los residuos asociados a productos cementicios (Rc), constituyen aproximadamente el 50% de los RCD, y los cerámicos y agregados no ligados el 25% aproximadamente, lo que genera unas condiciones aptas para su aprovechamiento a partir de sus materiales constituyentes.

3.2. Características como base granular para pavimentos

De acuerdo con la especificación de construcción E-330-13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), los materiales granulares empleados para bases deben de cumplir con algunas características mínimas tales como su gradación (tamaño y distribución de las partículas), dureza, durabilidad, limpieza y resistencia del material entre otras. En la especificación E-330-13 se fijan los valores mínimos requeridos de cada una de estas características. A continuación, se hace un resumen de aquellas reportadas para la ciudad de Santiago de Cali en los trabajos de grado

recopilados. Para efectos de clasificación del tipo de intervención en función de la importancia de la vía el INVIAS define tres niveles de tránsito como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Niveles de tránsito y clases de bases según INVIAS.

Nivel	Ejes equivalentes de 80kN en el carril de diseño	Clase de base granular
NT1	$\leq 0,5$	Clase C
NT2	$>0,5$ y $\leq 5,0$	Clase B
NT3	$>5,0$	Clase A

3.2.1. Características de gradación

En cuanto a la distribución granulométría original de los materiales trabajados, se puede decir que ninguno cumple con los husos previstos por las especificaciones del INVIAS para bases y subbases granulares como se observa en la Figura 14 para el caso de Barrera & Olmedo (2015). Por ello, antes de hacer los ensayos mecánicos, muchos de los autores ajustaron la granulométría al límite grueso de las especificaciones nacionales. Las distribuciones originales y ajustadas se muestran en las Figuras 15 a 17.

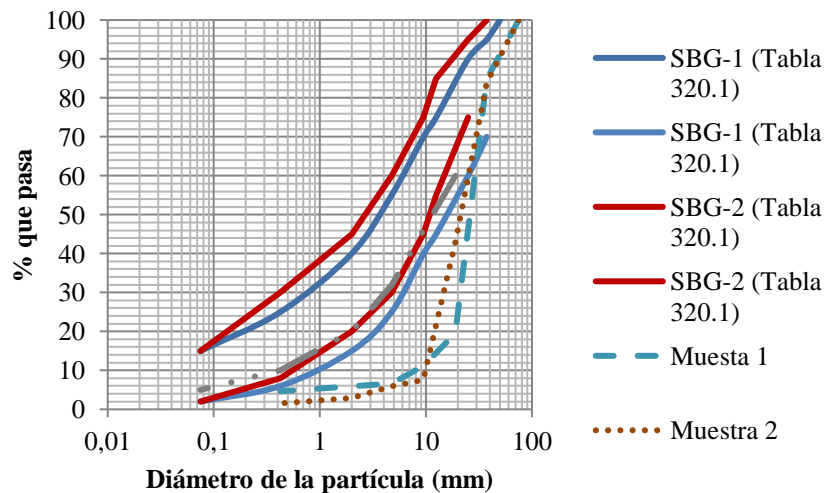


Figura 14. Comparación granulométrica RCD con INVIAS para subbase granular (Barrera & Olmedo, 2015).

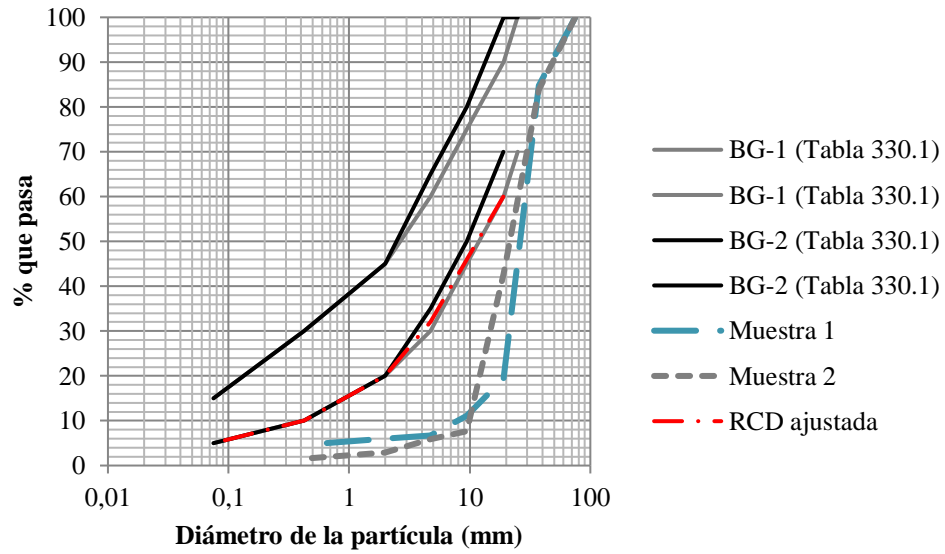


Figura 15. Comparación granulometrías RCD con INVIAS para base granular (Barrera & Olmedo, 2015).

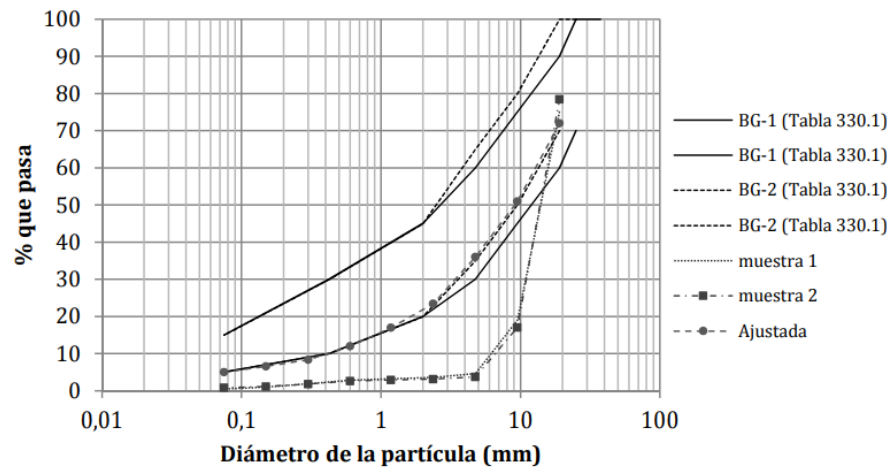


Figura 16. Curva granulométrica del RCD como agregado para base (Embus & Quintero, 2015).

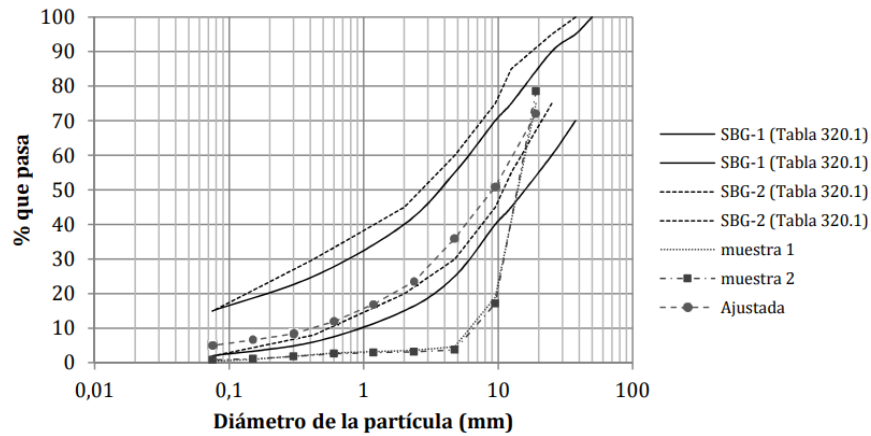


Figura 17. Curva granulométrica del RCD como agregado para subbase (Embus & Quintero, 2015)

Por otro lado, Rengifo & Chavez (2015) obtuvieron resultados de granulometría similares como se observa en la Figura 18 y en la Figura 19, donde se aprecia que cuentan con un material muy grueso, por lo que realizan el ajuste mostrado en las mismas figuras.

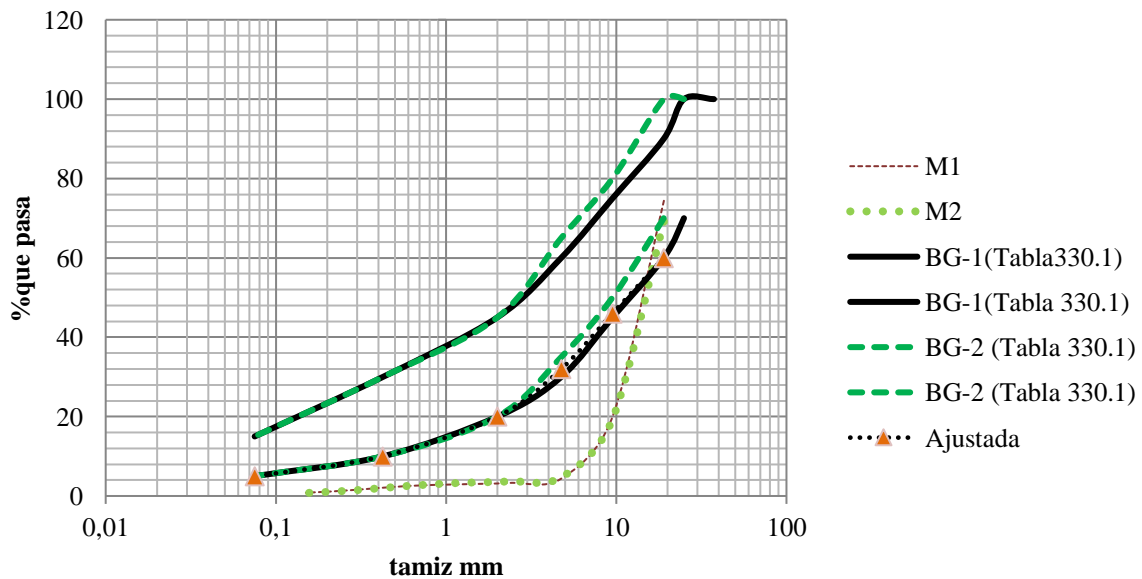


Figura 18. Curva granulométrica del RCD como agregado para base (Rengifo & Chavez, 2015).

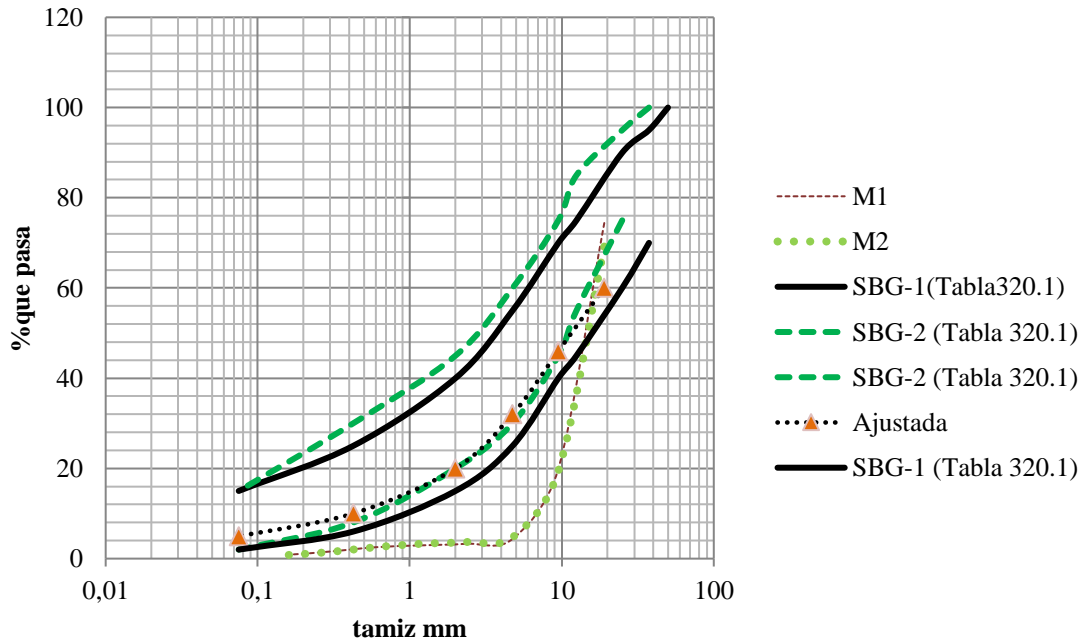


Figura 19. Curva granulométrica del RCD como agregado para subbase (Rengifo & Chavez, 2015).

Por último, Alcalde & Lopez (2015) por su parte, evalúan su muestra para la incorporación en la subbase de un pavimento o como material de afirmado, donde también encuentran que según su granulometría no sería adecuado utilizarlo con este fin, pues por el contrario de los autores anteriores, estos tienen una muestra con partículas muy finas (ver Figura 20 y Figura 21), por lo que tuvieron que realizar hidrometría como se observa en la Figura 22 donde se obtiene una curva más definida con la hidrometría realizada. Teniendo en cuenta lo anterior, realizan el ajuste de la granulometría del material mostrado en la Figura 23, para obtener una distribución deseable para su utilización con los fines especificados anteriormente.

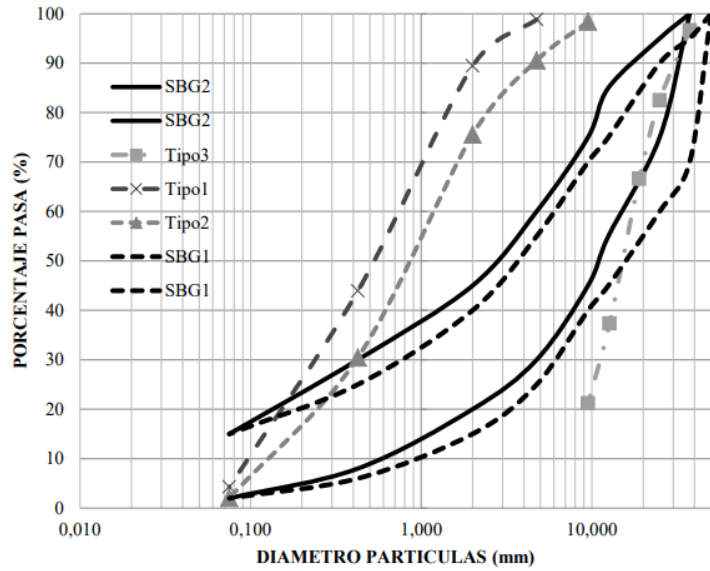


Figura 20. Curva granulométrica del RCD-R como material para sub-base granular (Alcalde & Lopez, 2015).

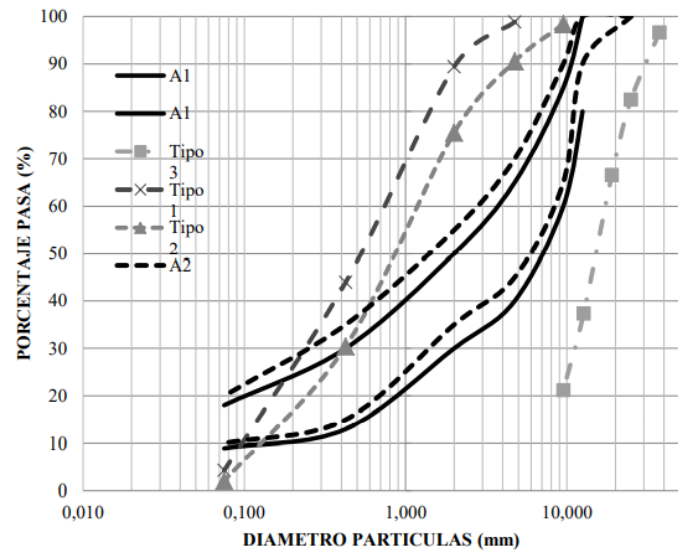


Figura 21. Curva granulométrica del RCD-R como material de afirmado (Alcalde & Lopez, 2015).

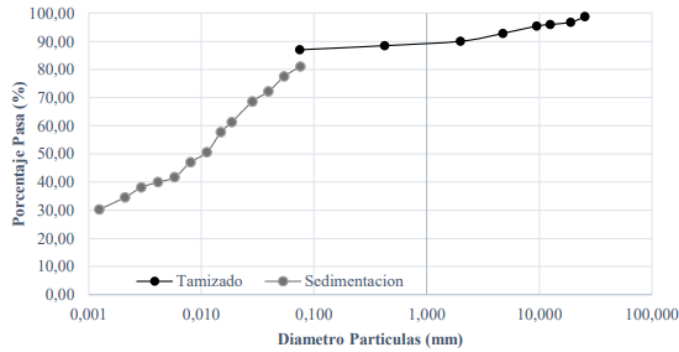


Figura 22. Granulometría por tamizado junto con la granulometría por hidrómetro del suelo empleado en las mezclas (Alcalde & Lopez, 2015).

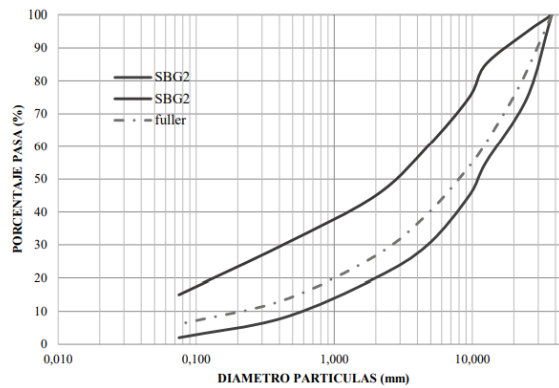


Figura 23. Curva granulométrica del RCD-R-R ajustada por método Fuller y Thompson como material de Sub-base (Alcalde & Lopez, 2015).

Por consiguiente, considerando los resultados de las granulometrías anteriores (las cuales son del material sin modificaciones), se calcula para cada una el valor del módulo de finura y de los coeficientes de uniformidad y curvatura, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de módulo de finura (MF) y coeficientes de uniformidad y curvatura (Cu y Cc)

Parámetro	Barrera y Olmedo		Embus y Quintero		Rivera y Chávez	Alcalde y López
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2		
MF	7,3	7,3	7,6	7,7	8,6	0,8
Cu	3,8	1,3	2,6	2,4	2,6	N.A.
Cc	2,0	1,7	1,2	1,2	1,2	N.A.

Donde: MF; módulo de finura calculado como la sumatoria de %retenidos acumulados de tamices específicos: Cu; Coeficiente de uniformidad: Cc; Coeficiente de curvatura.

3.2.2. Dureza

La dureza de los materiales granulares derivados de RCD fue determinada en todos los trabajos estudiados mediante el desgaste en la máquina de Los Ángeles, en la Figura 24 se presentan los resultados obtenidos. En general, ninguno de los materiales cumple los requisitos de dureza establecidos por INVIAS, que fija $\leq 50\%$ para materiales clase B y C y $\leq 35\%$ para clase A.

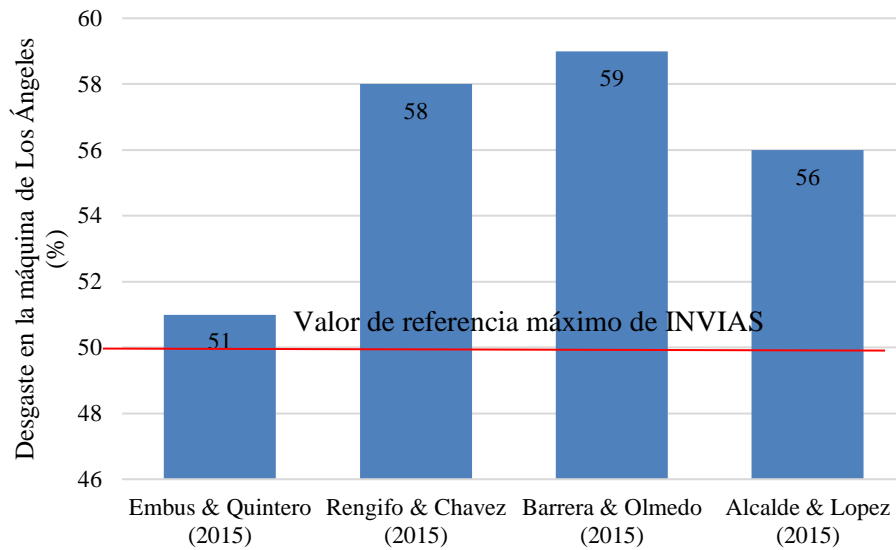


Figura 24. Resultados del desgaste en la máquina de Los Ángeles.

3.2.3. Límites de Atterberg

Autores como Barrera & Olmedo (2015) obtuvieron resultados de límite líquido (de acuerdo al procedimiento de INV-125) similares para las 3 muestras tomadas, los cuales fueron 39, 32 y 37% de contenido de humedad, lo que arroja como resultado un promedio de 35%.

Rengifo & Chavez (2015) y Alcalde & Lopez (2015) obtuvieron un resultado en el límite líquido de 30% de humedad registrado con una penetración de 20mm. Según INVIAS el resultado de ensayo cumple con los requisitos mínimos ya que es inferior al 40%, por lo que se puede concluir que este material es apto para su implementación en bases y subbases granulares de pavimentos (de acuerdo únicamente con este parámetro), sin embargo, el límite plástico no se pudo

calcular ya que no tenía minerales de arcilla en su composición, situación que impide obtener la consistencia necesaria para la realización del ensayo. Como se observa en la Figura 25, para el caso de los autores aquí citados, todos los materiales ensayados cumplen con la especificación del INVIAS en el parámetro de límite líquido de un material granular. De acuerdo con las características de plasticidad ninguno de los autores pudo determinar el límite líquido con la confección de rollos, por lo que se designa el material como no plástico NP.

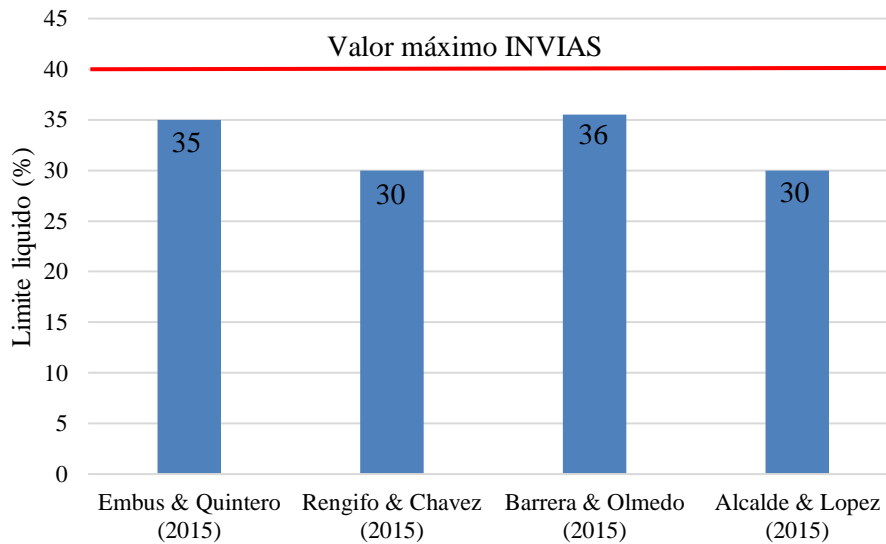


Figura 25. Resultados de límite líquido para los RCD estudiados.

De acuerdo con los resultados anteriormente mostrados, para todos los materiales el límite líquido como indicador de limpieza en el agregado está dentro de los rangos permisibles de INVIAS en el caso de Colombia. A pesar de que los autores aquí mencionados tienen muestras de RCD tomadas en momentos diferentes, los resultados obtenidos son similares para el límite líquido, de lo que, para el caso de Cali, se podría inferir que los residuos de la ciudad generan un RCD con límite líquido que ronda el 35% de contenido de humedad.

3.2.4. Características de compactación

En cuanto a la capacidad de compactación implícita de un material, cada uno de los autores realizaron el ensayo de compactación. En las Figuras Figura 26, Figura 27 y Figura 28, se resumen las características de compactación para la energía de Proctor modificada, en general la humedad óptima para todas las investigaciones osciló al rededor del 16%, mientras que el peso unitario seco máximo varió desde 17,4 a 18,5 kN/m³.

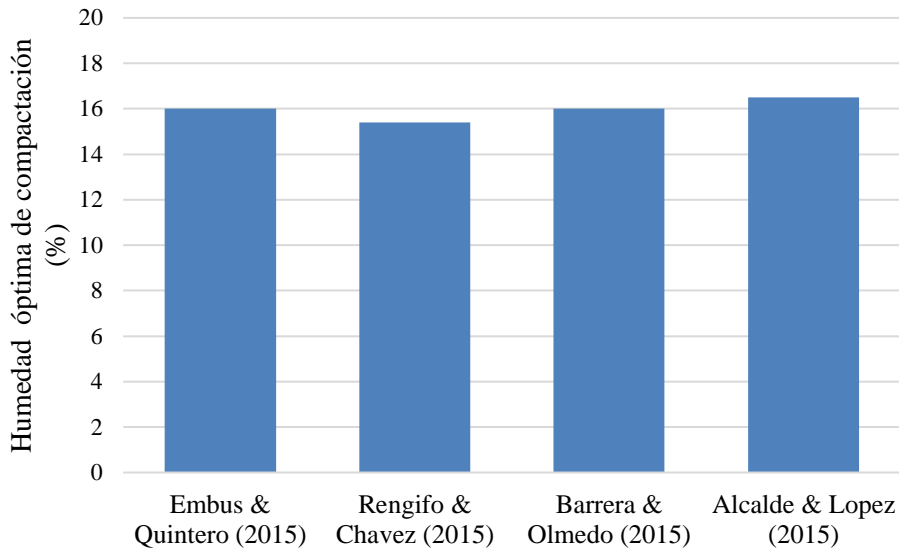


Figura 26. Resultados de humedad óptima de los RCD en Santiago de Cali.

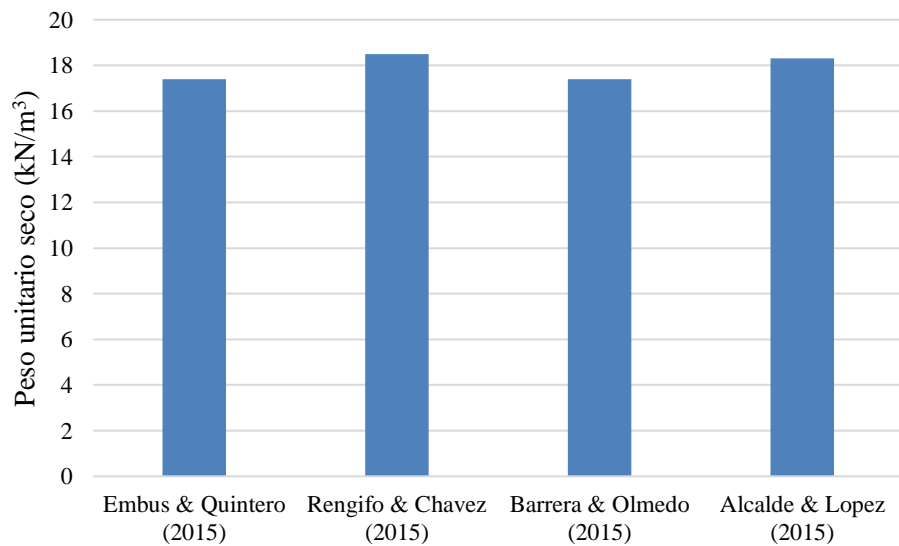


Figura 27. Resultados de peso unitario seco máximo de los RCD en Santiago de Cali.

Por otro lado, se evidencio que la absorción de este tipo de agregados varia bastante con respecto a cada muestra analizada, oscilando en este caso entre los valores de 2% y 13%, por lo cual, no se logra identificar que para este parámetro se vaya a obtener un valor de absorción alrededor de un valor especifico, sin embargo, se podría decir que se encontrará en un rango de valores típicos.

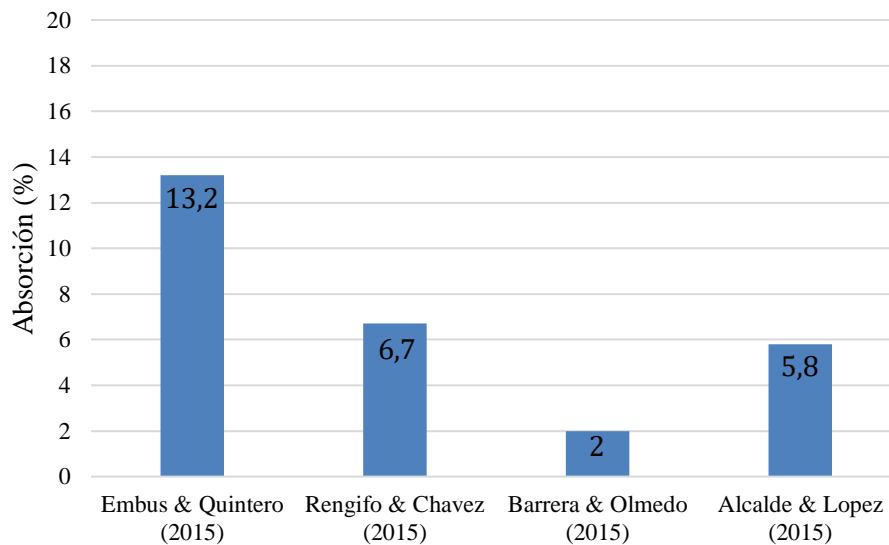


Figura 28. Resultados de absorción de los RCD en Santiago de Cali.

En la Figura 29 se presentan las curvas de compactación obtenidas, teniendo como referencia la curva de saturación teórica en función de la gravedad específica de la fracción fina. Tal como se mencionó anteriormente, la humedad óptima parece presentar menor variación, mientras que el peso unitario seco máximo tiene mayor variación, por otra parte, las curvas presentadas por Barrera & Olmedo (2015) y Embus & Quintero (2015), que coinciden con los valores más bajos de peso unitario seco máximo, comienzan de forma horizontal en función de la humedad de compactación creciendo después del 12% hasta alcanzar el peso unitario seco máximo, efecto que denota la acción del agua en la rama seca, donde inicialmente en lugar de

lubricar y facilitar el acomodamiento de las partículas parece migrar a llenar los poros de los agregados cuyo valor numérico es igual a la absorción.

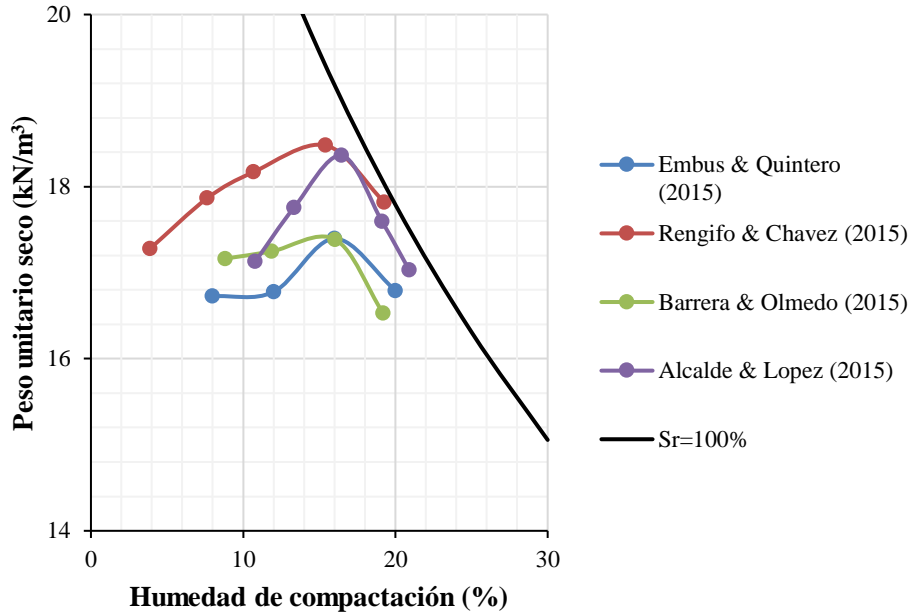


Figura 29. Curvas de compactación de los RCD en Santiago de Cali.

Adicionalmente, Alcalde & Lopez (2015) obtuvieron la curva de compactación para las muestras de distintas composiciones porcentuales de suelo + RCD, tal y como se observa en la Figura 30, donde la incorporación porcentual volumétrica del RCD (entre el 0 y el 100% de reemplazo) en la mezcla con el suelo para realizar la comparación de los comportamientos teniendo en cuenta este parámetro, donde obtiene un mejor resultado al tener materiales más granulares, como en el caso del 100% de RCD, pues se obtiene un peso unitario seco cercano a los 18,5 kN/m³, mientras que, en el caso opuesto (100% suelo), es notable la disminución del peso unitario hasta alcanzar aproximadamente un peso unitario seco de 13,8 kN/m³.

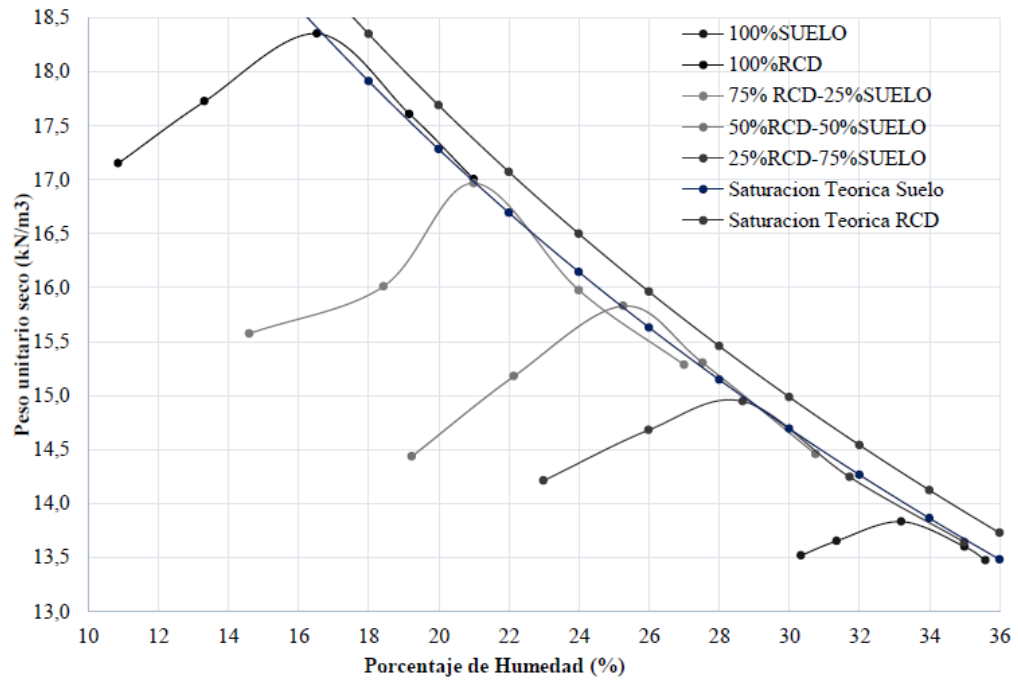


Figura 30. Curva de compactación para cada combinación (Alcalde & Lopez, 2015).

3.2.5. Resistencia a la compresión simple

En el momento de realizar la caracterización mecánica de cualquier material, es necesario evaluar su resistencia, la cual comúnmente se evidencia mediante el ensayo de resistencia a la compresión uniaxial o simple, construyendo un espécimen que permita aplicarle una carga axial hasta su ruptura o falla. En la Figura 31 se resumen algunos de los resultados de la resistencia a la compresión simple, en la misma se observa que para tiempos similares de curado la resistencia oscila entre 90 y 155 kPa aproximadamente, este ensayo puede tomarse como un indicador de calidad de las muestras, ya que en el mismo la superficie del espécimen de prueba es clave para la transmisión adecuada del esfuerzo axial.

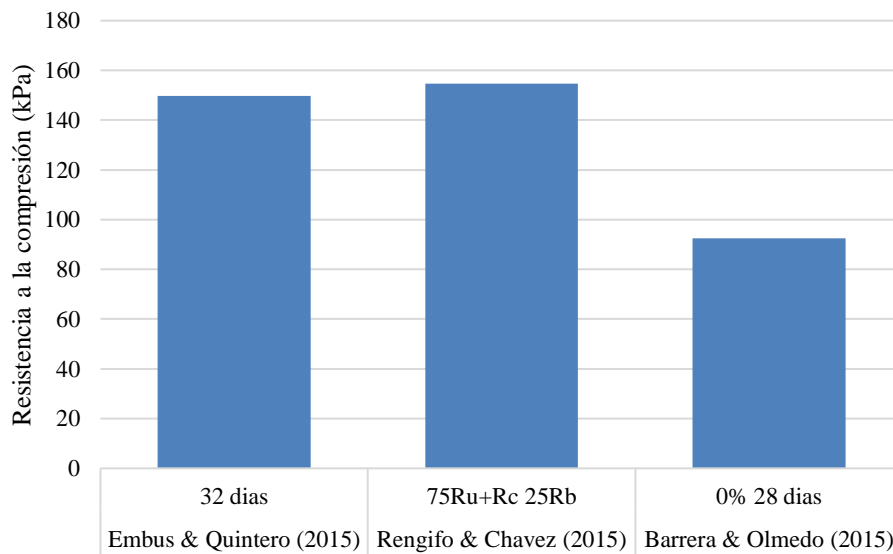


Figura 31. Resistencia a la compresión obtenida por los diferentes autores.

Por otro lado, la resistencia a la compresión puede relacionarse con el comportamiento mecánico del material, como el caso del módulo resiliente M_r como se observó en el Capítulo 2.

En las Figura 32 y Figura 33 se presentan los resultados obtenidos por Barrera & Olmedo (2015) y Embús & Quintero (2015) para el ensayo de resistencia a la compresión simple en función del tiempo de curado, hay una diferencia notoria entre las resistencias alcanzadas y la rigidez del

material, sin embargo en ambos resultados se observa una tendencia de incremento en la resistencia a la compresión simple en función del tiempo de curado (excluyendo el resultados de 7 días de la muestra M2 de la Figura 32, para las edades entre 7 y aproximadamente 28 días los especímenes incrementaron un 58% su resistencia.

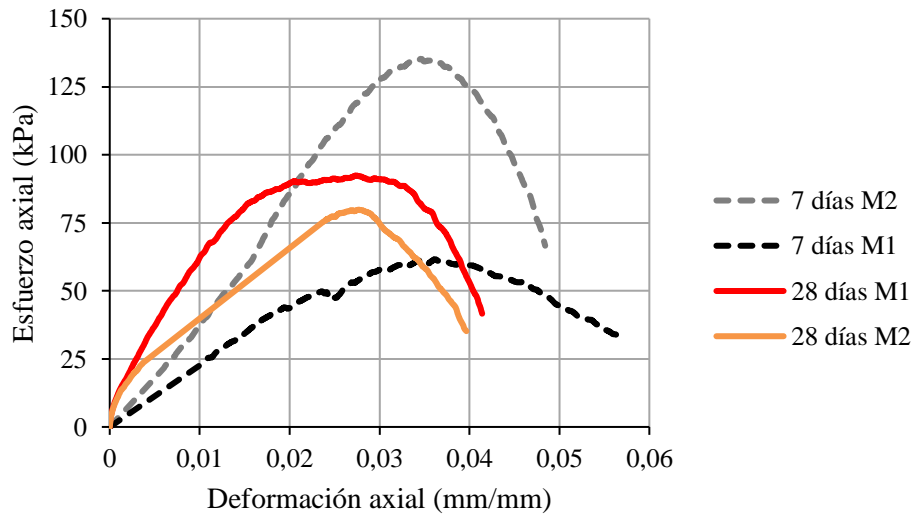


Figura 32. Efecto del tiempo de curado en las curvas esfuerzo vs deformación (Barrera & Olmedo, 2015).

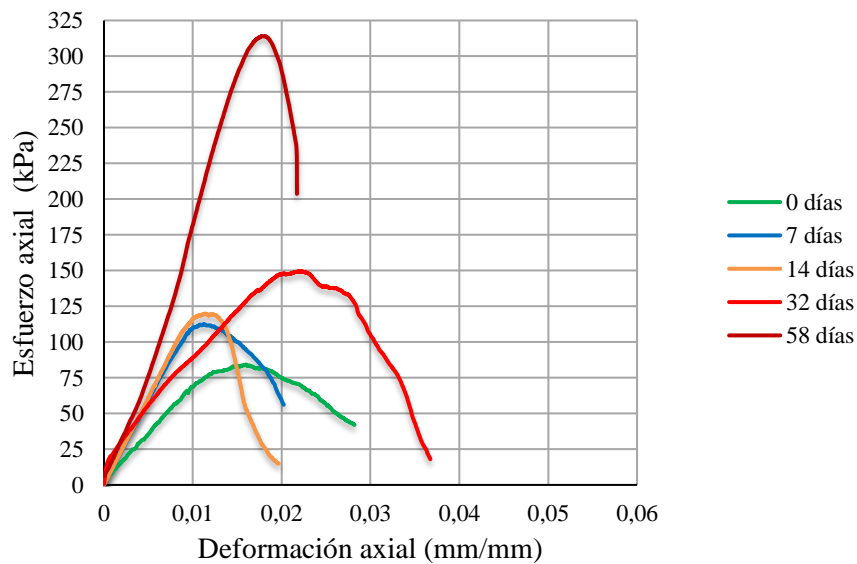


Figura 33. Efecto del tiempo de curado en las curvas esfuerzo vs deformación (Embus & Quintero, 2015).

En la Figura 34 se presenta la influencia de la adición de cemento en el ensayo de compresión uniaxial, de acuerdo con los resultados tanto la resistencia como la rigidez del material se incrementan con la adición de cemento, y adiciones del 2% o más en peso generan un incremento de un orden de magnitud en la resistencia a la compresión.

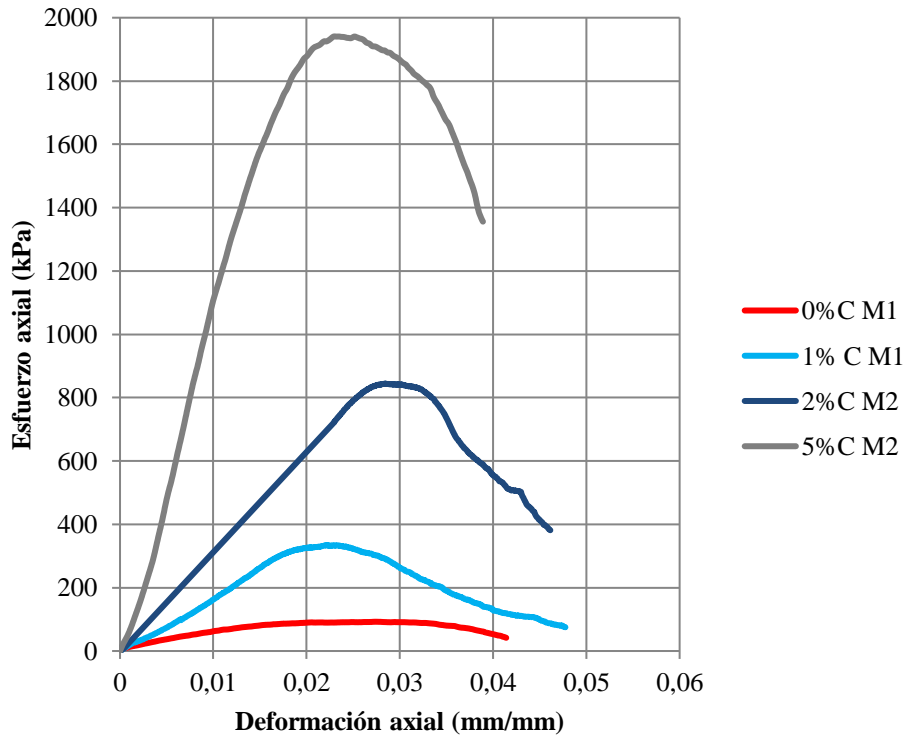


Figura 34. Efecto de la adición de cemento en la curva esfuerzo vs deformación a 28 días (Barrera & Olmedo, 2015)

Rengifo & Chavez (2015) estudiaron también la influencia de la composición del RCD-R en la resistencia a la compresión uniaxial (ver Figura 35). Encontraron que a mayor cantidad de residuos derivados del concreto y materiales naturales como rocas (R_u y R_c), la resistencia es notablemente más alta.

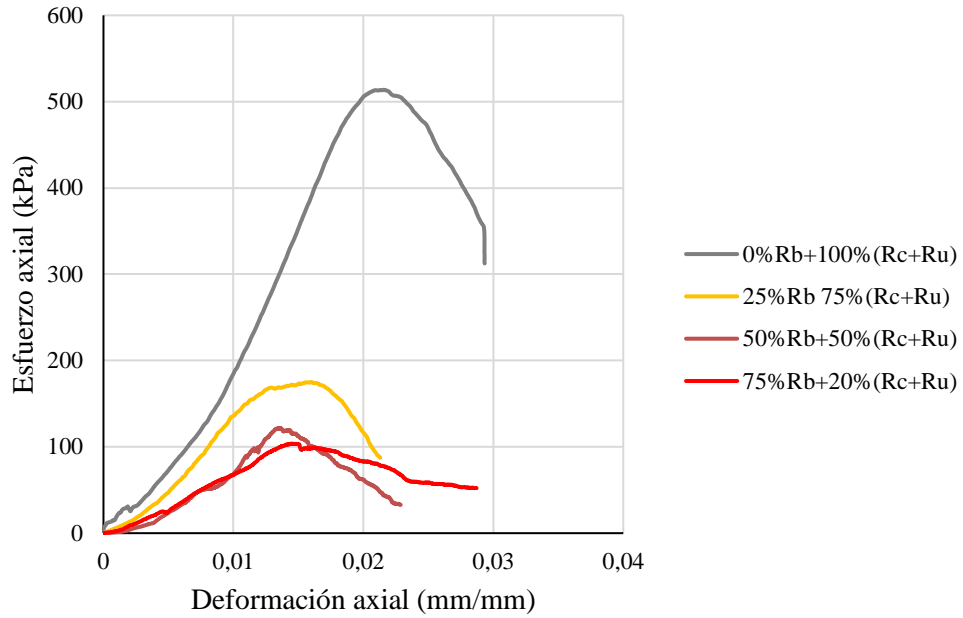


Figura 35. Influencia de la composición del RCD-R en la resistencia a la compresión uniaxial. (Rengifo & Chavez, 2015).

Por último, Alcalde & Lopez (2015), al adicionar suelo al RCD-R encontraron que se incrementa significativamente la resistencia a la compresión (ver Figura 36). De forma similar le ocurre a la rigidez de las probetas.

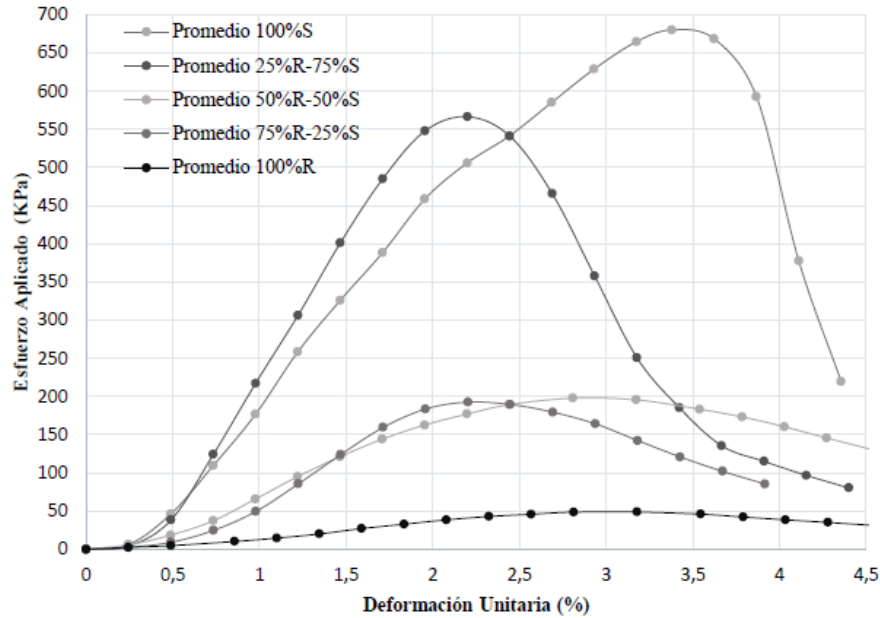


Figura 36. Influencia de la adición de suelo en el RCD-R en la resistencia a la compresión uniaxial (Alcalde & Lopez, 2015).

3.2.6. Índice de soporte de California (CBR)

Debido a que el índice de soporte de California (CBR) es el parámetro de resistencia más empleado, en esta sección se presenta un resumen de los valores obtenidos para las bases granulares derivadas de RCD en Santiago de Cali. En la Figura 37 se muestra un resumen de los valores para la composición típica.

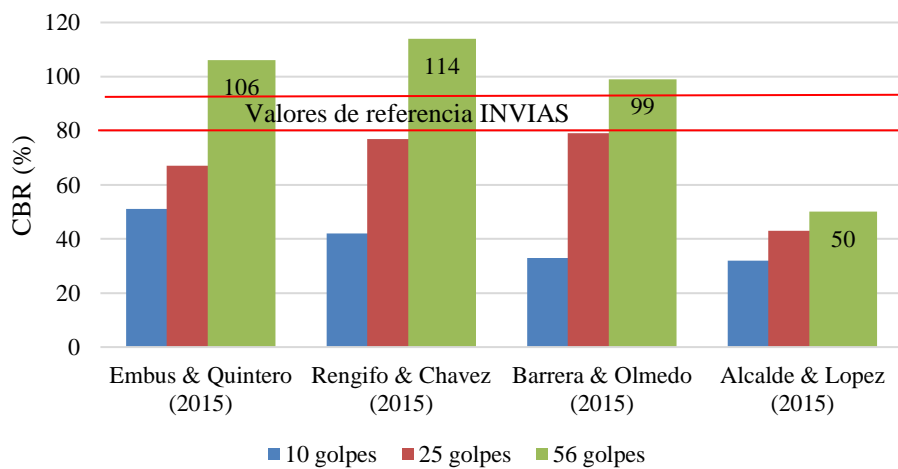


Figura 37. Valores de referencia del CBR para RCD de Santiago de Cali.

De acuerdo con las variables independientes estudiadas por cada grupo de investigadores a continuación se presentan los resultados de los efectos obtenidos. En el estudio de Barrera & Olmedo (2015), el CBR crece con la adición de cemento, hasta 4.5 veces su valor inicial (ver Figura 38).

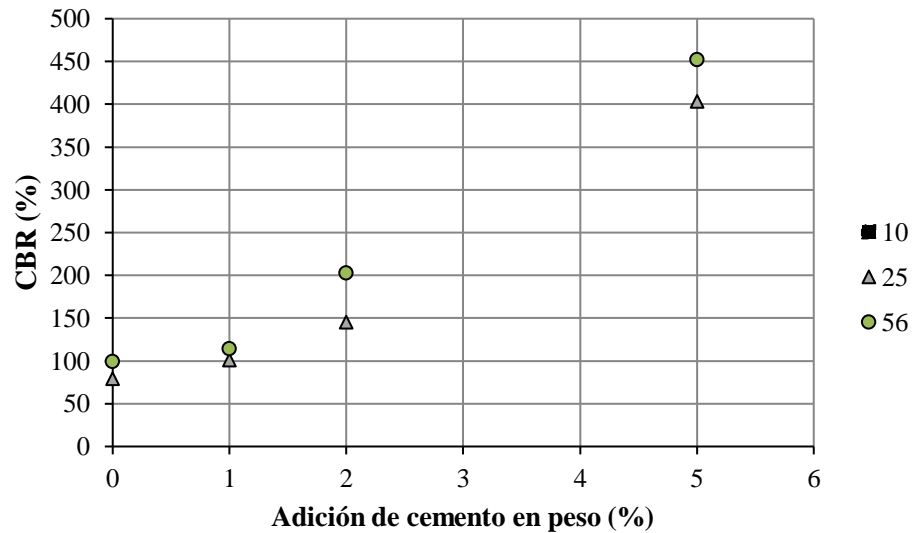


Figura 38. Influencia de la adición de cemento en el CBR (Barrera & Olmedo, 2015).

En la Figura 39 se presentan los resultados obtenidos por Embus & Quintero (2015), en función de la humedad para el CBR, los datos muestran que el CBR crece con el contenido de humedad y luego decrece de forma similar a la curva de compactación, como si la humedad óptima tuviera un reflejo en el valor del CBR.

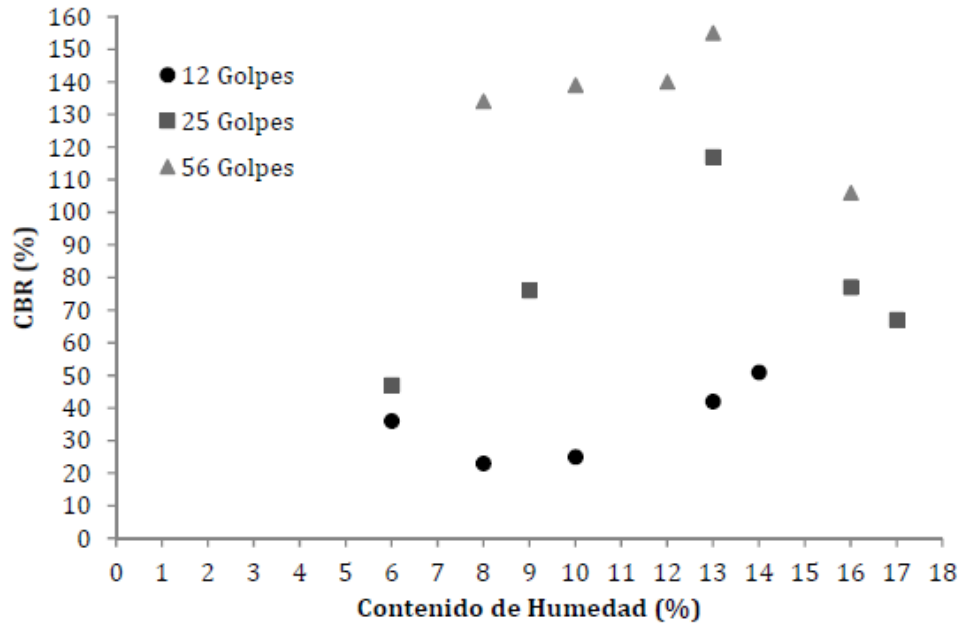


Figura 39. Efecto de la humedad en el CBR (Embus & Quintero, 2015).

En la Figura 40 se presenta el efecto de la composición en el CBR obtenido por Rengifo & Chavez (2015), en general parece que la composición del RCD no influye de manera notoria en el CBR.

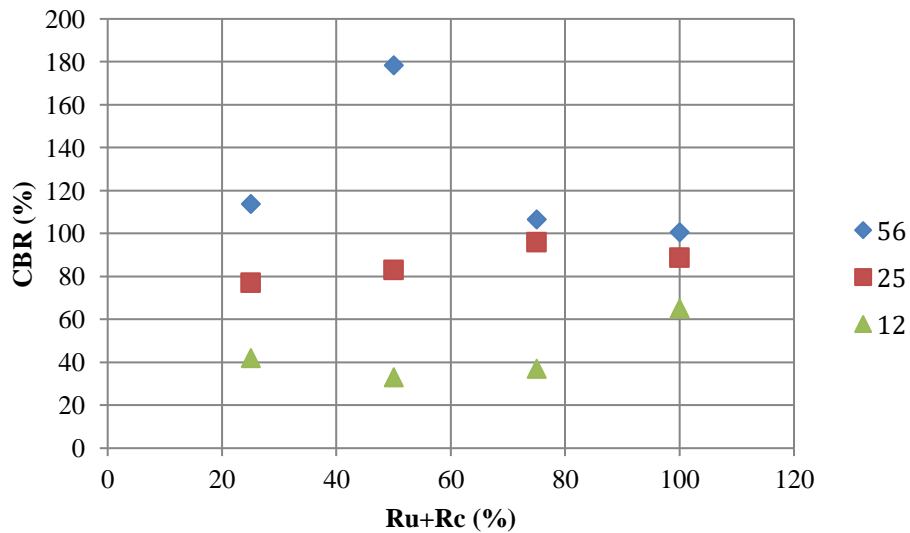


Figura 40. Efecto de la composición de la base con RCD en el CBR (Rengifo & Chavez, 2015).

En la Tabla 10 se presentan los resultados para el CBR obtenidos al adicionar suelo al RCD, es claro el efecto tanto de la humedad como de la adición de suelo en la reducción de la capacidad de soporte, esto se confirma con la Figura 41.

Tabla 10. CBR de mezclas de suelo con RCD (Alcalde & Lopez, 2015)

Composición	No. De Golpes	CBR (%)	w (%) antes de compactación	w(%) después de inmersión	Energía
100% RCD	12	32	17	19	Normal
	25	43			Intermedia
	56	50			Modificada
75% RCD- 25% SUELO	12	17	20	21	Normal
	25	17			Intermedia
	56	24			Modificada
50% RCD- 50% SUELO	12	2	25	27	Normal
	25	2			Intermedia
	56	2			Modificada
25% RCD- 75% SUELO	12	2	28	30	Normal
	25	3			Intermedia
	56	4			Modificada
100% SUELO	12	4	34	35	Normal
	25	1			Intermedia
	56	12			Modificada

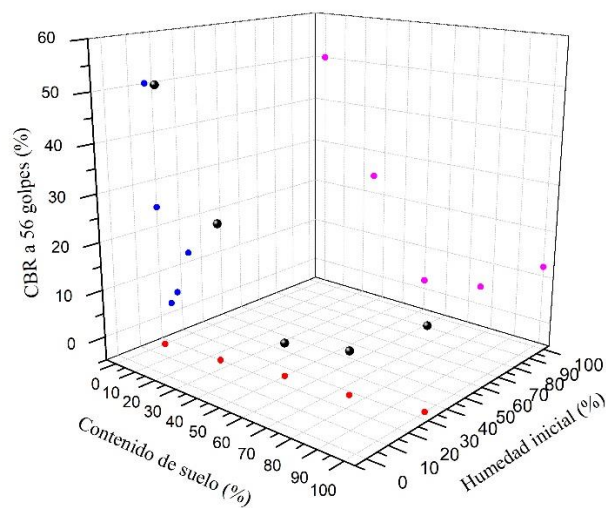


Figura 41. Influencia del contenido de suelo y el contenido de humedad en el CBR.

3.2.7. Módulo resiliente

Barrera & Olmedo (2015), estudiaron la influencia de la incorporación de cemento portland como sustitución porcentual del agregado RCD, para la utilización de ambos como base y/o subbase según los criterios de aceptación de INVIAS en Colombia. Para lograr una respuesta de lo anterior, realizaron una caracterización tanto física como mecánica de los agregados RCD, con distintas incorporaciones de cemento como 0, 1, 2 y 5% de sustitución en peso de RCD, donde entre los resultados obtenidos se destaca que en general, los índices de quiebra y desgaste en los agregados RCD provenientes de Cali, son altos, lo que genera, a su vez, una resistencia baja de estos.

Por otro lado, se observó que la incorporación en mayor cantidad de cemento, logra que los resultados tanto de CBR como de resistencia a la compresión inconfiada, aumenten, es decir, que la resistencia del agregado mejore directamente proporcional con el aumento de sustitución en cemento portland. Por último, incluyen en su análisis los resultados de módulo de resiliencia obtenidos para las muestras de RCD ensayadas, donde se relaciona el M_r con los esfuerzos esféricos a las edades de ensayo de 7 y 28 días, tal y como se muestra en las figuras Figura 42 y Figura 43, donde se observa, al igual que en investigaciones mencionadas anteriormente, que a medida que aumenta el esfuerzo volumétrico (bulk stress), el módulo de resiliencia aumenta. Además, se observa también que los resultados obtenidos para las probetas curadas durante 28 días, representan aproximadamente el doble de resistencia rigidez que aquellas que se curaron durante 7 días.

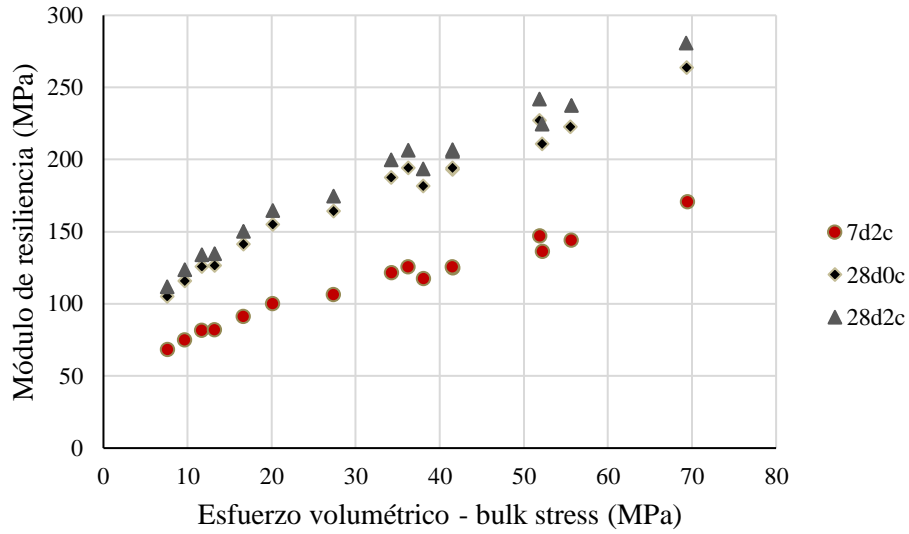


Figura 42. Módulo de resiliencia para RCD sin adición de cemento (Barrera & Olmedo, 2015).

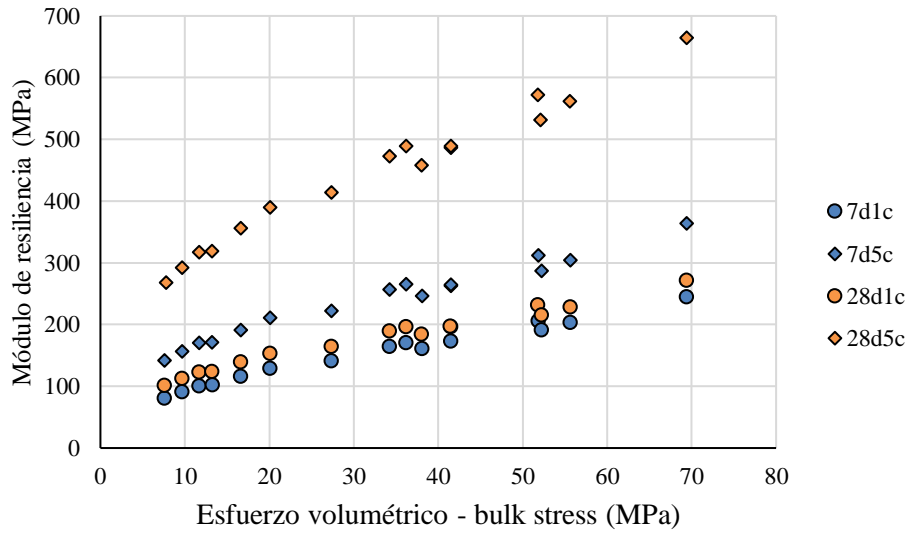


Figura 43. Efecto de la adición de cemento y la edad en el módulo de resiliencia (Barrera & Olmedo, 2015).

Embus & Quintero (2015), como se ha mencionado anteriormente, estudiaron la influencia del contenido de humedad de los agregados (en su caso RCD caracterizado) en el módulo de resiliencia, donde se basan en la caracterización del material y en el comportamiento mecánico de

este, realizando ensayos como granulometría, quiebra de partículas, desgaste, partículas deleznales, resistencia a la desintegración, límites de Atterberg, compactación, CBR, resistencia a la compresión no confinada y el módulo de resiliencia, siendo este último, aquel al que le dan un interés particular. En total, obtienen 2 muestras de RCD con las cuales harían la respectiva investigación, teniendo en cuenta que ambas muestras tienen como mayores constituyentes, derivados del concreto y piedras naturales, lo que representa un agregado RCD de buena calidad ya que son esos mismos constituyentes, aquellos que contribuyen más a la resistencia del agregado.

En cuanto a los ensayos de CBR realizados, obtuvieron que en humedades superiores al 15%, el resultado varía de forma descendente, mientras que, hasta el 15% de humedad, el incremento del CBR es proporcional al aumento de la humedad. De acuerdo a los resultados que obtuvieron en cada uno de los ensayos de caracterización nombrados previamente, el material RCD que seleccionaron, cumple, de acuerdo al INVIAS (Tabla 300.1), para su uso en capa de base granular en estructuras de pavimento. Después de analizar la resistencia a la compresión de los especímenes construidos con el RCD mencionado, se obtiene el módulo resiliente de 9 cuerpos de prueba, con un tiempo de curado de 7 días desde la compactación. Las humedades de dichos especímenes variaron desde 8 a 15%, mientras que para los pesos unitarios se obtienen valores entre 16,8 y 18 kN/m³, sin haber encontrado ninguna relación directa entre la humedad y el peso unitario. Para el análisis del módulo de resiliencia (MR), se tienen en cuenta relaciones de este con las tensiones desvío y la octaédrica, donde, según la Figura 44 y Figura 45, el MR crece con la tensión octaédrica, lo cual es típico en materiales granulares.

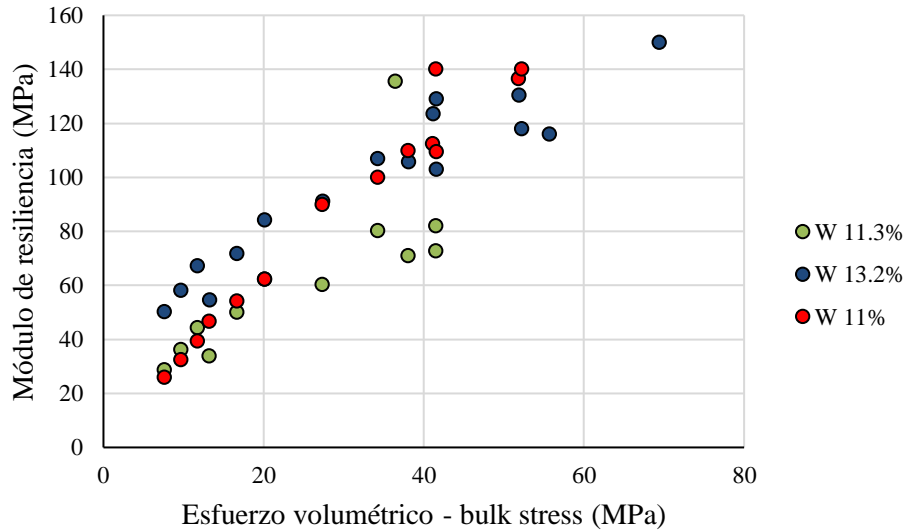


Figura 44. Efecto la humedad en el Módulo de resiliencia (Embus & Quintero, 2015).

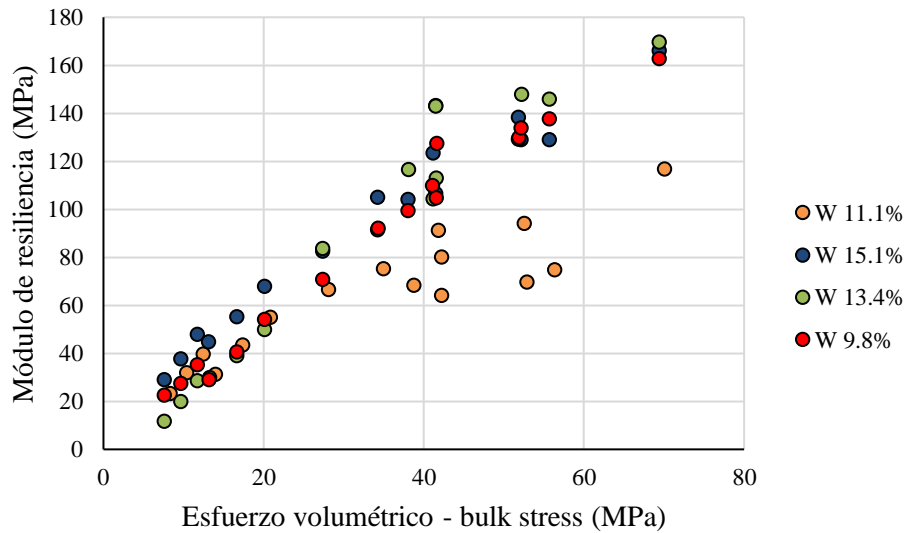


Figura 45. Influencia de la humedad en el módulo de resiliencia (Embus & Quintero, 2015).

Rengifo & Chavez (2015), investigaron la influencia que tiene la composición con su respectiva distribución, en la resistencia de los RCD. Al igual que los autores anteriores, realizaron ensayos de caracterización como lo son los límites de Atterberg, el desgaste, entre otros. Además, también realizaron caracterización mecánica mediante ensayos como compresión simple, CBR y en el que hará particular enfoque este artículo, el módulo resiliente. En cuanto a este último ensayo,

obtuvieron resultados del módulo de resiliencia que son determinantes al momento de concluir si la composición tiene o no influencia en el comportamiento mecánico de los agregados RCD. En este caso, se grafica el esfuerzo volumétrico (bulk stress) contra el módulo de resiliencia, como se observa en la Figura 46 y Figura 47.

En las figuras mencionadas, es posible apreciar el aumento del módulo de resiliencia conforme el esfuerzo volumétrico (bulk stress), por otro lado, se observa que aquellos RCD con una composición de 100% de materiales naturales mezclados con concreto, tienen valores mayores de módulo de resiliencia.

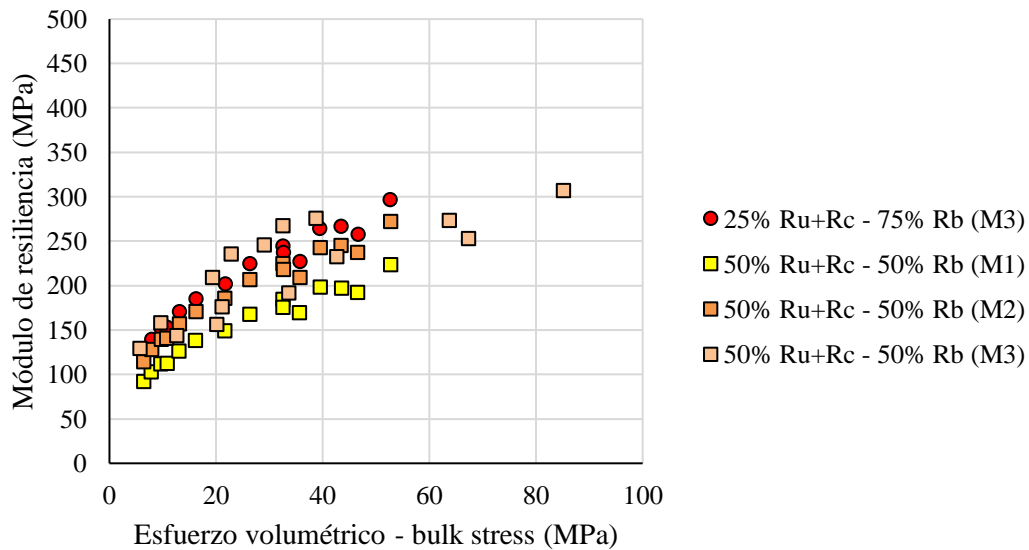


Figura 46. Módulo de resiliencia (Rengifo & Chavez, 2015).

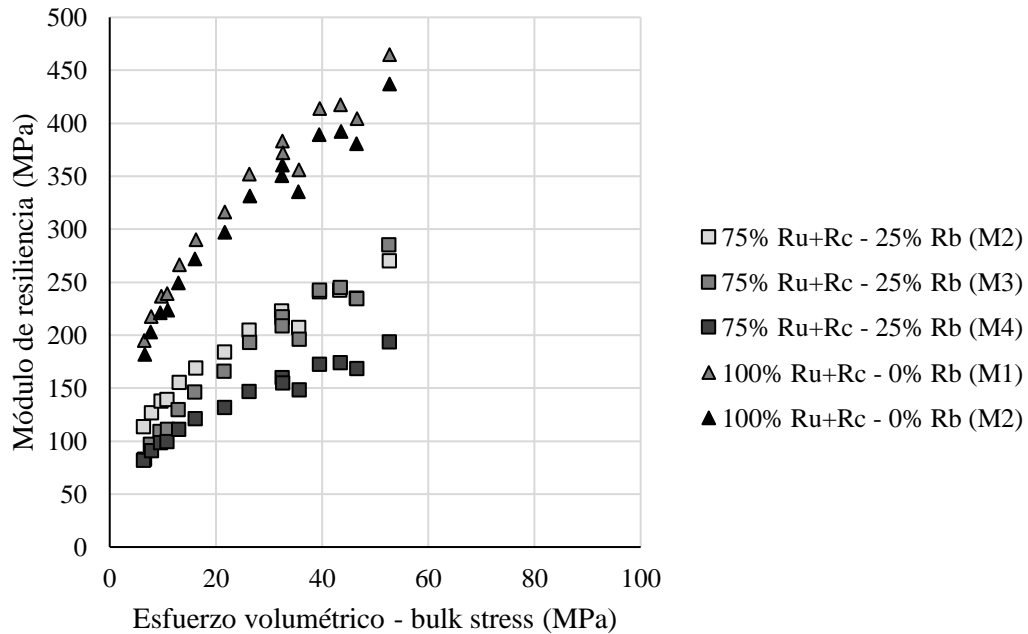


Figura 47. Módulo de resiliencia (Rengifo & Chavez, 2015).

De acuerdo con Alcalde & Lopez (2015), el módulo resiliente varía poco y tiene un mejor comportamiento cuando el contenido de residuo es igual a contenido de suelo, esto se puede observar en la muestra que contiene 50% material de RCD y 50% suelo. Además, se evidenció que el módulo de resiliencia disminuye cuando al RCD se le adiciona suelo, en la Figura 49 se puede observar que todas las muestras que contienen más del 50% de suelo presentan una disminución en el módulo de resiliencia a medida que se incrementa el esfuerzo volumétrico (bulk stress), y que además se presenta un aumento del módulo cuando la muestra tiene mayor porcentaje de RCD.

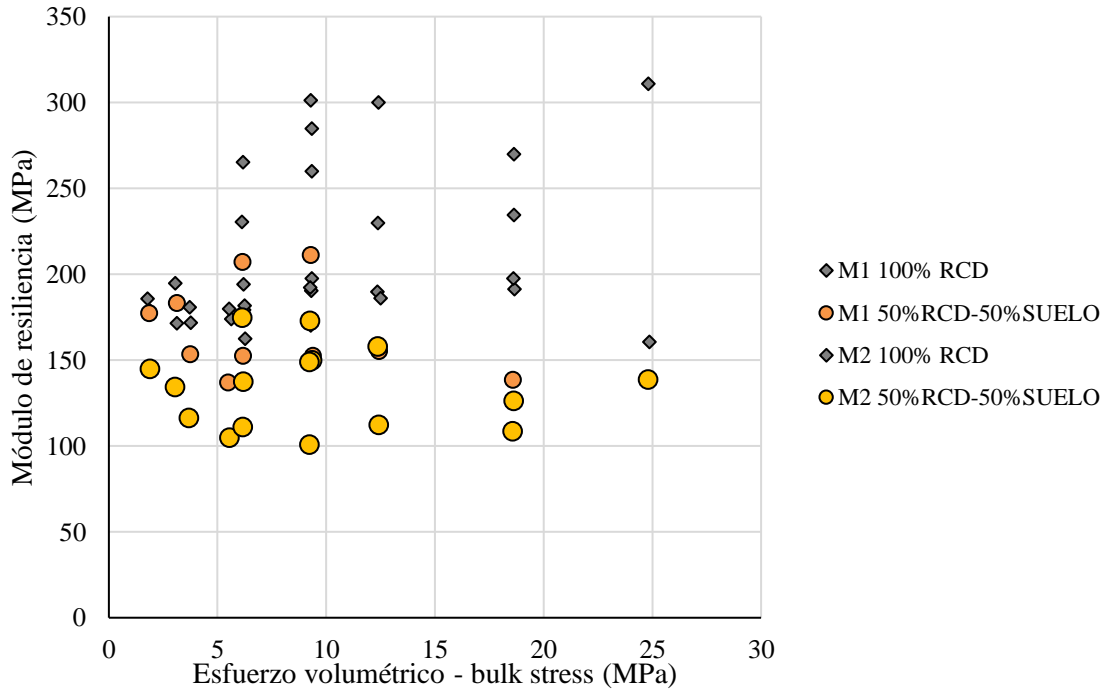


Figura 48. Módulo de resiliencia (Alcalde & Lopez, 2015).

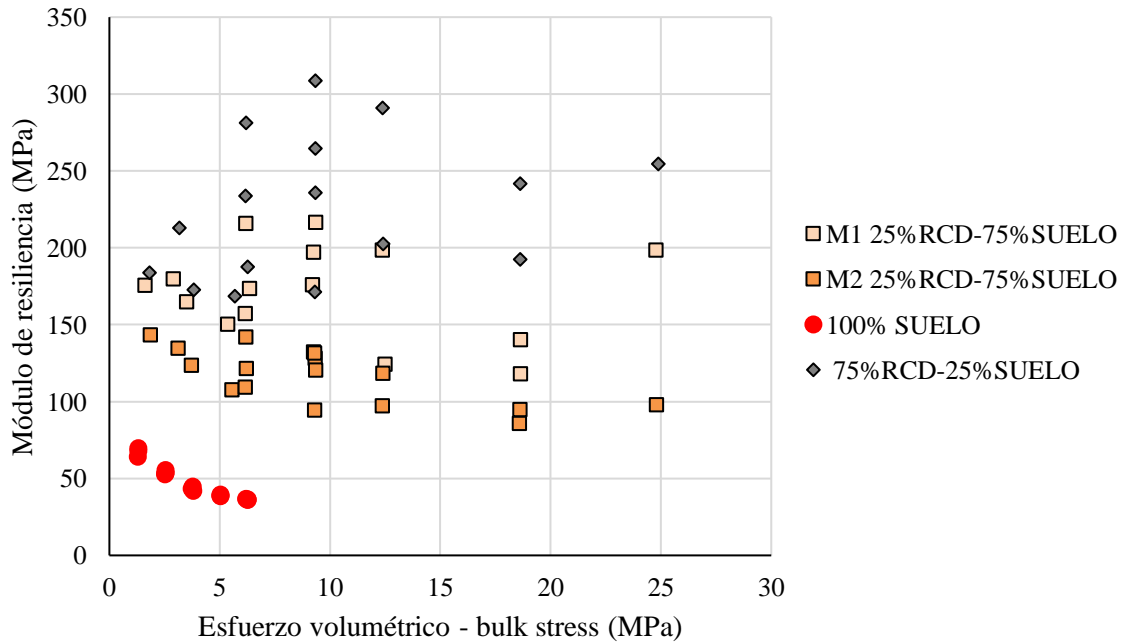


Figura 49. Módulo de resiliencia (Alcalde & Lopez, 2015).

4. ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL MÓDULO RESILIENTE DE AGREGADOS RECICLADOS DE RCD.

Después de haber realizado una recopilación exhaustiva de datos de las investigaciones correspondientes a los diferentes autores citados en el presente documento, se procede a analizar la relación que tienen los aspectos investigados (humedad, composición, entre otros) con el módulo resiliente de los agregados reciclados de RCD y la influencia de estos en el mismo.

4.1. Efecto de la adición de cemento en el Mr

Teniendo en cuenta lo anterior, se construyen las gráficas que se muestran a continuación, las cuales se plantean en 3 planos, con el fin de obtener una relación grafica entre los factores que son esfuerzo volumétrico θ (eje X), cortante octaédrica τ_{oct} (eje Y) y módulo resiliente Mr (eje Z). De acuerdo con lo mencionado y con la Figura 50, se observa que el módulo resiliente aumenta conforme aumentan el esfuerzo volumétrico y el cortante octaédrico, donde el tiempo de curado influye en gran manera en los resultados obtenidos, pues se alcanza un módulo resiliente de aproximadamente 260 MPa a los 28 días de curado y con un 0% de adición de cemento, mientras que, para el mismo caso pero con 7 días de curado tan solo se alcanzó un máximo de aproximadamente 138 MPa para el mismo parámetro.

Por otro lado, es importante hacer énfasis en la influencia del contenido de cemento en la muestra, pues este hace que se alcancen valores de módulo resiliente muy superiores en cuanto más cemento se le agregue en proporción másica, pues si se observa la Figura 50, se tienen resultados de los 3 parámetros analizados muy superiores en el caso en el que se añade un 5% de cemento, pues tan solo con 7 días de curado se obtiene un módulo resiliente de 360 MPa, lo que

representa un incremento de 157% si se compara con el caso de 7 días de curado sin adición de cemento.

En la Figura 50 se observa una gráfica donde es posible comparar los resultados anteriores a cada una de las edades de ensayo, donde se aprecia claramente la influencia del contenido de cemento y del tiempo de curado, en el resultado obtenido del módulo resiliente. Tener en cuenta que las gráficas comparativas tienen una escala vertical diferente entre sí.

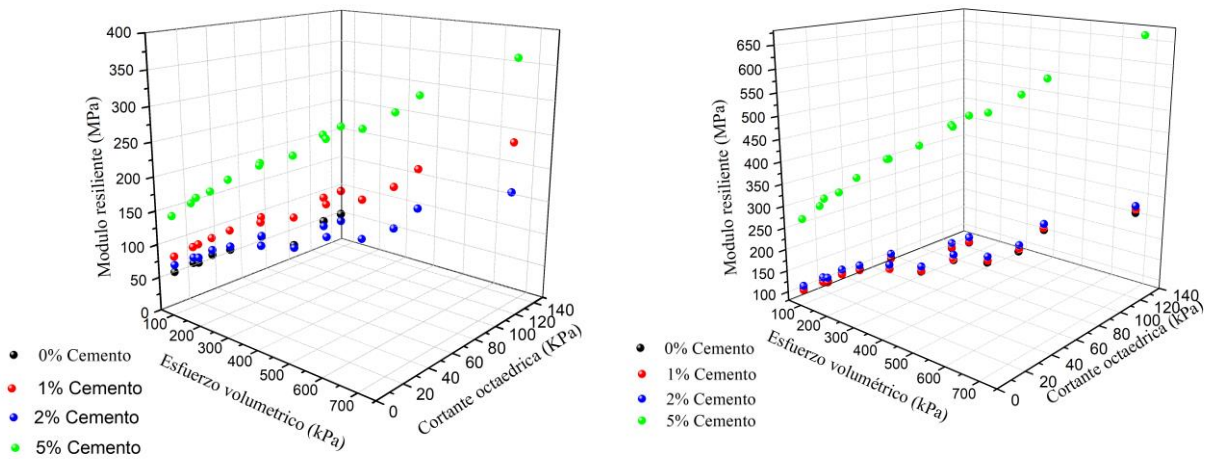


Figura 50. Comparación del módulo de resiliencia a los 7 días (izquierda) y 28 días (derecha) (Barrera & Olmedo, 2015)

4.2. Efecto del contenido de humedad en el Mr

Por otro lado, se obtuvieron gráficos que comparan los mismos 3 factores, pero en este caso con los datos extraídos de la tesis de Embus & Quintero (2015), los cuales distinguen cada muestra por el contenido de humedad con el que se encuentran. Las humedades en las muestras varían entre 9,8 y 15,1% de humedad, donde se observa en la Figura 51 que el módulo de resiliencia para el 15,1% de humedad, alcanza un valor aproximado de 160 MPa, valor que es casi igual para el caso de 9,8% de humedad. Por lo anterior, de acuerdo con los resultados aquí mostrados, no es posible identificar una relación directa entre la humedad y el módulo de

resiliencia, pues tanto en la humedad más baja como en la más alta investigada en este caso, el resultado del módulo de resiliencia es el más alto de todas las muestras ensayadas, por lo que no se podría analizar desde una perspectiva de la curva de compactación del material, ya que en los valores intermedios de 11 y 13% de humedad (ver Figura 51), el valor del módulo resiliente oscila entre 120 y 150 MPa, valores que no concordarían con la distribución típica de una curva de compactación, donde los valores intermedios deberían ser los más altos. Es importante notar que estos resultados dependen directamente con la calidad de la realización del ensayo por parte de los autores.

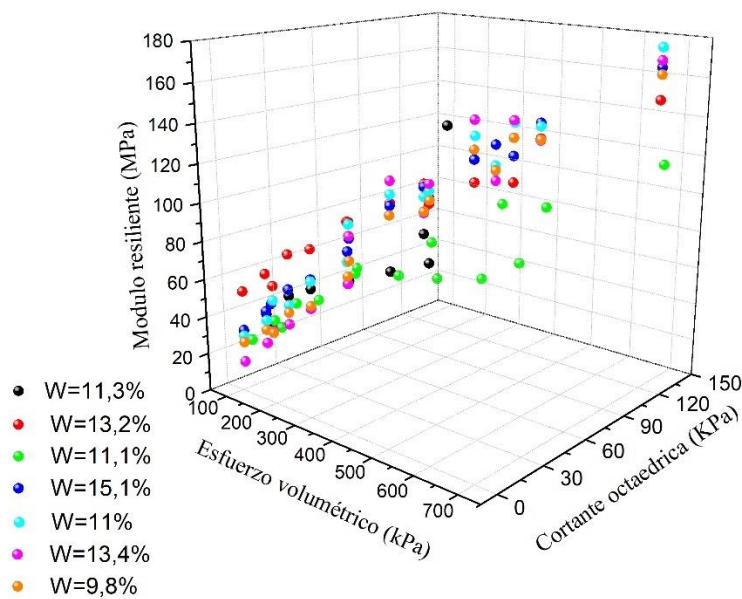


Figura 51. Comparación del módulo de resiliencia con humedades (Embus & Quintero, 2015)

4.3. Efecto de la composición del RCD en el Mr

Rengifo & Chavez (2015), por su parte, obtienen resultados similares, con un comportamiento entre los factores analizados igual al de los anteriores autores, donde se observan relaciones directamente proporcionales entre la tensión, la cortante octaédrica y el módulo

resiliente. Sin embargo, en este caso se logra identificar en la mayoría de casos ilustrados de las Figura 52 a la Figura 56 (para efectos de resolución de la imagen tienen una escala vertical diferente), la influencia de la composición en los resultados obtenidos, en especial, en el módulo resiliente donde se observa que entre más materiales pétreos y derivados del concreto (Ru) contenga la muestra o el agregado reciclado, mejores resultados mostrará en cuanto a su comportamiento mecánico.

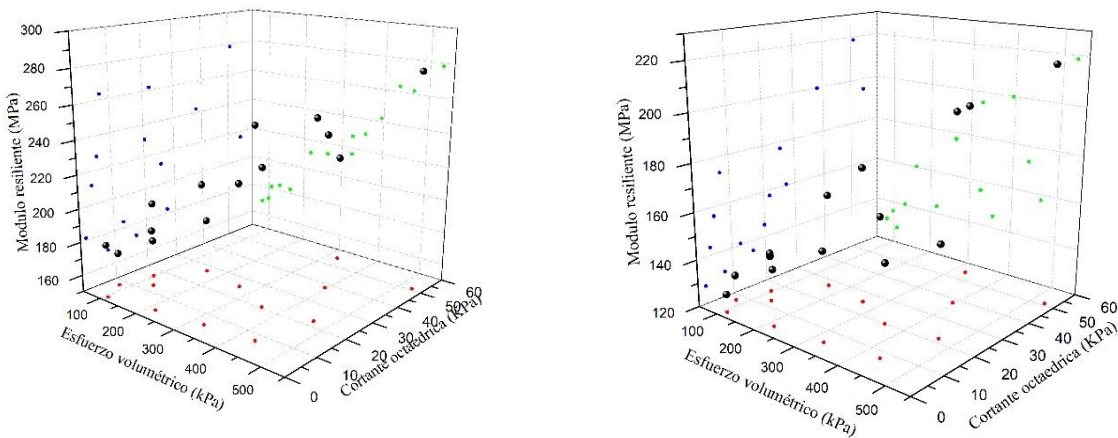


Figura 52. Módulo de resiliencia 25% Ru+Rc/75% Rb y 50% Ru+Rc/50% Rb (Rengifo & Chavez, 2015).

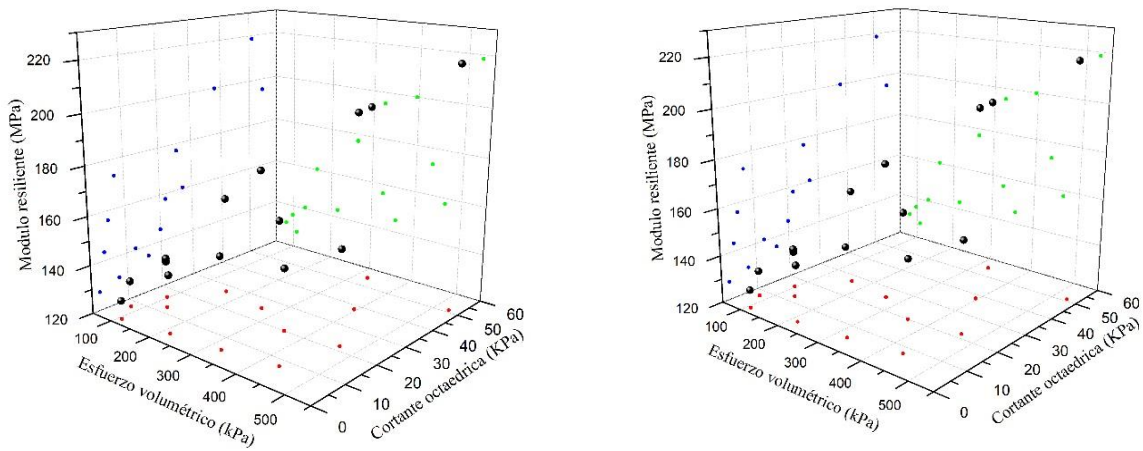


Figura 53. Módulo de resiliencia 50% Ru+Rc/50% Rb M2 y 50% Ru+Rc/50% Rb M3 (Rengifo & Chavez, 2015).

Si se observa el caso de la Figura 56, donde se tiene un 100% de composición con materiales Ru, se alcanza un módulo resiliente de aproximadamente 440 MPa, lo cual representa un aumento del 60% en este parámetro si se compara con la Figura 53, donde se observa la muestra 2 también, pero con una composición de 50% de Ru y 50% de Rb alcanzando un módulo resiliente de 280 MPa aproximadamente.

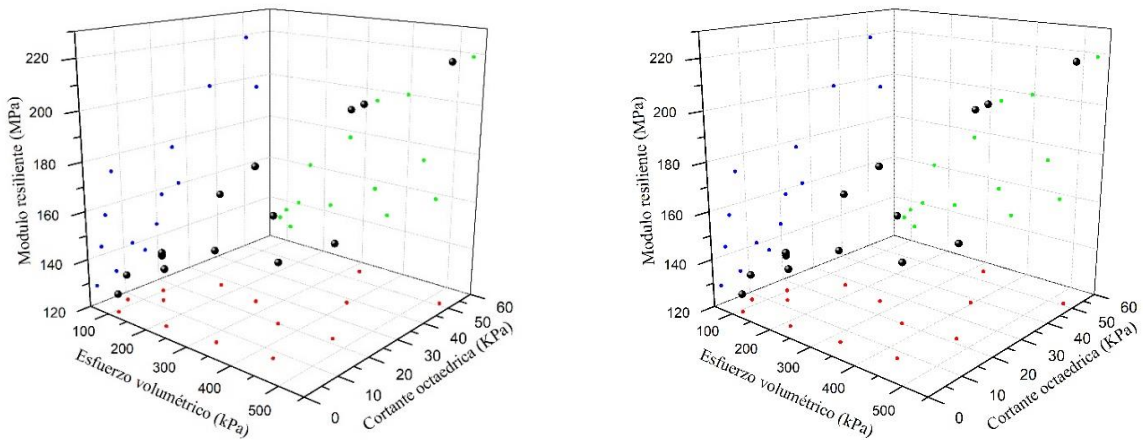


Figura 54. Módulo de resiliencia 75%Ru+Rc/25%Rb M2 y 75%Ru+Rc/25%Rb M3 (Rengifo & Chavez, 2015).

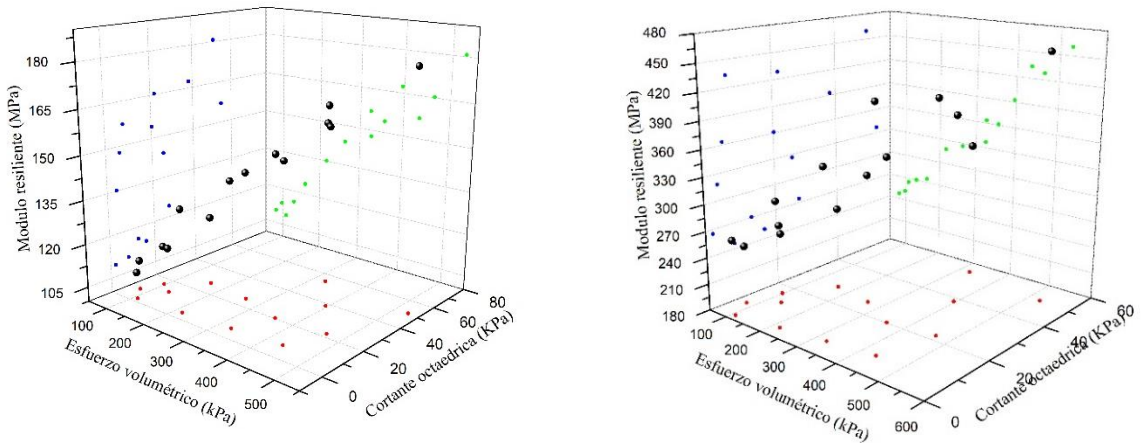


Figura 55. Módulo de resiliencia 75%Ru+Rc/25%Rb M4 y 100%Ru+Rc M1 (Rengifo & Chavez, 2015).

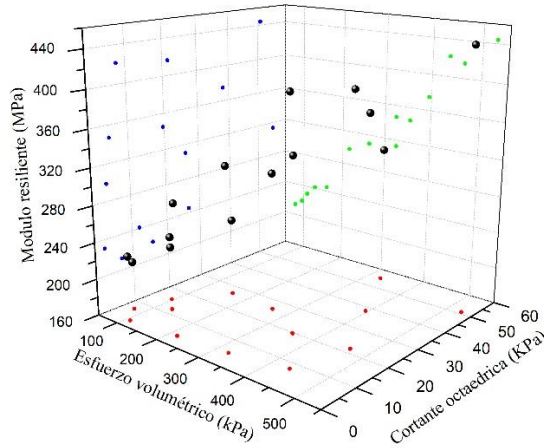


Figura 56. Módulo de resiliencia 100%Ru+Rc M2 (Rengifo & Chavez, 2015)

4.4. Efecto de la contaminación con suelo al RCD

Alcalde & Lopez (2015) plantearon lo que sería la posible influencia de la contaminación con suelo en el agregado RCD, donde construyen muestras con distintas composiciones que varían desde el 0% de incorporación de suelo hasta el 100% de suelo, como se observa en la Figura 57, donde es posible inferir que el suelo es una especie de contaminante para el comportamiento mecánico del RCD como agregado, pues entre mayor cantidad de suelo contiene la muestra, menor es el Mr obtenido.

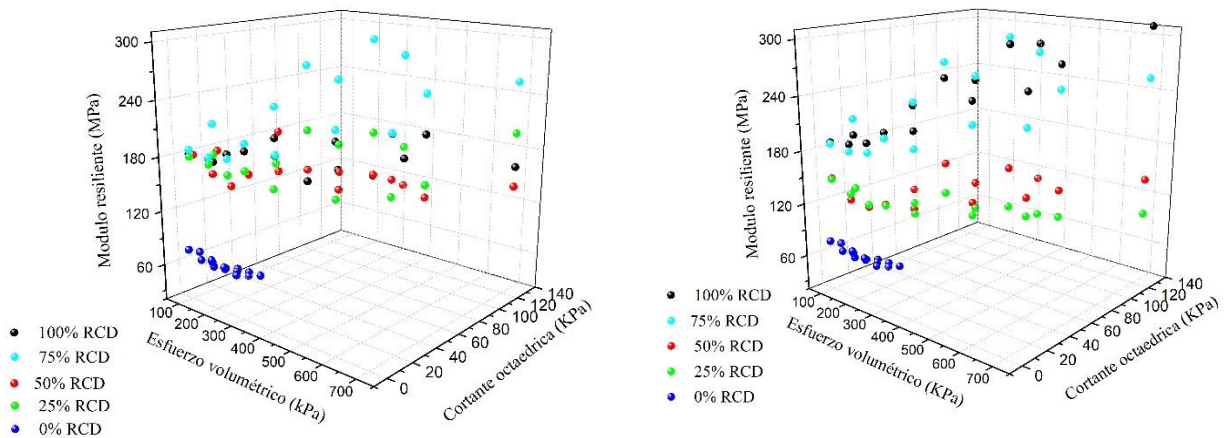


Figura 57. Módulo de resiliencia comparación M1 (izquierda) y M2 (derecha) (Alcalde & Lopez, 2015).

5. RELACIONES PROPUESTAS PARA ESTIMAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA DE AGREGADOS DERIVADOS DE RCD

En este capítulo a partir del análisis de los datos del numeral anterior, se revisan los modelos de ajuste del módulo de resiliencia y se propone un modelo nuevo.

5.1. Modelo de Seed et al. (1962).

Tal como se mencionó en la revisión bibliográfica, el primer modelo fue propuesto por Seed et al. (1962) para suelos granulares como:

$$Mr = k_1 \theta^{k_2} \quad (35)$$

donde, k_1 y k_2 son los parámetros o coeficientes de regresión; y θ es la suma de los esfuerzos principales o bulk stress. Este modelo describe el Mr sólo como una función del esfuerzo de confinamiento, e ignora el efecto del esfuerzo desviador. En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos en función de cada uno de los ajustes.

Al observar los parámetros de ajuste es claro que presenta mayor variación el parámetro k_1 , mientras que el parámetro k_2 se mueve en un rango más pequeño, en el caso particular de la adición de cemento el parámetro k_1 crece mientras que el parámetro k_2 permanece constante para cada una de las variaciones.

Para los ajustes donde se cambia la composición del RCD-R favoreciendo el contenido de materiales cementicios y agregados naturales no ligados (R_u y R_c), el parámetro k_1 crece con este efecto, mientras que k_2 apenas varía.

Las observaciones anteriores permiten inferir que los efectos derivados de agregados más resistentes como los R_c y R_u , y la adición de cemento afectan de forma más significativa el parámetro k_1 con relación al k_2 , permitiendo pensar que el segundo puede ser una constante para los RCD-R de Santiago de Cali.

Tabla 11. Resultados del ajuste del modelo de Seed et al. (1962) para las bases derivadas de RCD.

Autor	Rb (%)	w (%)	C (%)	TC (días)	k1	k2	R2
Barrera & Olmedo	23	15,6	0	7	6,500	0,500	0,965
Barrera & Olmedo	23	15,3	1	7	9,000	0,500	0,979
Barrera & Olmedo	23	14,6	2	7	11,700	0,400	0,975
Barrera & Olmedo	23	14,9	5	7	26,900	0,400	0,969
Barrera & Olmedo	23	15,6	0	28	18,100	0,400	0,974
Barrera & Olmedo	23	15,3	1	28	14,900	0,400	0,978
Barrera & Olmedo	23	14,6	2	28	21,900	0,400	0,973
Barrera & Olmedo	23	14,9	5	28	52,000	0,400	0,973
Embus & Quintero	24	9,8	0	7	0,400	0,900	0,994
Embus & Quintero	24	11,0	0	7	0,800	0,800	0,995
Embus & Quintero	24	11,1	0	7	1,900	0,600	0,852
Embus & Quintero	24	11,3	0	7	1,600	0,700	0,614
Embus & Quintero	24	13,2	0	7	6,500	0,500	0,944
Embus & Quintero	24	13,4	0	7	0,300	1,000	0,977
Embus & Quintero	24	15,1	0	7	1,400	0,700	0,982
Rengifo & Chavez	50	12,0	0	1	18,812	0,387	0,968
Rengifo & Chavez	0	12,0	0	1	41,300	0,380	0,973
Rengifo & Chavez	50	11,0	0	1	24,262	0,380	0,973
Rengifo & Chavez	25	13,0	0	1	23,996	0,380	0,973
Rengifo & Chavez	0	13,0	0	1	38,407	0,382	0,974
Rengifo & Chavez	75	14,0	0	1	26,447	0,379	0,972
Rengifo & Chavez	50	14,0	0	1	38,722	0,304	0,702
Rengifo & Chavez	25	11,0	0	1	17,163	0,380	0,973

Rb = contenido de cerámicos; w = humedad de compactación; C= contenido de cemento en peso; TC tiempo de curado.

En la Tabla 12 se presentan los resultados de los ajustes en los cuerpos de prueba compactados con adición de algunos de los resultados el parámetro k1 decrece con la adición de suelo, y debida a la restricción positiva impuesta al parámetro k2, este toma valores iguales a cero en función del esfuerzo volumétrico. Esto indica que para altos contenidos de suelo el modelo de Seed et al. (1962) no es apropiado para este tipo de materiales.

Tabla 12. Resultados del ajuste del modelo de Seed et al. (1962) para las bases derivadas de mezclas de RCD con suelo.

Autor	Suelo (%)	RCD (%)	w (%)	TC (días)	k1	k2	R2
López & Alcalde	0	100	17	0	172,0	0,00	0,004
López & Alcalde	50	50	25	0	158,4	0,00	0
López & Alcalde	75	25	28	0	113,9	0,10	0,067
López & Alcalde	0	100	17	0	47,3	0,30	0,897
López & Alcalde	50	50	25	0	158,4	0,00	0
López & Alcalde	75	25	28	0	114,8	0,00	0
López & Alcalde	100	0	34	0	48,0	0,00	0
López & Alcalde	25	75	20	0	58,4	0,20	0,593

5.2. Modelo de la guía MEPDG (NCHRP, 2004)

Tal como se ilustró en el Capítulo 2, la guía MEPDG (NCHRP, 2004) propone la siguiente ecuación para determinar el módulo de resiliencia:

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (36)$$

donde, k_1 , k_2 y k_3 son los parámetros o coeficientes de regresión; θ es la suma de los esfuerzos principales o bulk stress en las mismas unidades de p_a ; p_a es una presión de referencia igual a $100 \text{ kPa} \approx 1 \text{ kgf/cm}^2 \approx 200 \text{ psf} \approx 14.5 \text{ psi}$, y τ_{oct} es el esfuerzo cortante octaédrico en las mismas unidades de p_a . Las dos variables de estado de esfuerzos se pueden calcular a partir de los esfuerzos principales como:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \text{ ó } \theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 \text{ para el ensayo triaxial } \sigma_2 = \sigma_3 \quad (37)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \text{ ó } \tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d \text{ para el triaxial} \quad (38)$$

donde, σ_1 es el esfuerzo principal mayor; σ_2 es el esfuerzo principal intermedio; y σ_3 es el esfuerzo principal menor.

En una primera aproximación, sin incluir restricciones en los valores de los parámetros se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 13, algunos parámetros tuvieron resultados poco

coherentes desde el punto de vista físico, por ejemplo el parámetro k1 alcanzó valores de 32, mientras que k2 tuvo valores cercanos a cero, con lo que se puede inferir que el esfuerzo volumétrico no tiene influencia en el módulo de resiliencia, de forma similar el valor de k3 tuvo valores elevados hasta de 3.3 sugiriendo que el esfuerzo desviador tiene mayor influencia que el de confinamiento (en este caso expresado por el esfuerzo volumétrico o bulk stress). Debido a esto, se definieron unas restricciones sobre los parámetros.

Tabla 13. Resultados del ajuste del modelo de MEPDG (NCHRP, 2004) para las bases derivadas de RCD sin restricciones.

Autor	Rb (%)	w (%)	C (%)	TC (días)	k1	k2	k3	R2
Barrera & Olmedo	23	15,6	0	7	1,933	0,528	0,354	0,994
Barrera & Olmedo	23	15,3	1	7	2,183	0,400	0,307	1,000
Barrera & Olmedo	23	14,6	2	7	0,993	0,152	0,820	0,999
Barrera & Olmedo	23	14,9	5	7	3,099	0,317	0,318	0,999
Barrera & Olmedo	23	15,6	0	28	2,292	0,312	0,289	0,999
Barrera & Olmedo	23	15,3	1	28	2,390	0,345	0,290	0,999
Barrera & Olmedo	23	14,6	2	28	2,439	0,312	0,290	0,999
Barrera & Olmedo	23	14,9	5	28	5,771	0,312	0,289	0,999
Embus & Quintero	24	9,8	0	7	0,486	0,248	2,414	0,927
Embus & Quintero	24	11,0	0	7	0,584	0,248	2,158	0,922
Embus & Quintero	24	11,1	0	7	0,481	0,248	1,517	0,925
Embus & Quintero	24	11,3	0	7	0,469	0,248	2,524	0,754
Embus & Quintero	24	13,2	0	7	0,893	0,248	0,938	0,960
Embus & Quintero	24	13,4	0	7	0,469	0,248	2,597	0,867
Embus & Quintero	24	15,1	0	7	0,641	0,248	1,845	0,954
Rengifo & Chavez	50	12,0	0	1	2,114	0,300	0,847	0,553
Rengifo & Chavez	0	12,0	0	1	4,481	0,300	0,813	0,515
Rengifo & Chavez	50	11,0	0	1	2,618	0,300	0,821	0,510
Rengifo & Chavez	25	13,0	0	1	2,600	0,300	0,814	0,513
Rengifo & Chavez	0	13,0	0	1	4,248	0,300	0,793	0,522
Rengifo & Chavez	75	14,0	0	1	2,853	0,300	0,816	0,519
Rengifo & Chavez	50	14,0	0	1	2,691	0,300	0,800	0,415
Rengifo & Chavez	25	11,0	0	1	1,865	0,300	0,814	0,527

Rb = contenido de cerámicos; w = humedad de compactación; C= contenido de cemento en peso; TC tiempo de curado.

En la Tabla 14 se presentan los valores obtenidos para los ajustes considerando algunas restricciones en los parámetros k1 a k3. Este conjunto de valores, aunque reduce en algunos casos

el coeficiente de determinación R2 presenta mayor coherencia con los efectos físicos de las variables de esfuerzo que emplea el modelo.

Tabla 14. Resultados del ajuste del modelo de MEPDG (NCHRP, 2004) para las bases derivadas de RCD con restricciones.

Autor	Rb (%)	w (%)	C (%)	TC (días)	k1	k2	k3	R2
Barrera & Olmedo	23	15,6	0	7	0,620	0,399	0,497	1
Barrera & Olmedo	23	15,3	1	7	0,869	0,400	0,308	1
Barrera & Olmedo	23	14,6	2	7	0,718	0,309	0,311	0,99
Barrera & Olmedo	23	14,9	5	7	1,500	0,312	0,324	0,99
Barrera & Olmedo	23	15,6	0	28	1,112	0,309	0,312	0,99
Barrera & Olmedo	23	15,3	1	28	1,075	0,343	0,310	0,99
Barrera & Olmedo	23	14,6	2	28	1,189	0,312	0,290	0,99
Barrera & Olmedo	23	14,9	5	28	2,814	0,312	0,289	0,99
Embus & Quintero	24	9,8	0	7	0,345	0,260	0,750	0,95
Embus & Quintero	24	11,0	0	7	0,385	0,260	0,733	0,95
Embus & Quintero	24	11,1	0	7	0,522	0,395	0,326	0,95
Embus & Quintero	24	11,3	0	7	0,504	0,400	0,536	0,809
Embus & Quintero	24	13,2	0	7	0,781	0,260	0,294	0,968
Embus & Quintero	24	13,4	0	7	0,358	0,260	0,750	0,897
Embus & Quintero	24	15,1	0	7	0,457	0,260	0,619	0,974
Rengifo & Chavez	50	12,0	0	1	1,409	0,260	0,317	0,623
Rengifo & Chavez	0	12,0	0	1	3,611	0,260	0,280	0,587
Rengifo & Chavez	50	11,0	0	1	2,113	0,260	0,281	0,581
Rengifo & Chavez	25	13,0	0	1	2,096	0,260	0,280	0,585
Rengifo & Chavez	0	13,0	0	1	3,402	0,260	0,280	0,598
Rengifo & Chavez	75	14,0	0	1	2,303	0,260	0,280	0,59
Rengifo & Chavez	50	14,0	0	1	2,186	0,260	0,280	0,436
Rengifo & Chavez	25	11,0	0	1	1,503	0,260	0,280	0,599

Rb = contenido de cerámicos; w = humedad de compactación; C= contenido de cemento en peso; TC tiempo de curado.

De forma similar, para las mezclas de suelo con RCD estudiadas por López & Alcalde (2015), se llevaron a cabo ajustes con y sin restricciones (ver tablas 15 y 16). En general, adiciones de suelo superiores al 50% no pueden ser ajustadas con el modelo propuesto.

Tabla 15. Resultados del ajuste del modelo de MEPDG (NCHRP, 2004) para las bases derivadas de mezclas de RCD con suelo sin restricciones.

Autor	Suelo (%)	RCD (%)	w (%)	TC (días)	k1	k2	k3	R2
López & Alcalde	0	100	17	0	1,745	0,002	0,077	0,062
López & Alcalde	50	50	25	0	1,584	0,000	0,000	0,000
López & Alcalde	75	25	28	0	1,694	0,000	0,000	0,000
López & Alcalde	0	100	17	0	3,841	0,196	0,000	0,484
López & Alcalde	50	50	25	0	1,325	0,000	0,000	0,000
López & Alcalde	75	25	28	0	1,148	0,000	0,000	0,000
López & Alcalde	100	0	34	0	0,480	0,000	0,000	0,000
López & Alcalde	25	75	20	0	1,964	0,001	0,359	0,093

Tabla 16. Resultados del ajuste del modelo de MEPDG (NCHRP, 2004) para las bases derivadas de mezclas de RCD con suelo con restricciones.

Autor	Suelo (%)	RCD (%)	w (%)	TC (días)	k1	k2	k3	R2
López & Alcalde	0	100	17	0	1,156	0,260	0,280	0,008
López & Alcalde	50	50	25	0	1,011	0,260	0,280	0,141
López & Alcalde	75	25	28	0	1,103	0,260	0,280	0,030
López & Alcalde	0	100	17	0	1,500	0,284	0,280	0,834
López & Alcalde	50	50	25	0	0,867	0,260	0,280	0,093
López & Alcalde	75	25	28	0	0,731	0,260	0,280	0,208
López & Alcalde	100	0	34	0	0,424	0,260	0,280	0,405
López & Alcalde	25	75	20	0	1,496	0,260	0,280	0,448

En la Figura 58 se presenta el efecto de los distintos factores analizados, sobre el parámetro o coeficiente de regresión k1 del ajuste matemático, donde se destaca que, para valores mayores de contenido de cemento, contenido de humedad y contenido de RCD, el valor obtenido en el ajuste del parámetro k1 también es mayor, lo que indica una influencia directa de los factores mencionados sobre el esfuerzo volumétrico o bulk stress (θ).

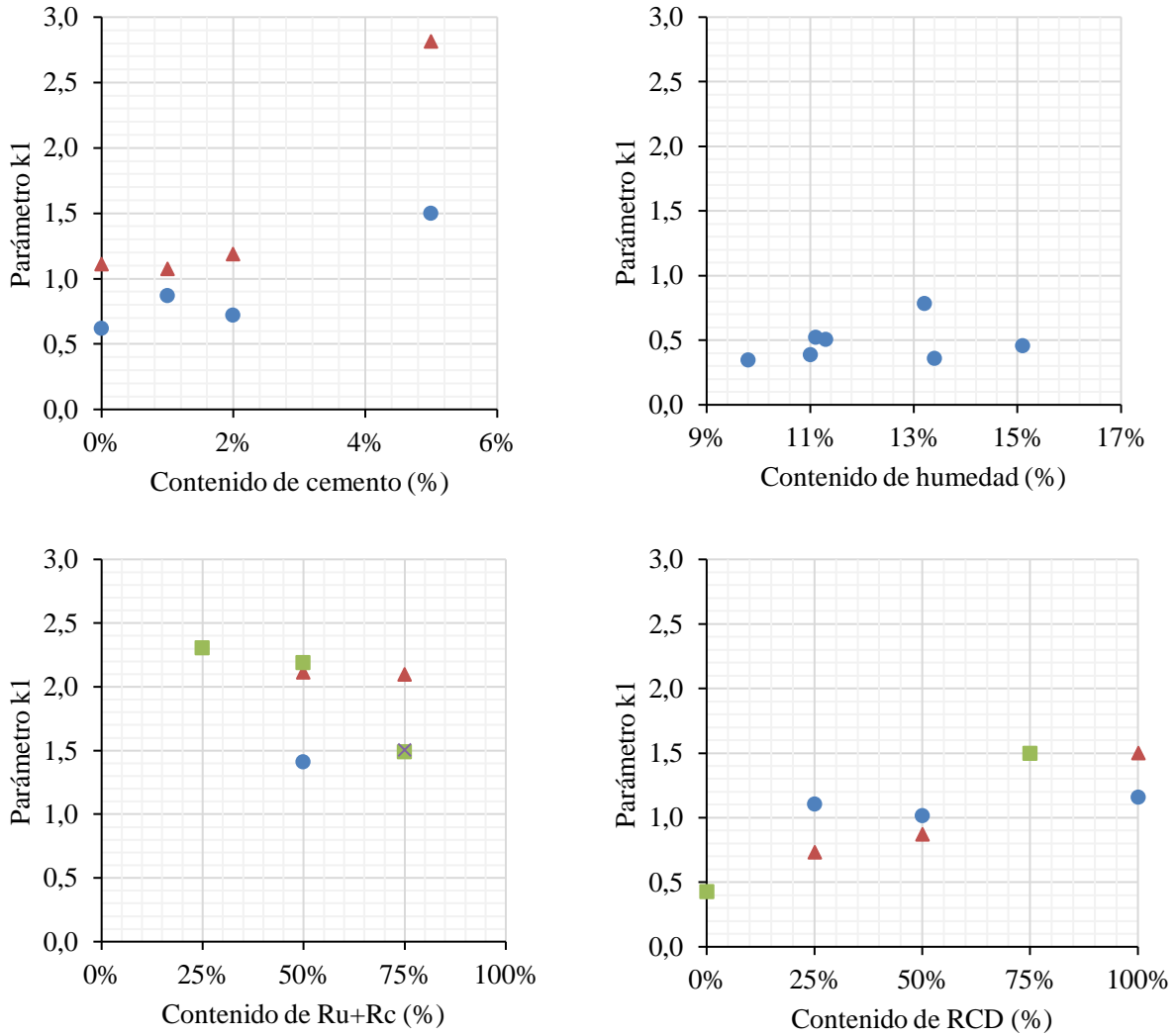


Figura 58. Influencia de diferentes factores en el parámetro k_1 del modelo del módulo de resiliencia.

Luego, se procede a analizar la influencia de los mismos 4 factores en el coeficiente de regresión k_2 , como se observa en la Figura 59. De acuerdo con la misma figura se deduce que la afectación del parámetro debido a los factores analizados es mínima, siendo en todos los casos ascendente siempre que aumenten los factores de humedad, contenido de cemento, contenido de RCD y composición del agregado RCD.

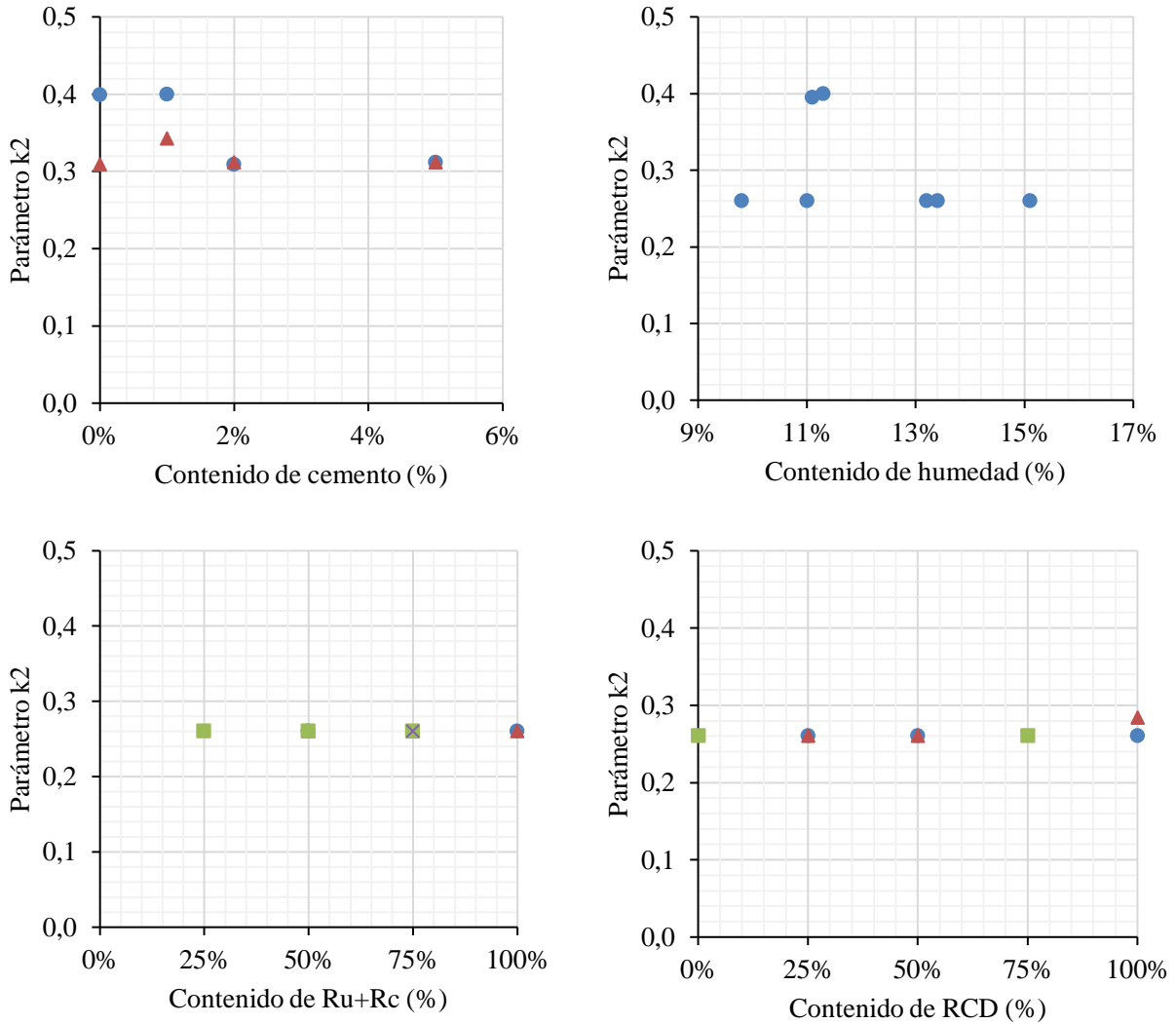


Figura 59. Influencia de diferentes factores en el parámetro k2 del modelo del módulo de resiliencia.

Por último, se analiza el efecto en el parámetro k3 debido a los factores nombrados anteriormente para los otros dos coeficientes de regresión, donde se obtiene según la Figura 60, que el coeficiente se ve principalmente afectado por el contenido de cemento, el contenido de humedad y la composición del agregado RCD, mientras que el contenido de RCD de la muestra, según los resultados obtenidos, no aparenta afectar el coeficiente de regresión en asunto.

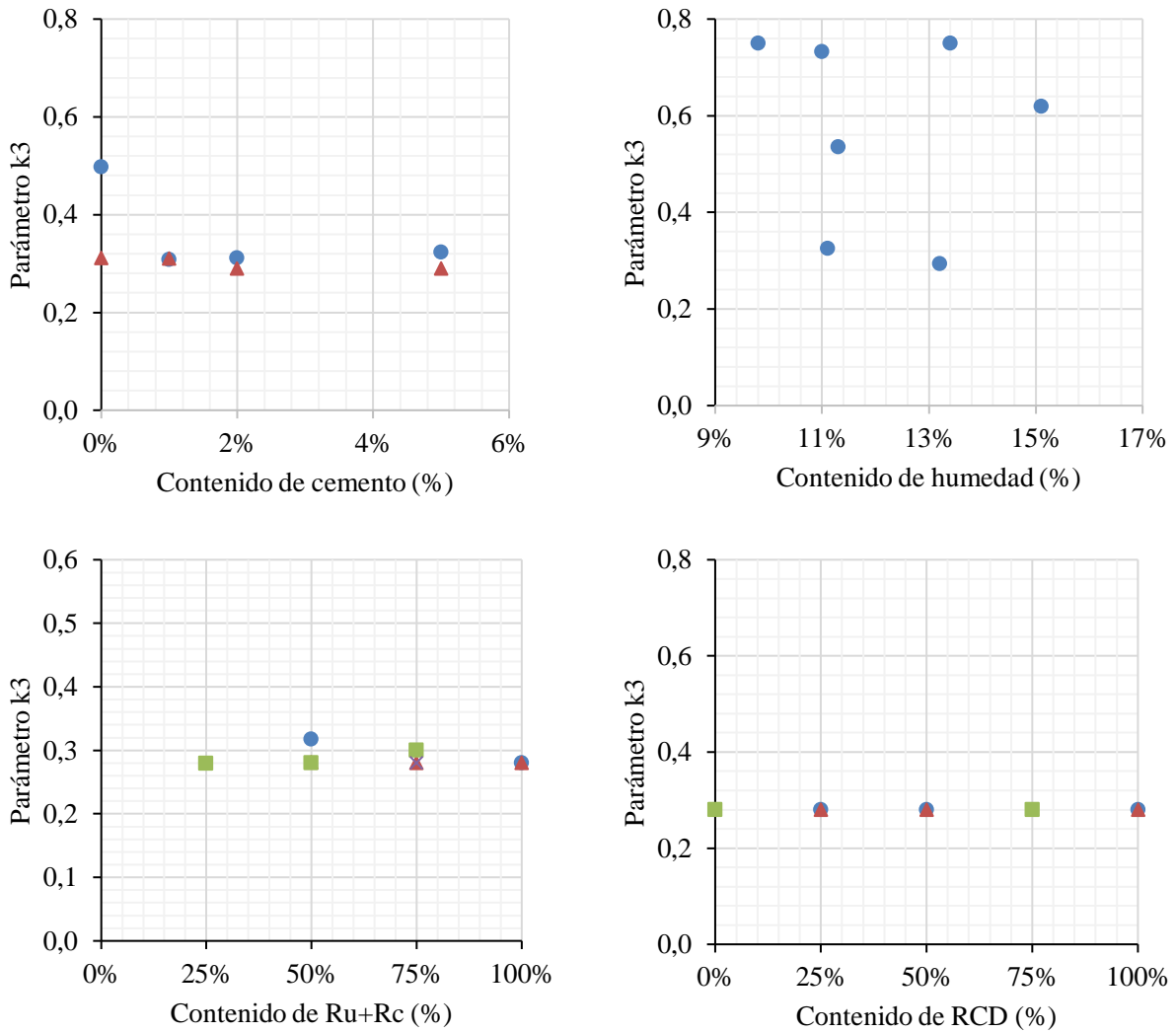


Figura 60. Influencia de diferentes factores en el parámetro k_3 del modelo del módulo de resiliencia.

5.3. Modelo de propuesto

A partir de las observaciones anteriores resumidas en la Figura 58 a la Figura 60 se puede concluir que el módulo de resiliencia M_r en los materiales de RCD-R estudiados sin altos contenidos de suelo (<50% o menos) presenta las siguientes características:

- A mayor esfuerzo volumétrico (bulk stress) el M_r crece;
- A mayor esfuerzo cortante octaédrico el M_r crece;

- A mayor contenido de partículas duras como las clases Rc y Ru en comparación a las partículas cerámicas Rb, el Mr crece.
- A mayor tiempo de curado de los especímenes de prueba el Mr crece.
- Las adiciones de cemento provocan un incremento del módulo de resiliencia Mr.

Con relación a los parámetros de ajuste se puede concluir que los parámetros k_2 y k_3 parecen ser muy similares en cada una de las investigaciones razón por la cual son una constante que puede estar relacionada con la granulometría, ya que este es el patrón común de partida en todos los análisis.

De forma similar al Mr, el parámetro de ajuste k_1 presenta el siguiente comportamiento:

- A mayor contenido de partículas duras como las clases Rc y Ru en comparación a las partículas cerámicas Rb el k_1 crece.
- A mayor tiempo de curado de los especímenes de prueba el k_1 crece.
- A mayor contenido de cemento el parámetro k_1 crece.
- A mayor contenido de suelo el parámetro k_1 decrece.

De lo anterior las variaciones en el parámetro k_1 son más sensibles a las variables anteriores que los demás parámetros de ajuste, por tanto, se propone una extensión del modelo de la guía MEPDG (NCHRP, 2004) como sigue:

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (39)$$

donde, k_1 , k_2 y k_3 son los parámetros o coeficientes de regresión; θ es la suma de los esfuerzos principales o bulk stress en las mismas unidades de p_a ; p_a es una presión de referencia igual a $100 \text{ kPa} \approx 1 \text{ kgf/cm}^2 \approx 200 \text{ psf} \approx 14,5 \text{ psi}$, y τ_{oct} es el esfuerzo cortante octaédrico en las

mismas unidades de p_a . Las dos variables de estado de esfuerzos se pueden calcular a partir de los esfuerzos principales como:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \text{ ó } \theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 \text{ para el ensayo triaxial } \sigma_2 = \sigma_3 \quad (40)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \text{ ó } \tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d \text{ para el triaxial} \quad (41)$$

donde, σ_1 es el esfuerzo principal mayor; σ_2 es el esfuerzo principal intermedio; y σ_3 es el esfuerzo principal menor.

De acuerdo con el modelo propuesto los parámetros de ajuste, k_1 , k_2 y k_3 de la ecuación (39) quedan como sigue:

$$k_1 = 0,428 \left(\frac{S}{100} \right) + 1,903 \left(\frac{Ru + Rc}{100} \right) + 6,493 \left(\frac{Cem}{100} \right) \quad (42)$$

$$k_2 = 0,26$$

$$k_3 = 0,29$$

donde, S = es el contenido de suelo en porcentaje, válido menor de 50%; $Ru + Rc$ = es la suma de residuos de concreto y morteros con residuos no ligados en porcentaje; y Cem = es el contenido de cemento en porcentaje.

De acuerdo con lo anterior la ecuación (39) quedaría como:

$$Mr[MPa] = \left[0,428 \left(\frac{S}{100} \right) + 1,903 \left(\frac{Ru + Rc}{100} \right) + 6,493 \left(\frac{Cem}{100} \right) \right] p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{0,26} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{0,29} \quad (43)$$

A partir de la ecuación (43) se puede predecir el módulo resiliente de agregados de RCD-R que incluyan menos del 25% de suelo como contaminante, que estén libres de cerámicos (Rb) o con un contenido de hasta el 75% y que sean adicionados con hasta un 5% de cemento Portland.

En las Figura 61 a Figura 63 se presenta el desempeño del modelo, en general sobre estima ligeramente el efecto de las adiciones de cemento a edades tempranas de 7 días, tal como se

mencionó no consigue reproducir de forma aceptable una contaminación con suelo igual al 50% o más.

Es importante notar en la Figura 61, que para las adiciones de 1 y 5% a edades tempranas de ensayo (7 días) se consigue estimar de manera aceptable el Mr, sobre estimándolo ligeramente, mientras que, para la edad de ensayo de 28 días se observa que el módulo resiliente se subestima en el caso de una adición de cemento portland del 5%, por lo que sería conveniente evaluar el desempeño del modelo con adiciones de cemento entre el 2 y 5%.

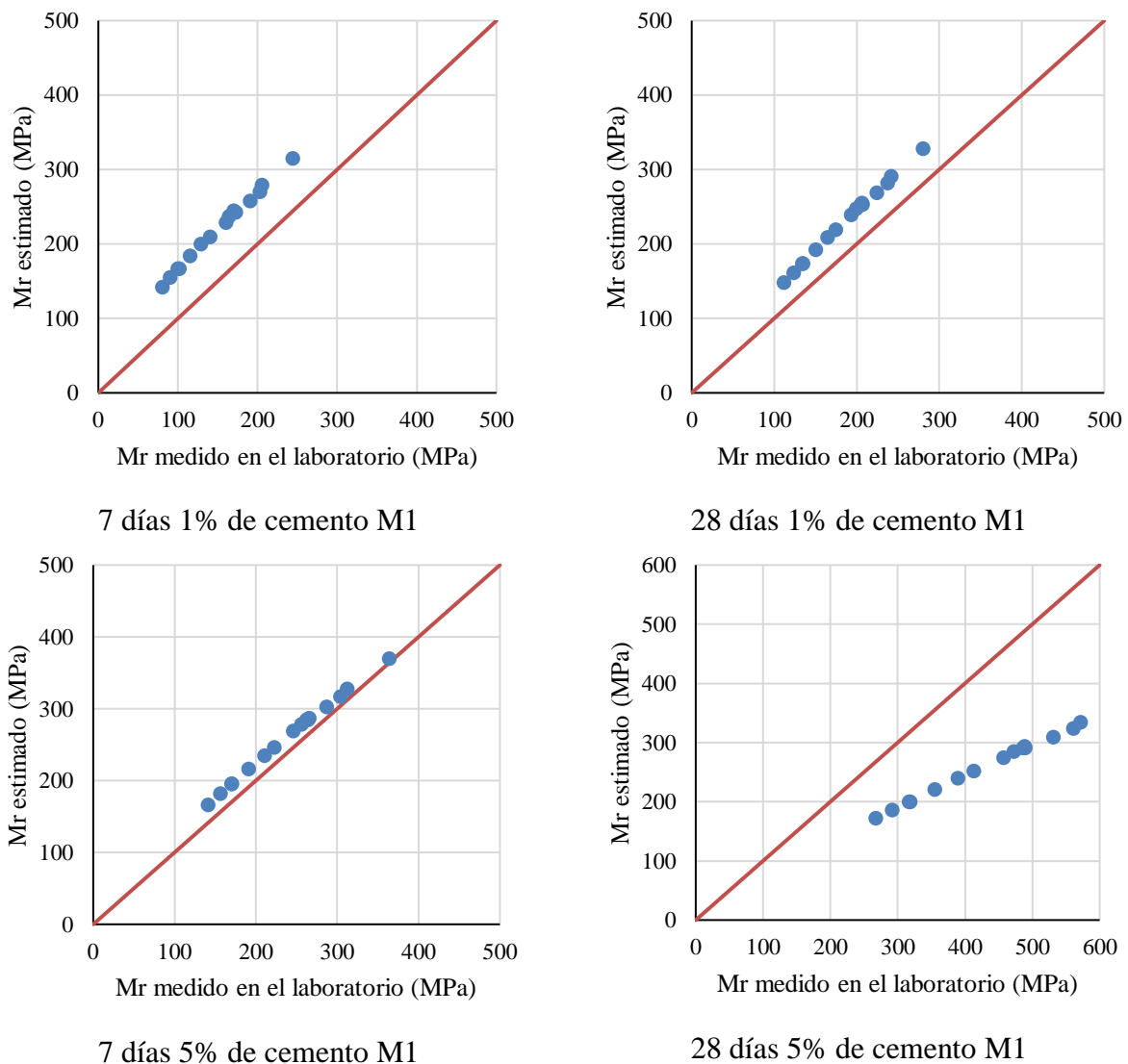


Figura 61. Predicción del Mr con el modelo propuesto para adiciones en el contenido de cemento.

Por otra parte, se observa en la Figura 62, que para las muestras que oscilen entre un 25 y 100% de contenido de materiales Rc y Ru, el modelo se ajusta de manera aceptable a una medida de Mr que se tome directamente en el laboratorio, sin embargo, estos límites que se mencionan, se establecen debido a la base de datos con la que se trabaja, pues en caso de tener una base de datos más grande, probablemente los rangos de aplicabilidad del modelo se amplíen.

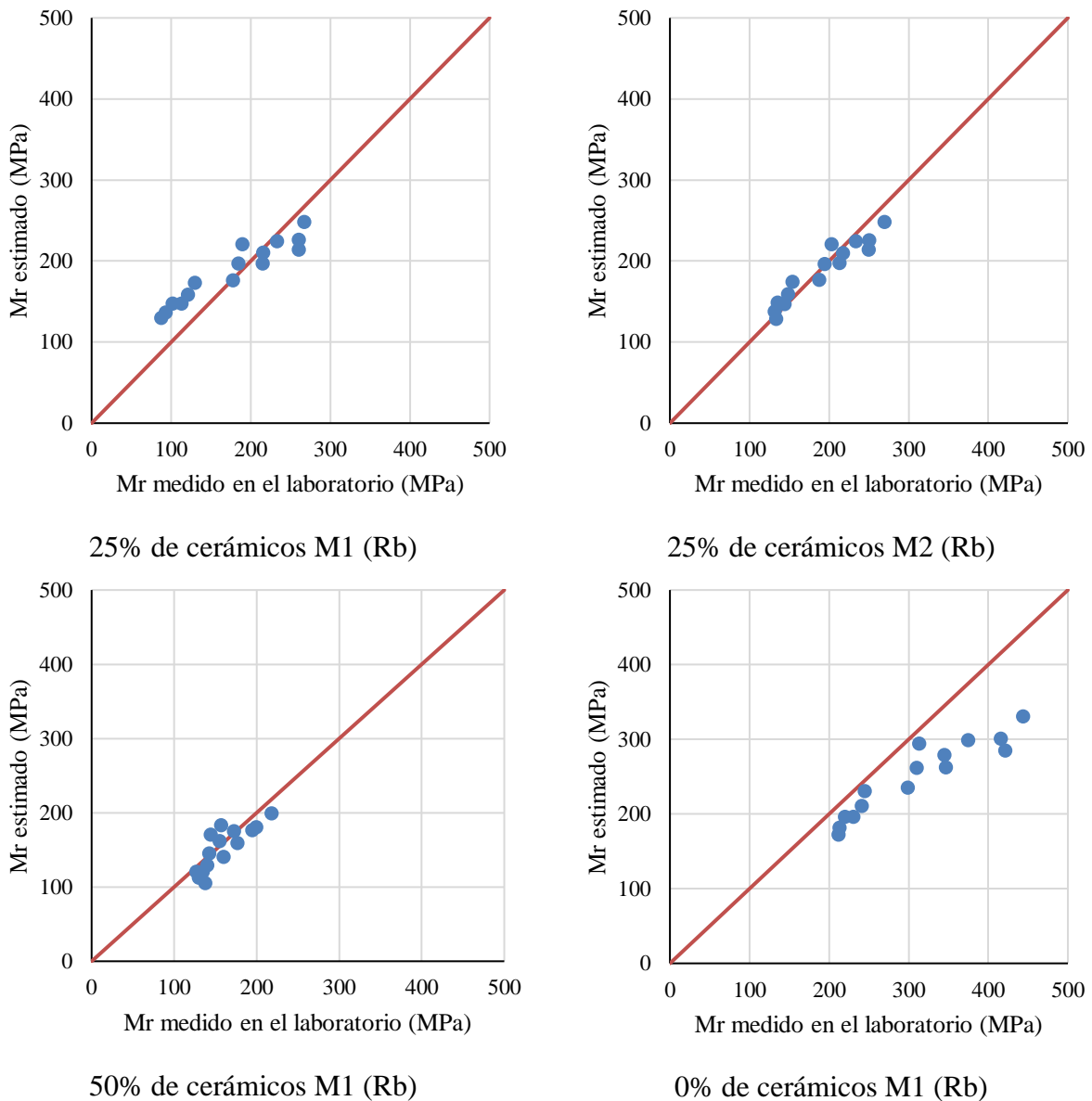


Figura 62. Predicción del Mr con el modelo propuesto para cambios en la composición en función del contenido de residuos cerámicos.

Por último, es posible apreciar en la Figura 63, que el modelo estima con una buena tendencia los M_r para las muestras de RCD que estén contaminadas con un porcentaje de suelo inferior al 50%. Sin embargo, debido a que los autores citados dan un salto en la incorporación de suelo del 25% al 50%, existe la posibilidad de que el modelo sea aplicable en muestras de RCD con un 40% de contaminación con suelo, por ejemplo.

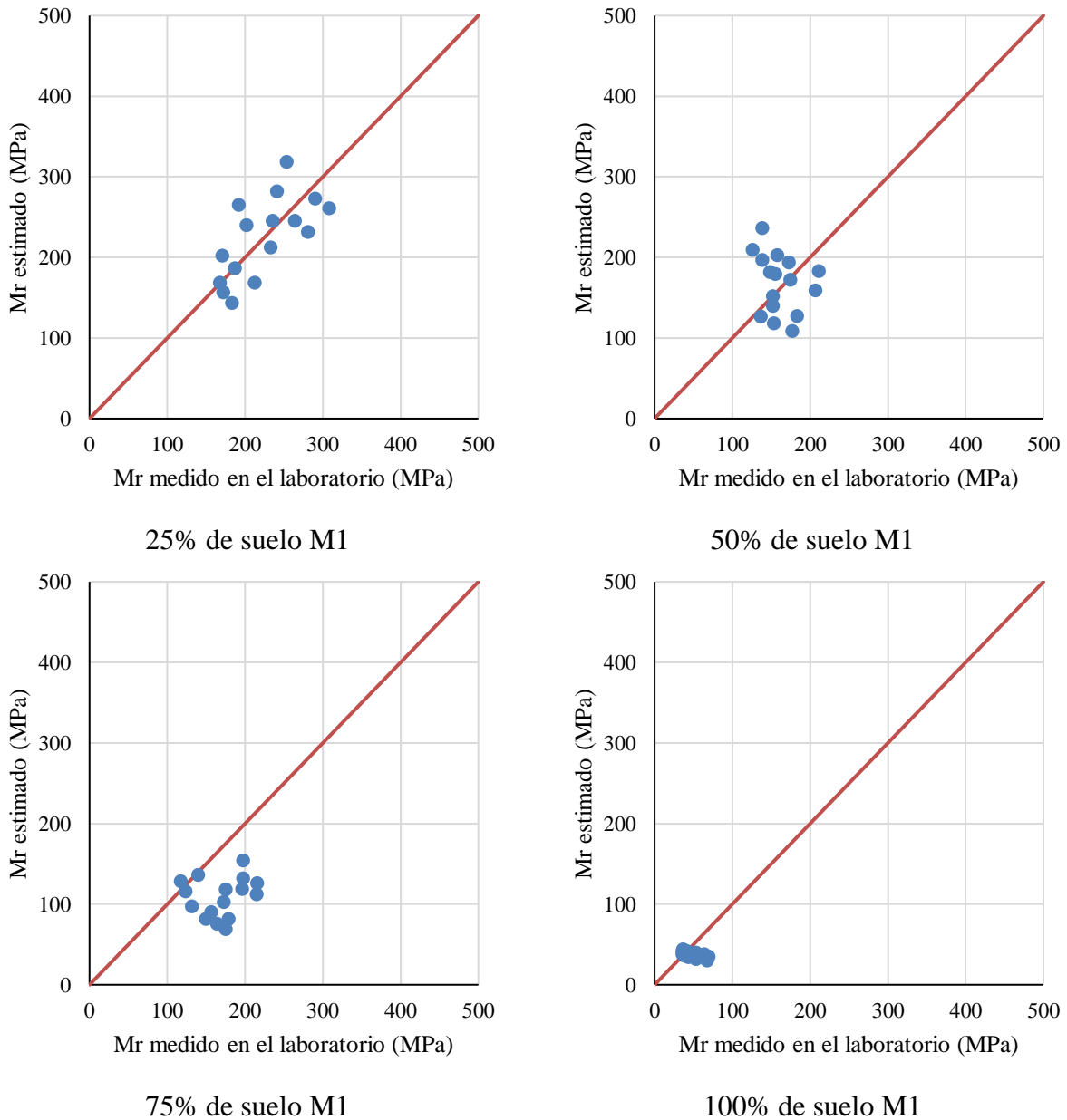


Figura 63. Predicción del M_r con el modelo propuesto para contaminación con suelo.

6. CONCLUSIONES

En el presente capítulo son consignadas las conclusiones obtenidas a partir de la recopilación y análisis de la información existente y las recomendaciones para trabajos futuros.

6.1. Conclusiones

A partir del análisis de la información existente, y mediante modelos de regresión lineal y no lineal múltiple fue posible establecer una relación empírica que permite estimar el módulo de resiliencia de materiales granulares derivados de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Santiago de Cali.

Se recopilaron resultados de la caracterización de la composición, incluyendo variables como la absorción, la plasticidad, y la distribución granulométrica de agregados reciclados RCD-R en Santiago de Cali, así como el CBR, la resistencia a la compresión simple y el módulo de resiliencia, variables necesarias en el diseño de la estructura del pavimento.

Fueron analizados los efectos de variables como la humedad de compactación, la composición del RCD-R, la contaminación con suelo y la adición de cemento Portland en el módulo resiliente.

De los análisis anteriores se pueden generar las siguientes conclusiones con relación a las características de los materiales:

- En la composición predominan los residuos asociados a productos cementicios (Rc), constituyen aproximadamente el 50% de los RCD, y los cerámicos (Rb) y agregados no ligados (Ru) aportan el 25% cada uno.
- El aporte de constituyentes o contaminantes en los RCD analizados es bastante bajo, y el único material presente que puede presentar algún inconveniente son los residuos de vidrio (Rg) que ocasionalmente alcanzan el 2%.

- El agregado reciclado RCD-R producido en Santiago de Cali que se ofrece como material de base granular no cumple con los husos granulométricos definidos por el INVIAS, y es necesario hacer un ajuste para su uso.
- Con relación a la dureza ninguno de los RCD-R cumple con los requisitos mínimos de desgaste en la Máquina de Los Ángeles, $<50\%$ y $<35\%$, y se ubican en la franja entre el 50 al 60%.
- La limpieza de los agregados de RCD-R estudiados los materiales son no plásticos y tienen un límite líquido entre 30 y 36, valores inferiores al máximo permitido de 40.
- El material granular de RCD-R estudiado presenta una facilidad de compactación con una humedad óptima para la energía Proctor modificada del orden del 16% variando medio punto hacia abajo y hacia arriba.

Con relación a los ensayos mecánicos efectuados por los diferentes autores se puede concluir que:

- Los resultados obtenidos están directamente ligados a la calidad de los cuerpos de prueba, en especial en los ensayos de resistencia a la compresión simple y de módulo de resiliencia.
- En los ensayos de compresión simple efectuados con el RCD-R sin modificaciones, la resistencia a la compresión se incrementa con el tiempo de curado, esto es un indicador de que en el proceso de trituración del RCD se liberan algunas partículas cementantes que actúan posterior a la compactación de los cuerpos de prueba.
- Tres de las cuatro investigaciones presentan índices de soporte de California CBR superiores a los valores mínimos exigidos por INVIAS.

- El CBR se ve afectado principalmente por la adición de suelo reduciéndose, y se incrementa cuando aumenta la proporción de Rc y Ru en el RCD-R con relación al Rb. De forma análoga a la compresión, este se incrementa con el contenido de cemento.

A partir de los resultados del módulo de resiliencia Mr en los materiales de RCD-R estudiados sin altos contenidos de suelo (<50% o menos) se puede concluir que:

- A mayor esfuerzo volumétrico (bulk stress) el Mr crece;
- A mayor esfuerzo cortante octaédrico el Mr crece;
- A mayor contenido de partículas duras como las clases Rc y Ru en comparación a las partículas cerámicas Rb el Mr crece.
- A mayor tiempo de curado de los especímenes de prueba el Mr crece.
- Las adiciones de cemento provocan un incremento del módulo de resiliencia Mr.

Con relación a los parámetros de ajuste con el modelo del MEPDG (NCHRP, 2004) se puede concluir que los parámetros k2 y k3 parecen ser muy similares en cada una de las investigaciones razón por la cual son una constante que puede estar relacionada con la granulometría, ya que este es el patrón común de partida en todos los análisis.

De forma similar al Mr, el parámetro de ajuste k1 presenta el siguiente comportamiento:

- A mayor contenido de partículas duras como las clases Rc y Ru en comparación a las partículas cerámicas Rb el k1 crece.
- A mayor tiempo de curado de los especímenes de prueba el k1 crece.
- A mayor contenido de cemento el parámetro k1 crece.
- A mayor contenido de suelo el parámetro k1 decrece.

De acuerdo con todo lo anterior, se ha logrado el objetivo de la investigación, el cual consistía en proponer un modelo para la estimación del Mr que en resumen, logra mejorar la

precisión al momento de determinar cuantitativamente este parámetro, pues la revisión bibliográfica que se hizo demostró que las correlaciones planteadas en base al CBR, arrojan resultados de módulo resiliente muy distantes de la realidad, es decir, poco semejantes a los que se obtienen en un laboratorio mediante ensayos de compresión triaxial.

Es importante recalcar, que el modelo que se propone en la presente investigación será útil en el diseño de las capas granulares que componen el pavimento, las cuales, son específicamente las bases y las subbases, en base a las cuales se realizó todo el análisis del comportamiento mecánico del agregado tipo RCD.

6.2.Recomendaciones para trabajos futuros.

En la presente investigación se logró establecer una relación entre distintos factores y el módulo resiliente de una muestra de material RCD, sin embargo, debido a las limitaciones de laboratorio con las que se contó en la época de pandemia, solo se pudo trabajar con los datos que otros autores obtuvieron de los ensayos. Por lo anterior, sería recomendable en investigaciones futuras ligadas al tema:

- Ensayar muestras con mayor contenido de cemento del aquí investigado (5%) con el fin de determinar si en grandes cantidades contribuye a la mejora de las propiedades mecánicas del material.
- Indagar en el posible planteamiento de un modelo que involucre más factores de influencia, por ejemplo, con otro tipo de adiciones a la muestra.
- Plantear un modelo no lineal con los mismos parámetros, con el fin de reducir la sobreestimación del módulo en los casos mencionados en las conclusiones.

- Utilizar otros modelos base diferentes al de la guía MEPDG (NCHRP, 2004), que incorpore más o menos coeficientes de regresión (k_1, k_2, \dots, k_n) y realizar los respectivos ajustes y comparaciones de precisión en la estimación del módulo resiliente M_r .
- De no encontrarse un modelo general que abarque todas las condiciones posibles de un RCD, plantear modelos para las condiciones aquí no contempladas.
- Construir un tramo prueba de vía a escala, para comprobar el comportamiento en campo de un pavimento diseñado en base al modelo propuesto en esta investigación.
- Por último, teniendo este trabajo como base, se podría indagar en la incorporación del material RCD en una mezcla asfáltica, para la cual habría que realizar varios ensayos de laboratorio adicionales e identificar si para factores como la adherencia entre el agregado RCD y el asfalto es óptima. Todo esto teniendo en cuenta que esta investigación no contempló dentro de su análisis un uso diferente para el RCD aparte de la incorporación en las bases y subbases de las vías.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*.
- Alcalde, L., & Lopez, D. C. (2015). *Uso de residuos de construcción y demolición reciclados (RCD-R-R) con adición de suelo natural como material de pavimentos*. Pontificia universidad Javeriana Cali.
- Anwar Hossain, K. M. (2011). Stabilized Soils Incorporating Combinations of Rice Husk Ash and Cement Kiln Dust. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(9), 1320–1327. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000310](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000310)
- Armijos, J. V. (2019). *Caracterización de la generación de residuos de construcción en sistemas industrializados para viviendas de interes social, en la ciudad de Santiago de Cali*. Pontificia universidad Javeriana Cali.
- Asociación Brasileira de normas técnicas. *Recycled aggregates of construction and demolition wastes - Construction of pavement layers - Procedures*. ABNT NBR 15115. , (2004).
- Barrera, E. D., & Olmedo, O. A. (2015). *Utilización de residuos de construcción y demolición (RCD) ligados con materiales cementantes en pavimentos*. Pontificia universidad Javeriana de Cali.
- Beja, I. A., Motta, R., & Bernucci, L. B. (2020). Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. *Construction and Building Materials*, 258, 119520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119520>
- Brown, S. F. (1996). Soil mechanics in pavement engineering. *Géotechnique*, 46(3), 383–426. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.3.383>
- Camacol-Valle. (2017). *Estudio de oferta y demanda de vivienda en Santiago de Cali y su área de influencia: 2017 Candelaria, Jamundí, Palmira y Yumbo*.
- Contraloría General de Santiago de Cali. (2019). *Informe Anual del Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente Municipio de Cali – Vigencia 2018*. Santiago de Cali.
- DANE. (2004). *Emisiones de Dióxido de Carbono per cápita*. Bogotá D.C.
- Departamento Administrativo de Planeación. (2020). *Cali en cifras 2020*.
- Domingo, A., Pelufo, M. J., Serna, P., Ulloa, V. A., & Vergara, N. N. (2007). Uso de los residuos de construcción y demolición en la fabricación de hormigón, para uso estructural. Evaluación de las propiedades mecánicas. *Redisa*, 12.
- Drumm, E. C., Boateng-Poku, Y., & Johnson Pierce, T. (1990). Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(5), 774–789. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:5\(774\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:5(774))
- Embus, D., & Quintero, L. (2015). *Influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como material de la estructura del pavimento*. Pontificia universidad Javeriana de Cali.
- Fredlund, D. G., Bergan, A. T., & Wong, P. K. (1977). Relation between Resilient Modulus and Stress Conditions for Cohesive Subgrade Soils. *Transportation Research Record No. 642*, 73–81. Washington D.C.: National Research Council.
- Garnica, A. P., Gómez, L. J. A., & Sesma, J. A. M. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*.
- Garnica, A. P., Pérez, G. N., & Gómez, L. J. A. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*, Publicacion No.142. Queretaro.
- Gómez, A. M. (2011). *Estudio experimental de un residuo de construcción y demolición (RCD)*

- para utilización en pavimentos. Universidad de Brasilia.
- Gómez, A. M. (2016). *Comportamiento mecánico de un agregado reciclado a partir de residuos de construcción y demolición sometido a cargas cíclicas*. Universidad de Brasilia.
- Góngora, I. A. (2011). *Utilización de geosintéticos como refuerzo de vías no pavimentadas: Influencia del tipo de refuerzo y del material de relleno*. Universidad de Brasilia.
- Gopalakrishnan, K., & Thompson, M. R. (2007). Characterization of NAPTF subgrade soils for mechanistic-based analysis and design of airport flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(4), 307–321. <https://doi.org/10.1080/10298430600704174>
- Green, J. L., & Hall, J. W. (1975). *Nondestructive vibratory testing of airport pavements* (Vol. 1). Washington, D.C, USA.
- Heukelom, W., & Klomp, A. J. G. (1962). Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. *Transportation Research Board*, 203(1), 495–510.
- Hossain, S., & Kim, W. S. (2014). *Estimation of subgrade resilient modulus using the unconfined compression test*. Virginia.
- Jimenez, E. C., & García, H. M. (2016). *Aprovechamiento de los RCD en proyectos de construcción y conservación de pavimentos urbanos*. Universidad católica de Bogotá, Colombia.
- Kim, D., & Siddiki, N. Z. (2006). *Simplification of resilient modulus testing for subgrades*. West Lafayette.
- Lee, W., Bohra, N. C., Altschaeffl, A. G., & White, T. D. (1995). Resilient modulus of cohesive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2), 131–135.
- Leite, F. da C., Motta, R. dos S., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2972–2979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>
- Lotfi, H. A., Schwartz, C. W., & Mitczak, M. W. (1988). Compaction specification for the control of pavement subgrade rutting. *Transportation Research Board*, (1196), 108–115.
- Mack, J., Solberg, C., & Voigt, G. (1993). Recycled concrete pavement. *TB-014P*.
- Marín. (2019). Análisis de la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) en un proyecto. *Pontificia Universidad Javeriana Cali., Trabajo de.*
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2019). Minambiente reglamenta manejo y disposición de residuos de construcción y escombros. Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2681-minambiente-reglamenta-manejo-y-disposicion-de-residuos-de-construccion-y-escombros>
- NCHRP. (2004). *Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Washington DC.
- Newcomb, D. E., & Birgisson, B. (1999). Measuring in situ mechanical properties of pavement subgrade soils. *Transportation Research Board*, (278), 79.
- Ng, C. W. W., Zhou, C., Yuan, Q., & Xu, J. (2013). Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(2), 223–232. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0052>
- Obla, K., Kim, H., & Lobo, C. (2007). Crushed returned concrete as aggregates for new concrete. In *Project 5-13*.
- Perez, J. M., & Caicedo, S. L. (2014). *Estudio del uso agregados reciclados de reiduos de construcción y demolición (RCD) provenientes de la ciudad de Cali como material para la construcción de elementos prefabricados de concreto, caso de los adoquines*. Pontificia universidad Javeriana Cali.

- Powell, W. D., Potter, J. F., Mayhew, H. C., & Nunn, M. E. (1984). The structural design of bituminous roads. *Transportation Research Board*, (1115), 62.
- Rengifo, D. V., & Chavez, H. (2015). *Influencia de la composición en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como elemento de la estructura del pavimento*. Pontificia universidad Javeriana Cali.
- Robayo Salazar, R. A., Matthey Centeno, P. E., Silva Urrego, Y. F., Burgos Galindo, D. M., & Delvasto Arjona, S. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Revista Tecnura*, 19(44), 157. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12>
- Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). Resilience Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements. In A. Arbor (Ed.), *First International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements* (pp. 20–24).
- Thavathurairaja, J. (2017). *Characterization of Unbound Materials for Mechanisticempirical Pavement Design Guide (MEPDG)*. University of Nevada, Reno.
- Thompson, M. R., & Robnett, Q. L. (1979). Resilient Properties of Subgrade Soils. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 105(1), 71–89.
- UIS-UPME. (2018). *Realizar un análisis del potencial de reutilización de minerales en Colombia y definir estrategias orientadas a fomentar su aprovechamiento por parte de la industria en el país bajo el enfoque de economía circular Contrato Interadministrativo CI-049-2018*. Bucaramanga.
- United Nations. (2019). Población.
- Uzan, J. (1985). Characterization of Granular Materials. In N. R. Council (Ed.), *Transportation Research Record 1022* (pp. 52–59). Washington D.C.
- Webb, W. M., & Campbell, B. E. (1986). *Preliminary investigation into resilient modulus testing for new AASHTO pavement design guide*. Atlanta.
- Yau, A., & Von Quintus, H. (2002). *Study of LTPP Laboratory resilient modulus test data and response characteristics*. Washington, DC.