

2-2015

Influencia de la humedad y el tiempo de curado en la propiedad auto-cementante de un agregado de concreto reciclado proveniente de la ciudad de Bogotá

María Juliana Chaparro López
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil



Part of the [Civil Engineering Commons](#)

Citación recomendada

Chaparro López, M. J. (2015). Influencia de la humedad y el tiempo de curado en la propiedad auto-cementante de un agregado de concreto reciclado proveniente de la ciudad de Bogotá. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/397

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Civil by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**INFLUENCIA DE LA HUMEDAD Y EL TIEMPO DE CURADO EN LA
PROPIEDAD AUTO-CEMENTANTE DE UN AGREGADO DE CONCRETO
RECICLADO PROVENIENTE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ**

MARÍA JULIANA CHAPARRO LÓPEZ

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C
2015**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director temático
Msc. Lucio Guillermo López Yepes**

**Universidad De La Salle
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
Bogotá D.C
2015**

Notas de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, Febrero de 2015

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a:

El Ingeniero Andrés Mauricio Lotero quien transmitió sus conocimientos en el tema y aportó en gran medida al desarrollo de la presente investigación.

El Ingeniero Lucio Guillermo López Yepes, director temático del trabajo de grado titulado “Influencia de la Humedad y el Tiempo de Curado en la Propiedad Auto-Cementante de un Agregado de Concreto Reciclado Proveniente de la Ciudad de Bogotá” quien con su apoyo fue posible realizar el presente trabajo.

Cada uno de los docentes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle, cuyos conocimientos, aportados a lo largo de mi carrera profesional, contribuyó de manera significativa para mi formación como Ingeniera.

Al equipo técnico del laboratorio del Programa de Ingeniería Civil, quienes con sus conocimientos y apoyo aportaron a la realización de los ensayos experimentales de la presente investigación.

Dedicatoria

A mis padres Myrian López Ruiz y Juan Carlos Chaparro Sánchez, quienes con su dedicación, apoyo y enseñanza me han guiado en el camino de la vida y me dieron las bases necesarias para ser la persona que soy; también agradezco a mi hermana mayor Alejandra quien con su acompañamiento y consejos abrió mi mente a la adquisición constante de conocimiento; y a mi hermana menor María José quien aporta felicidad y entusiasmo para el cumplimiento de todas las metas.

María Juliana Chaparro López

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
1. Justificación	3
2. Objetivos.....	4
1.1. Objetivo General	4
1.2. Objetivos Específicos	4
3. Delimitación	5
2. Marco de referencia.....	7
2.1 Antecedentes	7
2.2. Marco Teórico	9
2.2.1. Agregado Concreto Reciclado	9
2.2.2. Estabilización de Suelos con Cemento.....	10
2.2.3. Tiempo de curado del concreto.....	13
2.2.4. Compactación de los suelos.....	15
2.3. Marco Conceptual.....	16
3. Metodología.....	18
3.2. Planteamiento de la Metodología	18
3.3. Caracterización del Material	18
3.4. Elaboración de las Probetas de Ensayo.....	21
3.4.1. Diseño del Molde.....	22
3.4.2. Preparación del material.....	24
3.4.3. Moldeo de los especímenes de ensayo.....	25
3.5. Tiempo de curado.	26
3.6. Numero de Probetas.....	27
3.7. Ensayo de resistencia a la compresión.....	28
6.2. Diagrama de Flujo.....	30
4. Procesamiento de Datos y Análisis de Resultados	31
4.2. Ensayos de caracterización	31
4.2.1. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado I.N.V.E- 122-13	31
4.2.2. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (I.N.V. E – 213 – 13).....	32

4.2.3.	Resistencia al Desgaste en Seco, 500 Revoluciones (%) I.N.V. E – 218 – 13	36
4.2.4.	Determinación del Límite Líquido de los Suelos I.N.V. E – 125 – 13	38
4.2.5.	Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 13.....	38
4.2.6.	Índices de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras I.N.V. E – 230 – 13	38
4.2.7.	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso I.N.V. E – 227 – 13 39	
4.2.8.	Determinación de la Humedad Óptima del Material	40
4.2.9.	Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Fino I.N.V. E – 222 – 13	45
4.2.10.	Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Grueso I.N.V. E – 223 – 13	47
4.2.11.	Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio I.N.V. E – 220 – 13.....	49
4.3.	Evaluación de los Resultados para un Afirmado, una Sub-Base Granular y una Base Granular.....	50
4.3.1.	Evaluación del Material para un Afirmado	50
4.3.2.	Evaluación del Material para una Sub-Base Granular.	54
4.3.3.	Evaluación del material para una Base granular	55
4.4.	Ensayos De Resistencia a la Compresión para Diferentes Contenidos de Humedad Y Tiempos De Curado	60
4.4.1.	Resumen de Resultados de Falla Visualizando el Cambio Según el Contenido de Humedad	62
4.4.2.	Resumen de Resultados de Falla Visualizando el Cambio Según el Tiempo de Curado	68
4.4.3.	Módulo de Elasticidad según el Tiempo de Curado y el Porcentaje de Humedad. 72	
5.	Conclusiones	76
6.	Recomendaciones y Posibles usos	77
	Bibliografía.....	78

Lista de Figuras

Figura 1. Propiedades del agregado reciclado	10
Figura 2. Resistencia a la compresión de cilindros de en función de la edad, para una variedad de condiciones de curado.	15
Figura 3. Curva de variación de la humedad y la densidad seca para un material	16
Figura 4. Molde fabricado a partir de una tubería de PVC de diámetro de 4”	22
Figura 5: Base de madera y abrazadera para cada molde	23
Figura 6: Montaje final del molde.	24
Figura 7: Probeta elaborada en el molde diseñado con la energía de compactación propuesta en la Norma I.N.V. E –612 – 13 numeral 6.2.....	25
Figura 8: cámara de curado utilizada en la investigación	26
Figura 9: Cámara húmeda fabricada cubierta con papel humedecido	27
Figura 10: Proceso de falla de una probeta de ensayo.	29
Figura 11: Calculo de contenido de agua del material.....	31
Figura 12: Calculo del coeficiente de curvatura.....	32
Figura 13: Calculo del coeficiente de curvatura.....	33
Figura 14: Curva granulométrica primer ensayo	34
Figura 15: Curva granulométrica Segundo ensayo	35
Figura 16: Calculo porcentaje de desgaste del material.....	37
Figura 17: Grafica de Resultados- Ensayo I.N.V. E – 141 – 13.....	42
Figura 18: Grafica de Resultados Ensayo I.N.V. E – 611.....	44

Figura 19: Tabla 311-3. Franjas granulométricas del material de afirmado.	50
Figura 20: Confrontación de la curva granulométrica del material con la franja granulométrica de la gradación A-38 de un afirmado.....	51
Figura 21: Confrontación de la franja granulométrica del material con la franja granulométrica de la gradación A-25 de un afirmado.....	52
Figura 22: Tabla 311-1. Requisitos de los agregados para afirmado.....	53
Figura 23: Tabla 320-3. Franjas granulométricas del material de sub-base granular.....	55
Figura 24: Tabla 330-3, Artículo 330-13 “BASE GRANULAR”.....	56
Figura 25: confrontación de la curva granulométrica del material con la Franja de la gradación BG-25.....	57
Figura 26: Tabla 330-2. Requisitos de los agregados para base granular.....	58
Figura 27: Gráfica de los resúmenes de las resistencias para cada contenido de humedad y tiempo de curado.....	62
Figura 28: Variación de la Resistencia según el porcentaje de humedad.	63
Figura 29: Variación de la Resistencia para Cada Humedad a 56 días de Curado.....	64
Figura 30: Variación de la Densidad con el Tiempo de Curado.	67
Figura 31: Variación de la resistencia según el tiempo de curado.	69
Figura 32: Variación de la resistencia según el Tiempo de Curado para la Humedad óptima.....	70
Figura 33: Compressive strength versus time for the reference concrete (CC), for different curing conditions.	71
Figura 34: Variación del Módulo de Elasticidad según el Tiempo de Curado y el Porcentaje de Humedad.....	72

Figura 35: Variación del Módulo de Elasticidad según el Tiempo de curado para Cada Humedad. 73

Introducción

Los agregados reciclados de concreto hidráulico son productos de la trituración y clasificación de residuos de concreto, generados en las actividades de construcción, demolición y reforma, de edificaciones, obra civil y espacio público. En la última década, en la ciudad de Bogotá, su producción ha aumentado en consecuencia al constante crecimiento del sector de la construcción. La disposición de estos residuos genera un alto impacto ambiental, afectando a humedales, ríos, quebradas y al mismo espacio público. (Castaño, Misle Rodríguez, Andres Lasso, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013).

Se han realizado numerosas investigaciones a nivel internacional, donde se reconoce a los agregados reciclados, como substitutos de materiales pétreos naturales provenientes de la explotación de canteras; estableciendo una gran cantidad de aplicaciones para este tipo de materiales, como lo son: la fabricación de concreto hidráulico sustituyendo el 100% del agregado natural (Escandon Mejia, 2011), la utilización mezclas de agregados reciclados para la elaboración de las capas estructurales que componen un pavimento (Cerni, & Colagrande, 2012), la producción de asfalto, entre otros.

En Colombia los estudios e investigaciones han sido escasos para los agregados de concreto reciclado, se han estudiado propiedades como la resistencia a la flexión, a la compresión y para algunas aplicaciones específicas como bloques y adoquines prefabricados, también la tasa de absorción y la resistencia a la tracción respectivamente (Castellanos & Quiroga, 2010). Adicionalmente, se ha encontrado que los agregados de concreto reciclado constan de una propiedad auto-cementante debido al contenido de cemento remanente.

En consecuencia a lo anterior, en la presente investigación se planteó el estudio de la influencia del contenido de humedad y el tiempo de curado en las propiedades auto-

cementantes, evaluada a partir de la resistencia a la compresión de un material proveniente de una planta de trituración de concreto reciclado de la ciudad de Bogotá. Con una misma energía de compactación se elaboraron probetas con distintos contenidos de humedad, las cuales posteriormente se sometieron a diferentes tiempos de curado; encontrando así que la resistencia del material depende del tiempo de curado, cuando éste es compactado con la humedad óptima.

1. Justificación

La explotación de canteras genera problemáticas ambientales, ya que crea: inestabilidad en el terreno, alteración de sus propiedades, cambios geomorfológicos y en general afecta el paisaje. Así mismo, la disposición de los materiales sobrantes de las obras de construcción causa problemas de tipo ambiental.

Estas consideraciones fundamentan la presente propuesta de efectuar estudios de nuevos materiales que reemplacen el uso de agregados naturales y por lo tanto, mitiguen el impacto ambiental que existe en el país.

Planteada así la cuestión, el beneficio va a recaer directamente en la protección de las canteras explotadas para materiales de construcción; y a la población en general, ya que la disposición de los residuos de construcción y demolición generan un alto impacto ambiental, afectando a humedales, ríos, quebradas y al mismo espacio público.

2. Objetivos

1.1. Objetivo General

Determinar la influencia del contenido de humedad y el tiempo de curado en la propiedad auto-cementante de un agregado proveniente de concreto reciclado, evaluada mediante su resistencia a la compresión simple.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características de un agregado de concreto reciclado, proveniente de una planta de trituración de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Bogotá; Según las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).
- Determinar la variación de la resistencia a la compresión de unos especímenes elaborados con diferentes contenidos de humedad y sometidos a diferentes tiempos de curado en cámara húmeda.

3. Delimitación

El alcance es el de establecer la variación de la resistencia de 100 especímenes elaborados con agregado de concreto reciclado proveniente de una planta de trituración de Bogotá, al someterse a 7, 14, 28 y 56 días de curado en cámara húmeda y preparados con diferentes porcentajes de humedad en relación a la humedad óptima (60%,80%, 120%,140%, 160% y 180% de la humedad óptima).

Las características del material de estudio dependerán del tipo de material que se produzca en la planta de trituración; así como su curva granulométrica, la cual será constante para la elaboración de todos los especímenes de ensayo que serán curados en cámara húmeda.

El proyecto tendrá como limitación en su desarrollo, la elaboración de los siguientes ensayos de caracterización establecidos en la metodología:

- Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (I.N.V. E – 213 – 13)
- Resistencia al desgaste En seco, 500 revoluciones (%) (I.N.V. E – 218 – 13)
- Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio (I.N.V. E – 220 – 13)
- Determinación del límite líquido de los suelos (I.N.V. E – 125 – 13)
- Límite plástico e índice de plasticidad de suelos (I.N.V. E – 126 – 13)
- Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (I.N.V. E – 230 – 13)

- Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (I.N.V. E – 227 – 13)
- Relaciones de humedad- peso unitario seco en los suelos (ensayo de compactación normal) (I.N.V. E – 141 – 13)
- Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (I.N.V. E – 222 – 13)
- Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (I.N.V. E – 223 – 13)
- Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento (I.N.V. E – 614– 13)

2. Marco de referencia

2.1 Antecedentes

El estudio de los agregados de concreto reciclado se ha incentivado en los últimos años debido al creciente interés por el cuidado del medio ambiente, el cual se ve afectado por la disposición en masa de residuos de construcción y demolición. Así mismo, se ha generado la necesidad de encontrar un sustituto de los agregados naturales, cuya extracción crea también un impacto ambiental. Por consiguiente se han realizado investigaciones a nivel mundial y nacional donde se realiza una caracterización de los agregados de concreto reciclado y se comprueba su comportamiento como sustitos de los agregados naturales.

A continuación se presentan los antecedentes más relevantes para esta investigación, donde se hace uso de los agregados reciclados como agregados naturales y se estudia su influencia en la resistencia a la compresión:

- En la investigación realizada por López, López-Colina, Serrano López, & Domingo Cabo (2013) se evalúa la influencia de diferentes condiciones de curado en la resistencia a la compresión de los agregados de concreto reciclado. Dos calidades diferentes de agregados reciclados fueron utilizadas para hacer hormigón con 0.65 de relación de agua / cemento. Los agregados reciclados fueron adicionados con su humedad natural y sustituyeron diferentes porcentajes de agregado grueso (0%, 20%, 50% y 100%). Los especímenes de concreto fueron expuestos a dos entornos diferentes (curado estándar y curado al aire libre) durante 28 días. Los resultados mostraron que el esfuerzo a la compresión al séptimo día aumenta con el porcentaje de sustitución, siendo este comportamiento más evidente, en el caso del espécimen sometido al curado estándar. La resistencia a la compresión del concreto elaborado con agregados reciclados, a los 28 días de curado fue similar a la obtenida para el

concreto elaborado con agregados naturales en el caso del curado estándar. Sin embargo, las probetas de hormigón de agregado reciclado perdieron hasta el 20% de su resistencia a la compresión al curarlas en condiciones al aire libre. Esto hizo evidente el efecto de las condiciones de curado sobre la resistencia del agregado del concreto reciclado.

- En la investigación realizada por Koenders, Pepe, & Martinelli, (2013) En esta investigación se estudia la correlación entre la evolución temporal del grado de hidratación y la resistencia a la compresión del agregado de concreto reciclado para diferentes relaciones de agua/cemento y condiciones de humedad inicial. Particularmente, la influencia de las condiciones de humedad se investigó mediante la supervisión del proceso de hidratación y la determinación del desarrollo de la resistencia a la compresión de los agregados reciclados, totalmente secos o totalmente saturados, en cuatro mezclas de agregado reciclado. Los procesos de hidratación se supervisaron a través de mediciones de la temperatura de endurecimiento en muestras de hormigón y la evolución en el tiempo del grado de hidratación, el cual se determinó a través de una hidratación y un modelo de flujo de calor.

- En la investigación realizada por Pepe, Koendersb, Faella, & Martinelli, (2014) Este artículo reporta un estudio sobre el comportamiento mecánico de hormigones de árido reciclado. Con este fin, se elaboraron en el Laboratorio de ensayo de materiales y estructura de la Universidad de Salerno (Italia), muestras de mezclas de concreto a base de áridos naturales (AN) y áridos de hormigón reciclado (ARC), caracterizadas por dos condiciones de humedad iniciales diferentes. La resistencia a la compresión se determina a diferentes tiempos de curado y se estudia la evolución temporal de la temperatura desarrollada dentro de las muestras de hormigón durante el fraguado. Al hacer uso de un modelo de flujo de calor teórico, las mediciones de temperatura se podrían emplear para identificar el proceso de hidratación del cemento que tienen lugar en este tipo de mezclas. Estos análisis evidencian que la reacción

de la hidratación está influida significativamente, no sólo por la relación nominal de agua-cemento, sino también por las condiciones de humedad iniciales de agregados reciclados, cuya porosidad significativamente mayor, modifica el contenido de agua realmente disponible en la mezcla durante la hidratación del cemento. Por otra parte, las correlaciones lineales surgieron entre el llamado "grado de hidratación" y la resistencia a la compresión correspondiente.

- En la investigación realizada (Fonseca, de Brito, & Evangelista, 2011) Esta investigación trata sobre el uso de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como árido reciclado (en particular, el hormigón triturado) para la producción de concreto. Donde se muestra los principales resultados de los experimentos para determinar la influencia de diferentes condiciones de curado en el rendimiento mecánico del concreto elaborado con agregado grueso reciclado procedente de hormigón triturado. Las propiedades analizadas incluyen resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, y resistencia a la abrasión. La conclusión general en términos de rendimiento mecánico es que el RCD se ve afectada por las condiciones de curado más o menos de la misma manera como Concreto Convencional.

2.2. Marco Teórico

En esta sección del documento se exponen los conceptos y definiciones principales que aportarán a un mejor entendimiento de los resultados de la presente investigación.

2.2.1. Agregado Concreto Reciclado

El agregado de concreto reciclado es el resultado de la trituración del material proveniente de la demolición de obras constructivas. Generalmente tiene superficies irregulares, bordes angulosos y gran adherencia; también una capacidad de absorción

de humedad relativamente elevada y una gravedad específica relativamente baja, debido a la presencia de la pasta de cemento que está adherida al agregado. La gradación de los agregados reciclados está determinada por el tipo de procesamiento efectuado para su obtención, es decir la planta de trituración (primaria, portátil, fija, primaria y secundaria, tipo de trituradoras, mallas y cribas etc.). Por lo general se obtiene gradaciones continuas similares a las de los agregados naturales triturados. En la Figura 1, se muestran las propiedades del concreto reciclado, comparadas con las propiedades del agregado natural.

Propiedad	Un	Agregado Reciclado	Agregado Convencional	Fuente
Absorción	%	3.9 -7.6%	0.4 - 2.6%	(Frondistou-Yannas, 1981),
	%	3 – 10%		(Cement Association of Canada, 2001)
	%	9.6%	1.9%	(León, 2001)
Densidad	tn/m ³	2.34 – 2.52	2.52 -2.67	(Frondistou-Yannas, 1981),
Peso Unitario	tn/m ³	1.140	1.458	(León, 2001)

Figura 1. Propiedades del agregado reciclado

Fuente: Romero, H (2004). Viabilidad Técnica y Económica del uso del concreto reciclado como agregado. P.22

2.2.2. Estabilización de Suelos con Cemento

El agregado de concreto reciclado al provenir de la trituración de concreto hidráulico contiene partículas de cemento remanente; en consecuencia en la presente investigación se estudia su posible comportamiento como una base estabilizada con cemento; la cual actualmente se elabora con la mezcla de agregados naturales y cemento Portland.

A continuación se realiza una breve explicación del proceso químico que se genera en el momento de la fabricación de una base estabilizada con cemento y los diferentes factores que influyen en su fabricación:

Proceso químico generado en la fabricación de una base estabilizada con cemento: La acción estabilizadora del cemento consta de varias etapas, la primera es la acción de la naturaleza fibrosa del silicato de calcio que se forma cuando los granos del cemento entran en contacto con el agua. Debido a esta reacción se forman masas de fibras minúsculas que se traban fuertemente unas con otras y con otros cuerpos. La solución formada por la mezcla cemento y agua reacciona con las partículas del suelo, reacción en la que los iones de calcio tienden a agrupar las partículas de suelo cargadas negativamente produciéndose su floculación por acción del calcio con la sílice y alúmina de tamaños coloidales produciéndose complejos compuestos de silicatos y aluminatos que aumentan lentamente la resistencia de la mezcla con el tiempo. A esta acción se la llama puzzolánica.

La reacción favorable suelo-cemento se ve muy impedida o nulificada cuando el primero contiene materia orgánica, pues los ácidos orgánicos poseen gran avidez por los iones de calcio que libera la reacción original del cemento y los captan, dificultando la acción aglutinante del propio cemento en los suelos gruesos o la estabilización de las partículas laminares en las arcillas. Por esta razón, las especificaciones de casi todos los países exigen que el contenido de materia orgánica en un suelo no sobrepase 1 a 2 %, en peso, si ha de ser considerado apropiado para ser estabilizado con cemento. Es también nociva la presencia de sulfatos u otras materias ávidas de agua por cuanto privan al cemento de la humedad necesaria para el cumplimiento de sus funciones. Pero salvo estos dos inconvenientes, los demás suelos pueden tratarse con cemento para mejorar su comportamiento mecánico, siendo la principal limitación la dificultad que puede presentarse para obtener un buen mezclado con las arcillas, motivo por el cual, en este caso, algunos recomiendan añadir previamente al suelo una pequeña cantidad de cal que facilite su manejo y pulverización y permita la posterior incorporación del cemento sin dificultad.

2.2.2.1. Factores que influyen en la mezcla de suelo cemento:

- Tipo de suelo: Tiene influencia principalmente por su composición química y su granulometría. Los suelos que pueden ser tratados con cemento con fines viales para obtener una estabilización económica se obtiene cuando el suelo no contiene partículas mayores de 7.5 cm o de un tercio del espesor de la capa tratada menos del 50% de él pasa el tamiz de 0.074 mm, el limite liquido es inferior a 40 y el índice plástico menor a 18.
- La cantidad de cemento: La dosificación de las mezclas de suelo-cemento es la cuestión fundamental, debido a que el cemento, es el elemento más costoso y fijar su proporción determina la factibilidad técnica de la estabilización, aparte las propiedades que se logren para la mezcla dependen también esencialmente de la cantidad de cemento que se emplee. El diseño de la mezcla se hace en el laboratorio siendo los ensayos que más se utilizan para ello, el de durabilidad llamada también humedecimiento y secado y el de compresión simple sobre probetas compactadas bajo condiciones especificadas. Con relación al primero, las especificaciones fijan los valores aceptables en función del tipo de suelo que se estabilice, mientras que con respecto al segundo, fueron los ingleses quienes establecieron el ensayo de compresión para el diseño, luego de encontrar que para su medio ambiente, una resistencia a la compresión de 17.5 Kg/cm² sobre probetas curadas a 15 °C durante 7 días, equivalía a los resultados del ensayo de humedecimiento y secado. En Colombia no se ha encontrado una relación consistente entre los resultados de los dos ensayos y se fija un valor mínimo de 21 Kg/cm² cuando se diseña con base a compresión. Si la mezcla de suelo-cemento se diseña mediante el ensayo de humedecimiento secado (norma de ensayo INVE- 807), el contenido de cemento debe ser tal, que la pérdida de peso de la mezcla compactada, al ser sometida al ensayo de durabilidad (humedecimiento-secado), no supere los siguientes límites de acuerdo con la clasificación que presente el suelo por estabilizar.

- Cantidad de agua que se agrega a la mezcla: La incidencia de la humedad en calidad de la mezcla tiene su mayor importancia durante la compactación. Una buena compactación, debe obtenerse para una alta densidad seca y ella sólo se obtiene cuando el suelo tiene la humedad óptima. En los diseños de suelo cemento se usa generalmente como ensayo de control el proctor normal en lugar del modificado, por cuanto aquel tiene una humedad óptima mayor, que proporciona la cantidad de agua adecuada para la correcta hidratación del cemento. Además, como la densidad máxima del ensayo normal es menor, se evita el riesgo de obtener compactaciones muy elevadas y resistencias demasiado altas que pueden ser inconvenientes.
- Compactación de la mezcla: Una mezcla satisfactoria de suelo cemento sólo puede obtenerse si se compacta adecuadamente. Las demoras entre las mezclas y la compactación producen también una disminución de la densidad que puede alcanzarse al compactar la mezcla y por lo tanto de su resistencia. Debe tenerse presente que las mezclas de laboratorio presentan una resistencia mayor que las que se elaboran en la obra.
- Curado de la mezcla compactada: La resistencia a la compresión de la mezcla de suelo-cemento, también se ve influida por su tiempo de curado. Experiencias de laboratorio indican que ésta aumenta cuando crece el tiempo de curado a que se somete la mezcla después de ser compactada.

2.2.3. Tiempo de curado del concreto

El curado es el proceso en el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor.

Esta definición pone en manifiesto dos cosas importantes: el cemento requiere de cierta cantidad de agua para hidratarse (en promedio 25% de la masa de cemento), sin

embargo para garantizar, en toda la masa de concreto, disponibilidad de agua de hidratación para el cemento es conveniente contar con una cantidad mayor, ya que la hidratación sólo es posible en un espacio saturado. Esto no es un inconveniente ya que aún un concreto de baja relación agua/ cementante, por ejemplo 0.45, tiene un 80% de agua por encima de lo requerido por el cemento para hidratarse, sin embargo la prematura desecación del concreto puede reducir el agua en la mezcla, especialmente en elementos laminares, a niveles donde la hidratación será incompleta. En la medida que haya suficiente agua el cemento continuará hidratándose hasta que todos los espacios de poros disponibles se vean colmados con los productos de hidratación o hasta que no haya más cemento para hidratar. La clave para el desarrollo tanto de la resistencia mecánica como de las características de durabilidad del concreto, no es tanto el grado de hidratación del cemento, como el grado en que los poros entre partículas de cemento se hayan llenado con los productos de hidratación, dicho de otra manera: la resistencia y la durabilidad dependen fundamentalmente del grado de porosidad de la matriz del concreto.

La Figura.2 se muestra el comportamiento micro de morteros con respecto a una variable muy importante como es la permeabilidad, propiedad directamente relacionada con la durabilidad y resistencia a un ambiente agresivo, en función del tiempo de curado.

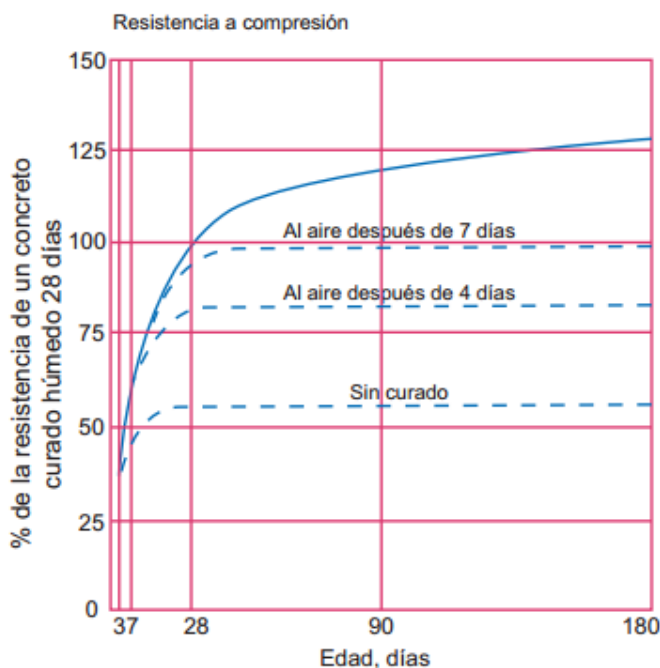


Figura 2. Resistencia a la compresión de cilindros de en función de la edad, para una variedad de condiciones de curado.
Fuente: (técnicas, 2009)

Entre mayor sea la relación agua/cemento mayor tiempo de curado es necesario para lograr el mismo nivel de permeabilidad. Esto permite concluir que el nivel de llenado de los poros con productos de hidratación depende no sólo del grado de hidratación del cemento sino del volumen inicial de poros en la pasta. Así un concreto con baja relación agua/ cemento requerirá un menor grado de hidratación para conseguir cierto nivel de porosidad deseado.

Para lograr la hidratación del cemento y que el concreto fragüe y endurezca, es necesario que la temperatura de la mezcla supere los 5°C.

2.2.4. Compactación de los suelos

La compactación es el proceso por el cual se consigue que el suelo expulse aire de sus poros y las partículas se reordenen en una estructura más densa, con muy escasa o nula modificación de su humedad. Para obtener un suelo compactado que forme una masa

resistente y poco deformable, el contenido de agua juega un papel muy importante. En la Figura 3 se observa que, para el procedimiento de compactación empleado, existe una “densidad seca máxima”, asociada a una “humedad óptima”.

Para una energía de compactación dada, es habitual hablar de la diferencia entre la humedad óptima y la realmente empleada en términos de % con respecto a la primera.

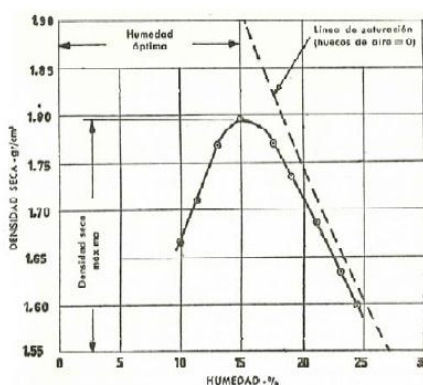


Figura 3. Curva de variación de la humedad y la densidad seca para un material
Fuente: (Ortuño, 1991)

2.3. Marco Conceptual.

- Agregados reciclados de concreto hidráulico: Son agregados producto de la trituración y clasificación de residuos de concreto obtenido ya sea de construcciones nuevas, demoliciones o concreto devuelto a la planta.
- Resistencia a la compresión: Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.
- Tiempo de curado del concreto: El curado es el proceso en el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continúa del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor.

- Humedad óptima: Es la humedad con la cual para el procedimiento de compactación empleado, existe una densidad seca máxima de un material.
- Capa granular (sub-base – base): Capa conformada por materiales granulares seleccionados tratados o No tratados. Comprendida entre la subrasante y las losas de concreto hidráulico o asfalto.

3. Metodología

3.2. Planteamiento de la Metodología

En este capítulo se presenta el procedimiento para determinar las características de un agregado de concreto reciclado, proveniente de una planta de trituración de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Bogotá. Del mismo modo, se detalla el procedimiento desarrollado para determinar la variación de la resistencia a la compresión de muestras elaboradas con dicho material, utilizando diferentes contenidos de humedad y sometiénolas a diferentes tiempos de curado en cámara húmeda.

Inicialmente se realizó la caracterización del material proveniente de la planta, seguido de la elaboración de las probetas que posteriormente fueron sometidas al ensayo de compresión simple.

3.3. Caracterización del Material

Durante el desarrollo experimental del tema de investigación, se utilizó un agregado de concreto reciclado procedente de una planta de trituración de residuos de construcción y demolición (Reciclados Industriales). Con el fin de evaluar y caracterizar el material, se ejecutaron los ensayos mostrados en la Tabla 1, cuyos procedimientos se describen de acuerdo a las normas emitidas por el INVIAS

Tabla 1:
Ensayos programados.

Ensayo	Norma	Objetivo	Número de repeticiones
Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado	I.N.V.E- 122-13	Determinación del contenido de humedad natural	1
Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos	I.N.V. E – 213 – 13	Determinación de la granulometría del material	2
Resistencia al desgaste en seco, 500 revoluciones (%)	I.N.V. E – 218 – 13	Determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados	2
Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio	I.N.V. E – 220 – 13	Calidad de los agregados que han de estar sometidos a la acción de los agentes atmosféricos	1
Determinación del límite líquido de los suelos	I.N.V. E – 125 – 13	Determinar el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en	1

el límite entre el estado líquido y el estado plástico

Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 13 Determinar el intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. 1

Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras I.N.V. E – 230 – 13 Determinación de los índices de aplanamiento y de alargamiento, de los agregados que se van a emplear en la construcción de carreteras. 1

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso I.N.V. E – 227 – 13 Determinar el porcentaje, en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos 1

Relaciones de humedad- peso unitario seco en los suelos (ensayo de compactación normal)	I.N.V. E – 141 – 13	Determinar la humedad optima y la densidad máxima seca del material	2
Densidad, densidad relativa(gravedad específica) y absorción del agregado fino	I.N.V. E – 222 – 13	Determinación de gravedades específicas bulk y aparente y absorción de agregados finos.	2
Densidad, densidad relativa(gravedad específica) y absorción del agregado grueso	I.N.V. E – 223 – 13	Determinación de gravedades específicas bulk y aparente y absorción de agregados gruesos.	2

Fuente: Instituto Nacional de Vías

3.4. Elaboración de las Probetas de Ensayo.

El agregado de concreto reciclado al provenir de la trituración de concreto hidráulico contiene partículas de cemento remanente que lo proveen de una propiedad auto-cementante. En consecuencia, con el fin de determinar dicha propiedad, el material se trató como un suelo cemento y una vez fue caracterizado se procedió a la elaboración de las probetas de ensayo con base en las normas propuestas en el Artículo 350.1 “SUELO-CEMENTO”, numeral 350.4.1.1.

A continuación se describen los pasos ejecutados para la elaboración de las probetas, las cuales, posteriormente fueron sometidas al ensayo de compresión simple:

3.4.1. Diseño del Molde

Para la elaboración de las probetas se diseñó un molde cuyas dimensiones correspondieran a las establecidas en la norma I.N.V. E – 614 –13 “RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO CEMENTO” (Método A) numeral 1.2:

- Diámetro: 101.6 mm (4.0")
- Altura: 116.4 mm (4.584")
- Relación de la altura al diámetro: 1.15.

En la Figura 4 se muestra el molde fabricado a partir de una tubería de PVC de diámetro de 4", la cual fue dividida longitudinalmente para facilitar la extracción de la probeta.



Figura 4. Molde fabricado a partir de una tubería de PVC de diámetro de 4".

Fuente: Autor

Con el fin de proveer estabilidad al molde en el momento de la compactación, se fabricó una base de madera. Así mismo, se le suministró a cada molde una abrazadera de acero. En la Figura 5, se observa el molde y la abrazadera de acero suministrada.



Figura 5: Base de madera y abrazadera para cada molde
Fuente: Autor

Adicionalmente, con el fin de enrasar la probeta se elaboró una extensión del tubo PVC de 4" de 4 cm. En la Figura 6 se observa el montaje final del molde.



Figura 6: Montaje final del molde.
Fuente: Autor.

3.4.2. Preparación del material

La preparación del material se basó en el procedimiento establecido en las normas I.N.V. E – 611 – 13 (método B) numeral 6.1 y I.N.V. E –612-13 “HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO CEMENTO” (Método B) numeral 6.1.1, 6.1.2, 6.1.4 y 6.1.5. Se omitieron los pasos descritos en el numeral 6.1.3 de la Norma I.N.V.E 612-13, debido a que en la presente investigación se buscaba determinar el comportamiento del material en su estado natural sin adicionarle cemento y el numeral mencionado exige la adición de este.

3.4.2.1. Contenido de humedad.

Una vez determinada la humedad óptima las probetas de ensayo fueron elaboradas para diferentes porcentajes de humedad (60%,80%, 120%,140%, 160% y 180% de la humedad óptima) con el fin de estudiar el comportamiento del material para diferentes contenidos de agua.

3.4.3. Moldeo de los especímenes de ensayo

Las probetas de ensayo fueron moldeadas con base en el procedimiento descrito en la norma I.N.V. E -612 - 13 numeral 6.2. El cual, consiste en elaborar la probeta mediante tres capas iguales, suministrado a cada capa 25 golpes con un martillo de 24.5 N con caída libre de 305mm (12"). En la Figura 7 se ilustra una probeta elaborada con el material de estudio en el molde diseñado.



Figura 7: Probeta elaborada en el molde diseñado con la energía de compactación propuesta en la Norma I.N.V. E -612 - 13 numeral 6.2

Fuente: Autor.

3.5. Tiempo de curado.

El procedimiento de curado de los especímenes se basó en la norma I.N.V. E – 613-13 “PREPARACIÓN Y CURADO DE PROBETAS DE SUELO CEMENTO PARA PRUEBAS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN EN EL LABORATORIO” numeral 9.

En la Figura 8 y 9 se muestra la cámara de curado utilizada en la investigación consistió en una caja fabricada en poliestireno expandible, cuyo interior fue cubierto con papeles humedecidos constantemente. Esta permanecía cubierta permanentemente con una tapa del mismo material, con el fin de que las probetas no perdieran humedad.



Figura 8: cámara de curado utilizada en la investigación
Fuente: Autor



Figura 9: Cámara húmeda fabricada cubierta con papel humedecido
Fuente: Autor.

Las probetas de ensayo elaboradas con los porcentajes de humedad establecidos en el numeral 6.3.2.1, se sometieron a 7, 14, 28 y 56 días en la cámara húmeda anteriormente descrita.

3.6. Numero de Probetas

En la Tabla 2 se presenta la matriz de ensayo, donde se establece el número de probetas fabricadas para cada tiempo de curado y contenido de humedad.

Tabla 2:
Matriz de ensayos

Número de especímenes	Contenido de humedad							Total	
	60% (HO)	80% (HO)	Humedad Optima (HO)	120 % (HO)	140% (HO)	160% (HO)	180% (HO)		
Tiempo de curado (Días)	7	3	4	4	4	4	3	3	25
	14	3	4	4	4	4	3	3	25
	28	3	4	4	4	4	3	3	25
	56	3	4	4	4	4	3	3	25
TOTAL									100

Fuente: Autor.

3.7. Ensayo de resistencia a la compresión.

Una vez cumplido el tiempo de curado correspondiente para cada probeta, se realizó el ensayo de compresión en la maquina universal, siguiendo el procedimiento descrito en la norma I.N.V. E –614 – 13 “RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO CEMENTO” numeral 5. Para cada probeta se utilizó una base de neopreno para la homogenización de esfuerzos. En la Figura 10 se ilustra el proceso de falla de una probeta de ensayo.

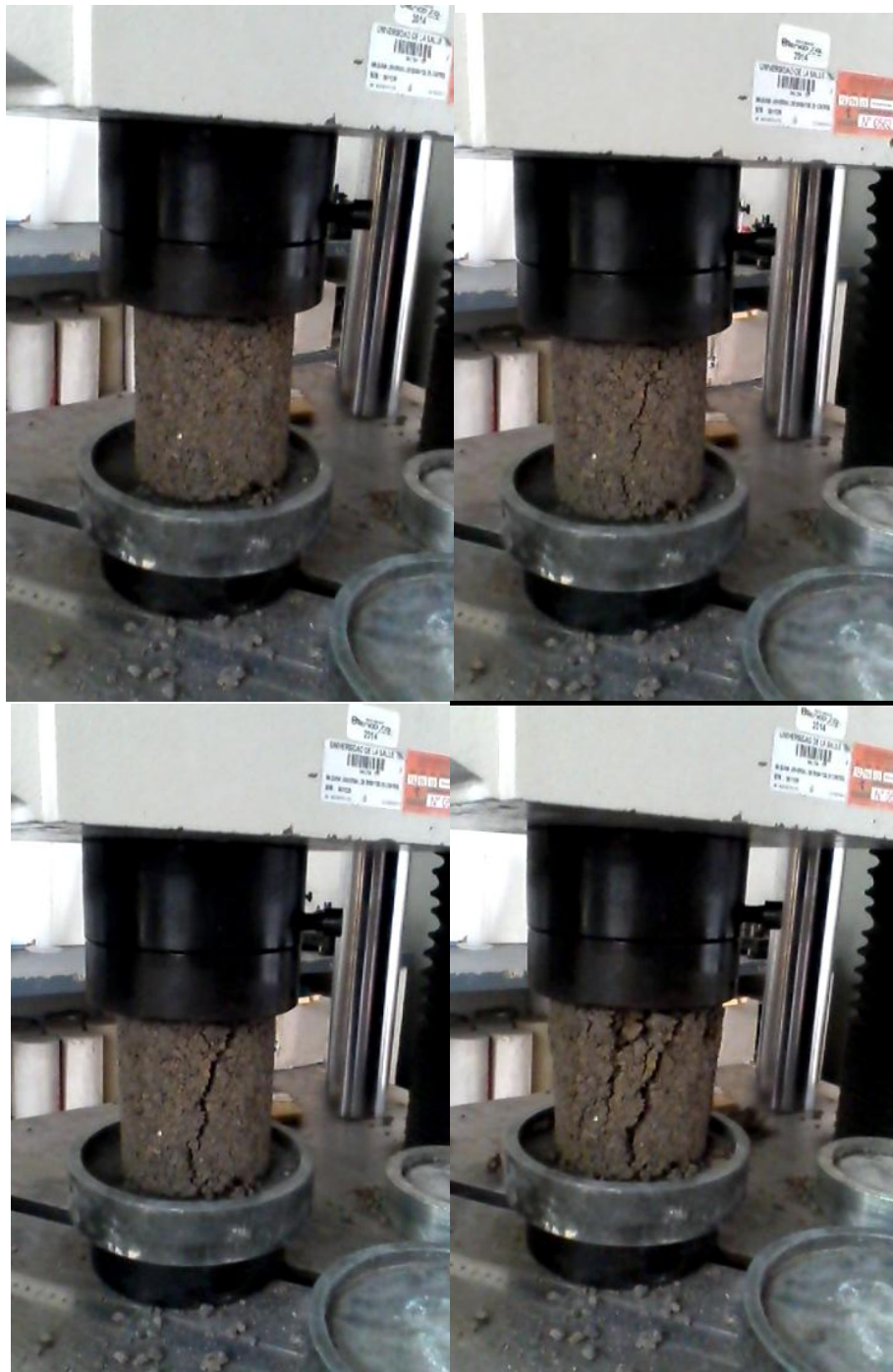


Figura 10: Proceso de falla de una probeta de ensayo.
Fuente: Autor

6.2. Diagrama de Flujo

En la Figura 11 se representa el diagrama de flujo de la metodología.

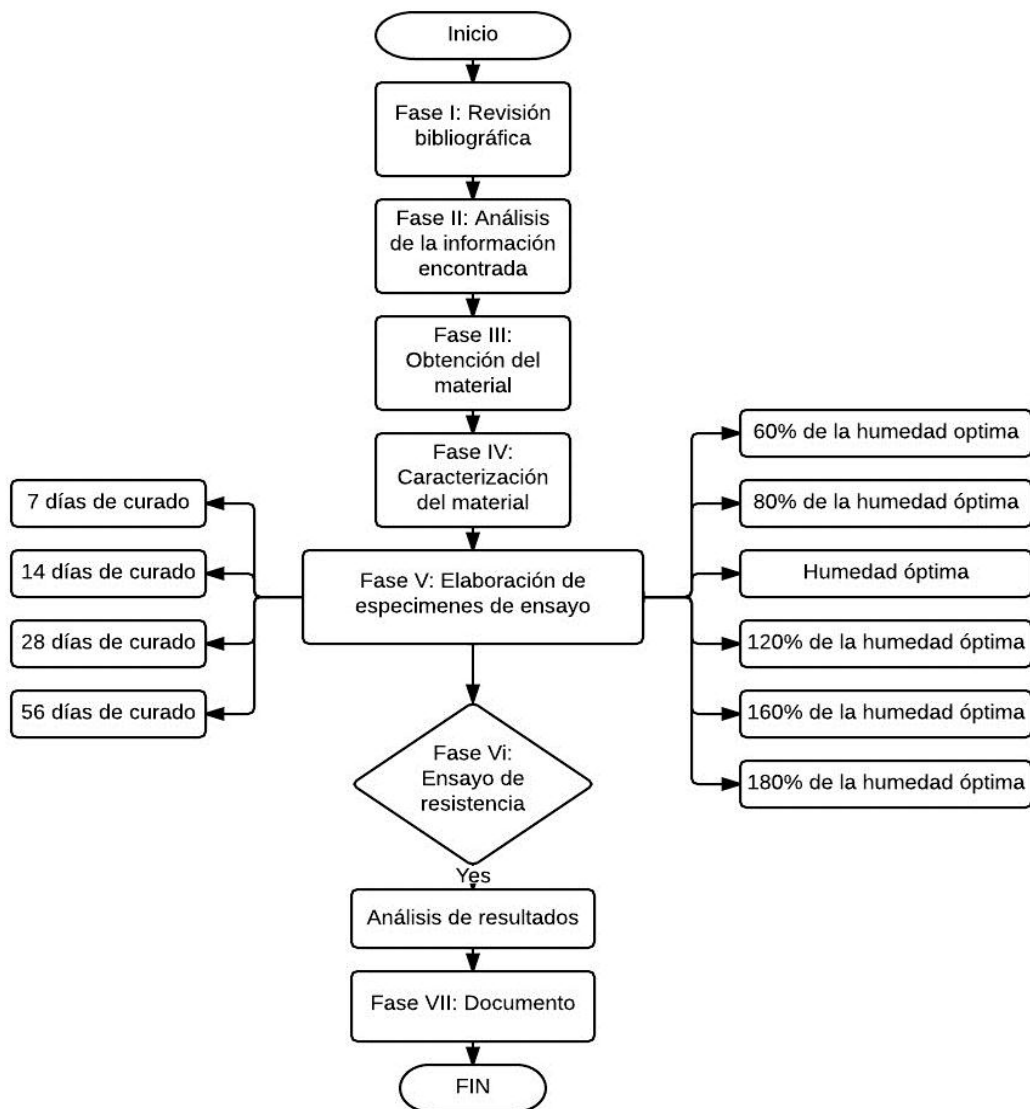


Figura 11: Diagrama de flujo de la metodología
Fuente: Autor.

4. Procesamiento de Datos y Análisis de Resultados

4.2. Ensayos de caracterización

Los resultados de los ensayos de caracterización mostrados a continuación, fueron realizados sobre el material en su estado natural, es decir sin ser modificado desde su salida de la planta. Los procedimientos de cálculo descritos fueron basados en las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) correspondientes a cada ensayo.

4.2.1. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado I.N.V.E- 122-13

El objetivo del ensayo fue determinar el contenido de humedad natural del agregado de concreto reciclado proveniente de la planta. Con este fin, se tomó una muestra inicial del material y se sometió a un periodo de secado en el horno a una temperatura de 110°C. El cálculo del porcentaje de humedad mostrado en la Figura 12; este se efectuó siguiendo el procedimiento de la norma I.N.V.E- 122-13.

$$w = \frac{w1 - w2}{w2 - wc} * 100$$

Figura 12: Calculo de contenido de agua del material.

Fuente: Norma I.N.V.E- 122-13, numeral 10.1, Ecuación 121.1

Dónde: W: Contenido de humedad; W1: Masa del recipiente con la muestra húmeda (gr); W2: Masa del recipiente con la muestra seca (gr), Wc: Masa del recipiente (gr)

En la Tabla 3, se presentan los resultados del ensayo de humedad. Reemplazando cada variable de la ecuación mostrada en la Figura 12, se obtuvo un porcentaje de humedad del 5%.

Tabla 3:
Resultados de ensayo de humedad

Humedad Natural	
Wc	106
W1	306
W2	296
W	5%

Fuente: Autor.

4.2.2. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (I.N.V. E – 213 – 13)

El objetivo del ensayo fue determinar la granulometría del material. Con el fin de rectificar los resultados se realizaron dos ensayos a diferentes porciones de material.

Inicialmente se tomó una muestra de un determinado peso, la cual, fue lavada sobre el tamiz número 200 y posteriormente se sometió a secado a una temperatura de 110°C. Una vez transcurridas 24 horas, se realizó el ensayo de granulometría pasando el material por una serie de tamices. Obtenidos los valores de las masas retenidas en cada tamiz, se calculó el porcentaje retenido, el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje que pasa.

Con el fin de comparar y calificar la granulometría, se calcularon los coeficientes de curvatura (Cc), y uniformidad (Cu), cuyos procedimientos de cálculo se ilustran en las Figura 13 y 14, respectivamente.

$$Cc = \frac{(D30)^2}{D60 * D10}$$

Figura 13: Cálculo del coeficiente de curvatura
Fuente: Montejo, A (2002) Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. P 50.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Figura 14: Cálculo del coeficiente de curvatura

Fuente: Montejo, A (2002) Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. P 50.

Donde D_{xx} se define como el diámetro de la apertura del tamiz por el cual pasa xx por ciento (%) del material

4.2.2.1. Primer Ensayo

En la Tabla 4 se presentan los resultados del primer ensayo de granulometría, cuyo peso inicial previo al lavado por el tamiz número 200 fue de 2808 gr.

Tabla 4:
Resultados de primer ensayo de granulometría

Tamiz		Peso retenido (gr)	% Retenido	% retenido acumulado	% que pasa
Nº	mm				
3/4"	19	0	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,5	5	0,18%	0,18%	99,82%
3/8"	9,5	151	5,38%	5,56%	94,44%
Nº4	4,75	1042	37,11%	42,66%	57,34%
Nº8	2,36	681	24,25%	66,92%	33,08%
Nº10	2	9	0,32%	67,24%	32,76%
Nº 12	1	170	6,05%	73,29%	26,71%
Nº16	1,18	19	0,68%	73,97%	26,03%
Nº20	0,85	112	3,99%	77,96%	22,04%
Nº30	0,6	118	4,20%	82,16%	17,84%
Nº40	0,425	124	4,42%	86,57%	13,43%
Nº50	0,3	123	4,38%	90,95%	9,05%
Nº60	0,25	70	2,49%	93,45%	6,55%
Nº80	0,18	76	2,71%	96,15%	3,85%
Nº100	0,15	48	1,71%	97,86%	2,14%
Nº200	0,075	50	1,78%	99,64%	0,36%
Fondo		10	0,36%	100,00%	0,00%

Fuente: Autor

En la Figura 15 se observa la gráfica que relaciona los valores de los tamaños de los tamices con el porcentaje que pasa, presentados en la Tabla 4.

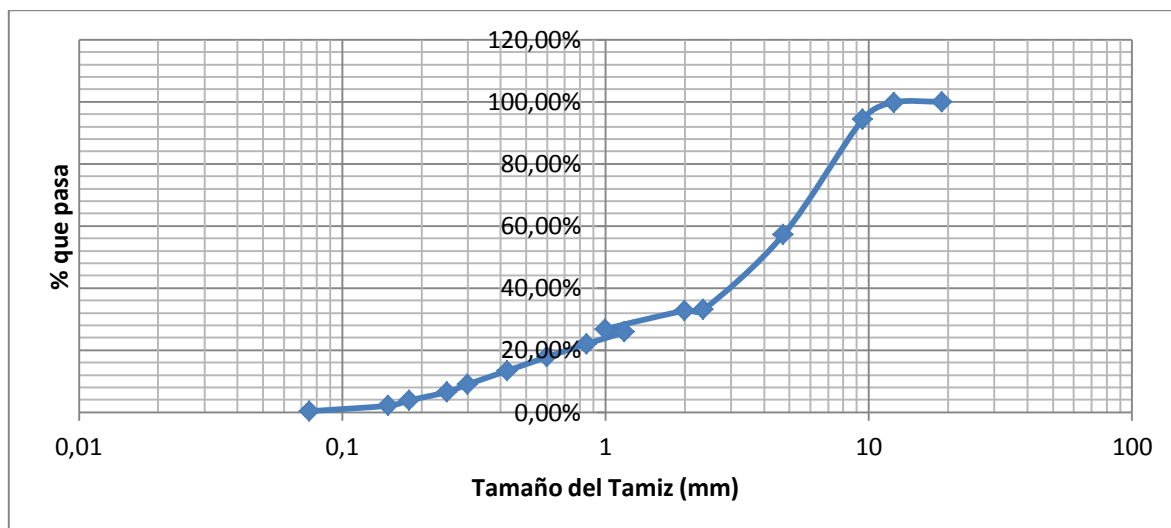


Figura 15: Curva granulométrica primer ensayo
Fuente: Autor

Aplicando ecuaciones mostradas en las Figuras 13 y 14 se obtuvo un coeficiente de curvatura (C_c) de 1,46 y un coeficiente de uniformidad (C_u) de 14,28. Según la clasificación unificada de Casagrande, el material se define como una arena bien gradada (SW), debido a que se cumplen los siguientes requisitos: $1 < C_c < 3$ y $C_u > 6$ (Montejo, A. 2002. p 50).

4.2.2.2. Segundo ensayo

En la Tabla 5 se presentan los resultados del segundo ensayo de granulometría, cuyo peso inicial previo al lavado por el tamiz número 200 fue de 5850 gr.

Tabla 5:

Valores obtenidos para el segundo ensayo de granulometría.

Tamiz		Peso retenido	% retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
Nº	mm				
3/4"	19	0	0%	0%	100%
1/2"	12,5	79	1%	1%	99%
3/8"	9,5	493	8%	10%	90%
Nº4	4,75	2059	35%	45%	55%
Nº8	2,36	1287	22%	67%	33%
Nº16	1,18	417	7%	74%	26%
Nº30	0,6	592	10%	84%	16%
Nº50	0,3	283	5%	89%	11%
Nº100	0,15	455	8%	96%	4%
Nº200	0,075	172	3%	99%	1%
Fondo		13	0%	100%	0%

Fuente: Autor

En la Figura 16 se observa la gráfica que relaciona los valores de los tamaños de los tamices con el porcentaje que pasa, presentados en la Tabla 5.

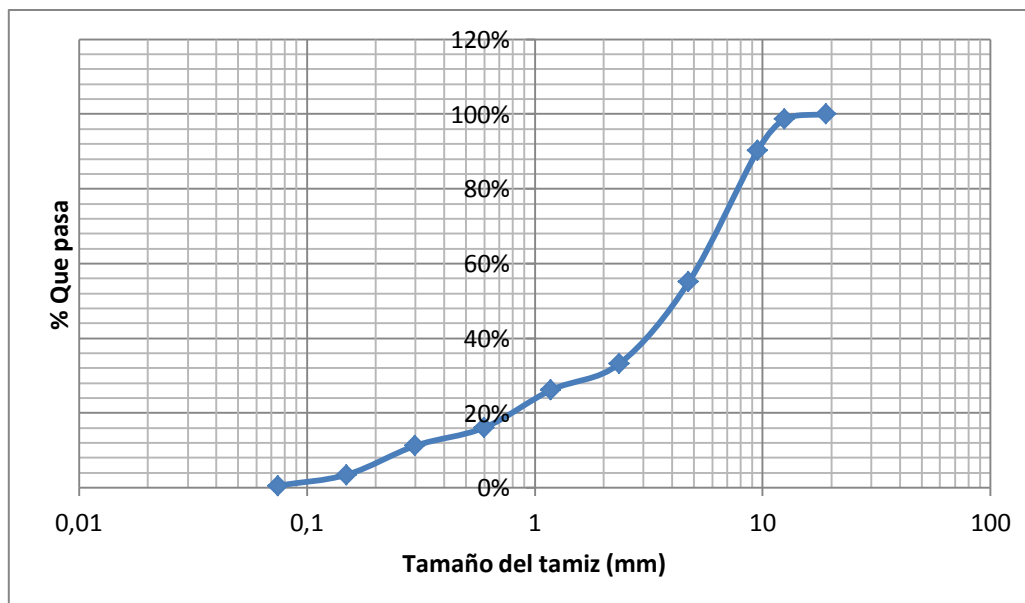


Figura 16: Curva granulométrica Segundo ensayo

Aplicando ecuaciones mostradas en las Figuras 13 y 14 se obtuvo un coeficiente de curvatura (Cc) de 2,95 y un coeficiente de uniformidad (Cu) de 20. Según la clasificación unificada de Casagrande, el material se define como una arena bien gradada (SW), debido a que se cumplen los siguientes requisitos: $1 < Cc < 3$ y $Cu > 6$ (Montejo, A. 2002. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. P 50).

A partir de las curvas granulométricas mostradas en las Figuras 15 y 16, se define un tamaño máximo de $\frac{1}{2}$ " , ya que el material pasa 100% por el tamiz de $\frac{3}{4}$ " y se retiene menos del 5% en la malla de $\frac{1}{2}$ " (Ingeniería Civil Proyectos y apuntes)

4.2.3. Resistencia al Desgaste en Seco, 500 Revoluciones (%) I.N.V. E – 218 – 13

El objetivo del ensayo fue determinar la resistencia al desgaste del agregado de concreto reciclado. Con el fin de rectificar los resultados se realizaron dos ensayos a diferentes porciones de material. Cuyos resultados se presentan en las Tablas 6 y 7.

De acuerdo a la curva granulométrica del material para cada ensayo se tomó inicialmente una muestra de material siguiendo la granulometría C indicada en la Norma I.N.V.E-218-13 Tabla 218-1. Es decir, 2500 gr de material pasa tamiz $\frac{1}{4}$ " retenido tamiz N°4 y 2500 gr material pasa tamiz N°4 y retenido tamiz $\frac{3}{8}$ ". Una vez separadas las muestras, estas fueron sometidas a lavado y se introdujeron en el horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas.

Una vez pasadas las 24 horas, las muestras se sometieron al ensayo de desgaste con 500 revoluciones, posteriormente fueron lavadas en el tamiz N°12 e introducidas en el horno a una temperatura de 110 °C. Finalmente se tomó la masa de la muestra secada al horno.

En la Figura 17 se presenta la ecuación utilizada para determinar el desgaste del material.

$$\% \text{ de Desgaste} = \frac{P1 - P2}{P2} * 100$$

Figura 17: Calculo porcentaje de desgaste del material.

Fuente: Norma I.N.VE- 218-13, numeral 7.1, Ecuación 218.1

Dónde, P1: Masa de la muestra antes del ensayo; P2: Masa de la muestra seca, previo lavado sobre el tamiz N°12.

Tabla 6:
Resultados del primer ensayo de desgaste

Dureza INVE 218	
Masa seca de la muestra antes del ensayo (gr)	5000
Masa seca de la muestra lavada por el tamiz N° 12 (gr)	3996
% de desgaste	20%

Fuente: Autor

Tabla 7:
Resultados del primer ensayo de desgaste

Dureza INVE 218	
Masa seca de la muestra antes del ensayo (gr)	5000
Masa seca de la muestra lavada por el tamiz N° 12 (gr)	3593
% de desgaste	28%

Fuente: Autor.

Según los resultados obtenidos en las Tablas 6 y 7, se obtuvo para el primer ensayo un desgaste del material del 20% y para el segundo un desgaste del 28%. Al promediar los resultados se tiene un 24% de desgaste. Para una grava natural su desgaste oscila entre un 28% a 38 % (León & Ramirez, 2010), lo que demuestra que el material tiene un comportamiento similar al de una grava natural. Así mismo, esta propiedad fue comparada con los requisitos para un afirmado y una base granular (Ver numerales 4.3.1 y 4.3.3) se comprobó que cumple con los requerimientos que se piden para un agregado.

4.2.4. Determinación del Límite Líquido de los Suelos I.N.V. E – 125 – 13

El objetivo del ensayo fue determinar el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. En el caso del agregado de concreto reciclado al ser una arena el resultado fue *No líquido*.

4.2.5. Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V. E – 126 – 13

El objetivo del ensayo es determinar el intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. En el caso del agregado de concreto reciclado al ser una arena el resultado fue *No plástico*.

4.2.6. Índices de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras I.N.V. E – 230 – 13

El objetivo de este ensayo fue la determinación de los índices de aplanamiento y alargamiento del agregado de concreto reciclado. El índice de aplanamiento se determinó utilizando un calibrador de aplanamiento, donde se contaron las partículas que pasaron por las aperturas determinadas, obteniendo así, un índice de aplanamiento de 22.29%. Para el caso del índice alargamiento se contaron las partículas que quedaron retenidas en el calibrador de alargamiento, obteniendo un índice de 11,94%. En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos para hallar los índices de aplanamiento y alargamiento.

Tabla 8:
Resultados obtenidos en la determinación del índice de aplanamiento y alargamiento

Aplanamiento						
Tamaño del agregado		Peso de la muestra	Peso de partículas aplanadas que pasaron	% En peso de partículas aplanadas	% Retenido gradación original	Promedio de partículas aplanadas
3/4"	1/2"	14	6	43%	0,30%	0,13%
1/2"	3/8"	143	35	24%	1,75%	0,43%
3/8"	1/4"	347	67	19%	3,35%	0,65%
Σ					5,40%	1,20%
Índice de aplanamiento total					22,29%	
Alargamiento						
Tamaño del agregado		Peso de la muestra	Peso de partículas Alargadas retenidas	% En peso de partículas aplanadas	% Retenido gradación original	Promedio de partículas aplanadas
3/4"	1/2"	14	0	0%	0,00%	0,00%
1/2"	3/8"	143	6	4%	0,30%	0,01%
3/8"	1/4"	347	45	13%	2,25%	0,29%
Σ					2,55%	0,30%
Índice de alargamiento total					11,94%	

Fuente: Autor.

4.2.7. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso I.N.V. E – 227

– 13

El objetivo del ensayo fue determinar el porcentaje de caras fracturadas de una muestra de agregado de concreto reciclado. Se obtuvo un 96% de caras fracturadas debido a que se trata de un material cuyo origen es la trituración de un concreto. En la Tabla 9 se presentan los valores obtenidos para hallar el porcentaje de caras fracturadas.

Tabla 9:

Resultados obtenidos en la determinación del porcentaje de caras fracturadas

Caras fracturadas INVE 227	
Masa de la muestra	1062
Masa de partículas fracturadas con una cara fracturada	41
Masa de partículas con 2 o más caras fracturadas	1017
Σ	1058
Q	0
N	0
% de caras fracturadas (una cara)	4%
% de caras fracturadas (2 o más caras)	96%

Fuente: Autor.

4.2.8. Determinación de la Humedad Óptima del Material

Al ser material de estudio un agregado de concreto reciclado, este contiene partículas de cemento remanente, por esta razón se estudió la variación de la humedad óptima ensayando el material como un agregado natural y a su vez como un suelo-cemento.

Con base en lo anterior, inicialmente se determinó la humedad óptima siguiendo el procedimiento descrito en la Norma I.N.V. E – 141 – 13, tratando el material como un agregado natural. Posteriormente, se realizó otro ensayo basado en el procedimiento establecido en las normas I.N.V. E – 611 – 13 (método B) numeral 6.1 y I.N.V. E –612-13 “HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO CEMENTO” (Método B) numeral 6.1.1, 6.1.2, 6.1.4 y 6.1.5. Se omitieron los pasos descritos en el numeral 6.1.3 de la Norma I.N.V.E 612-13, debido a que en la presente investigación se buscaba determinar el comportamiento del material en su estado natural sin adicionarle cemento y el numeral mencionado exige la adición de este.

En los dos procedimientos citados en el párrafo anterior, se exige la misma energía de compactación, la cual consiste en elaborar la probeta mediante tres capas iguales, suministrado a cada capa 25 golpes con un martillo de 24.5 N con caída libre de 305mm (12”). A continuación se presentan los resultados obtenidos para los dos ensayos.

4.2.8.1. Relaciones de humedad- peso unitario seco en los suelos (ensayo de compactación normal) I.N.V. E – 141 – 13

El objetivo del ensayo fue determinar la humedad óptima y la densidad máxima seca del material tratándolo como un agregado natural, con este fin se realizaron siete puntos, donde se aumentó progresivamente el porcentaje de agua a toda la masa del material; obteniendo así, una humedad óptima del 12% y una densidad máxima seca del 1.82 gr/cm³. En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos. En la Tabla 10 se presentan los valores del molde donde fue realizado el ensayo.

Tabla 10:
Dimensiones del molde- Ensayo I.N.V. E – 141 – 13

Molde	
Altura (cm)	11,5824
Diámetro externo (cm)	11,3588
Espesor (cm)	0,6451
Diámetro interno (cm)	10,0686
Volumen (cm ³)	922,203182
Peso del molde (gr)	2009

Fuente: Autor

Tabla 11:
Resultados- Ensayo I.N.V. E – 141 – 13

Ensayo de Proctor							
% de humedad de moldeo	3%	5%	7%	9%	11%	13%	15%
Número de capas	5	5	5	5	5	5	5
Número de golpes por capa	25	25	25	25	25	25	25
Agua adicional (cm ³)	90	150	210	270	330	390	450
Peso húmedo de la muestra + molde (gr)	3689	3735	3836	3851	3942	3951,2	3817
Peso húmedo de la muestra (gr)	1680	1726	1827	1842	1933	1942,2	1808
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1,82	1,87	1,98	2,00	2,1	2,11	1,96
Densidad seca (gr/cm ³)	1,67	1,69	1,74	1,74	1,8	1,82	1,69

Fuente: Autor

En la Figura 18 se presenta la gráfica obtenida con los resultados obtenidos en la Tabla 11.

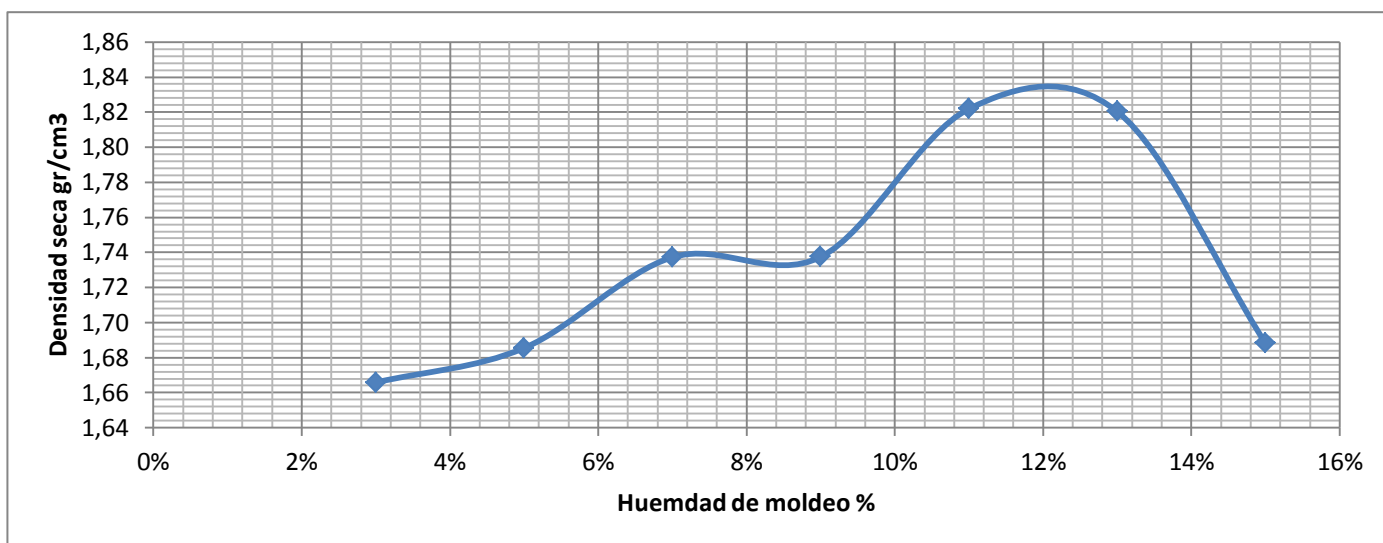


Figura 18: Grafica de Resultados- Ensayo I.N.V. E – 141 – 13

Fuente: Autor.

4.2.8.2. Resultados Norma I.N.V. E – 611 – 13 (método B) numeral 6.1 y I.N.V. E –612-13 “HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO CEMENTO” (Método B) numeral 6.1.1, 6.1.2, 6.1.4 y 6.1.5

El objetivo del ensayo fue determinar la humedad óptima y la densidad máxima seca del material tratando el material como un suelo-cemento. Con este fin se realizaron tres puntos, donde el material retenido en el tamiz N°4 se saturó previamente en agua potable y se secó superficialmente. En el caso de la sección del material que pasó el tamiz N°4 se aumentó progresivamente el porcentaje de agua según su masa.

Se obtuvo una humedad óptima del 12% y una densidad máxima seca del 1.52 gr/cm³. En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos. En la Tabla 12 se presentan los valores del molde donde fue realizado el ensayo.

Tabla 12:
Dimensiones del molde utilizado para el Ensayo I.N.V. E – 611 – 13 y I.N.V. E – 612 – 13

Altura (cm)	12,78
Diámetro externo (cm)	11,56
Espesor (cm)	0,68
Diámetro interno (cm)	10,09
Volumen (cm ³)	1022,26
Peso del molde (gr)	2009,50

Fuente: Autor

Tabla 13:
Resultados Ensayo I.N.V. E – 611

Ensayo de Proctor			
% de humedad de moldeo	10%	12%	14%
Número de capas	3	3	3
Número de golpes por capa	25	25	25
Agua adicional (cm ³)	120	144	168
Peso húmedo de la muestra + molde (gr)	3684,5	3791	3698
Peso húmedo de la muestra (gr)	1675	1781,5	1688,5
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1,64	1,74	1,65
Densidad seca (gr/cm ³)	1,43	1,52	1,44

En la Figura 19 se presenta la gráfica obtenida con los resultados obtenidos en la Tabla 13.

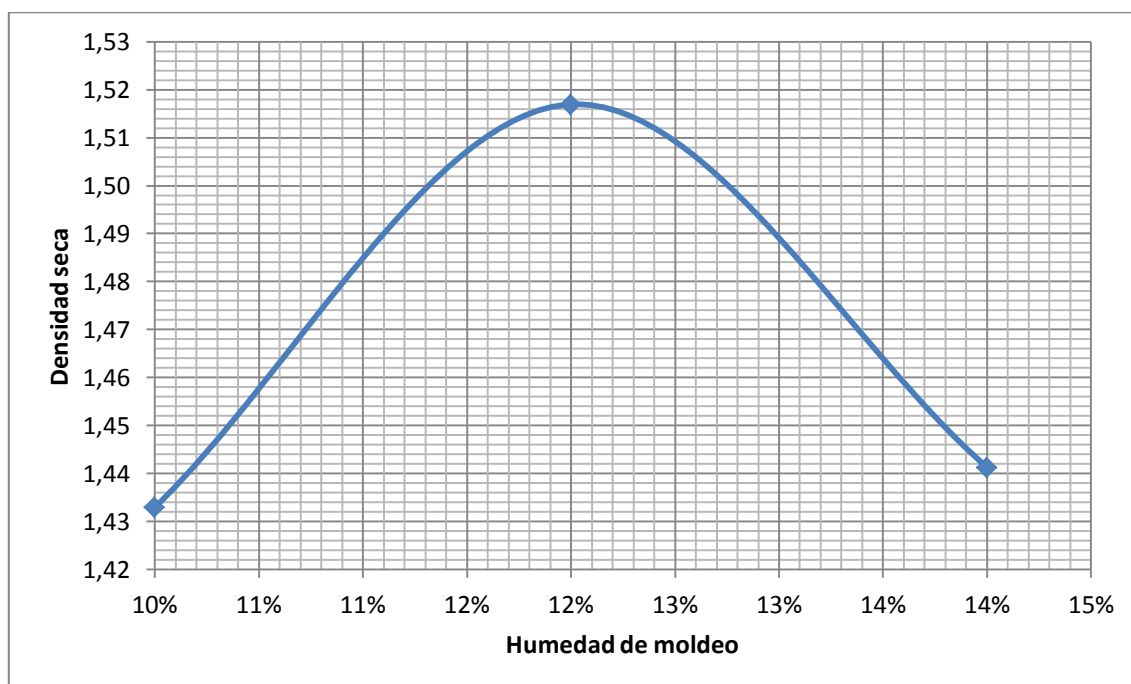


Figura 19: Gráfica de Resultados Ensayo I.N.V. E – 611

Fuente: Autor.

Según resultados de los ensayos mostrados en las Tablas 11 y 13, se observa que el material tuvo la misma humedad óptima en los dos casos estudiados.

4.2.9. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Fino I.N.V. E – 222 – 13

El objetivo de este ensayo fue la determinación de la gravedad específica y la absorción de la sección fina del material. Con el fin de rectificar los resultados se realizaron dos ensayos a diferentes porciones de material.

Cada ensayo se realizó con base en el procedimiento descrito en la norma I.N.V.E-222-13, mediante el método gravimétrico. Inicialmente, la muestra se sometió a secado al horno a una temperatura de 110°C. Posteriormente, se sumergió en agua potable durante un periodo de 24 horas; las cuales una vez cumplidas, la muestra fue secada superficialmente con aire tibio, con el fin de hallar la masa saturada superficialmente seca. Finalmente, se introdujo en el picnómetro con agua y se eliminó el aire entre los poros por medio de ebullición.

A continuación se presentan en las Tablas 14 y 15 los resultados obtenidos para cada ensayo. Para el primer ensayo se obtuvo una absorción del 12 % y una densidad aparente de 2675,93 Kg/m³, para el segundo se obtuvo una absorción del 10% y una densidad aparente de 2776,48 Kg/m³.

Tabla 14:

Resultados primer ensayo de absorción de finos Norma I.N.V.E 222-13

A: Masa al aire de la muestra seca al horno (gr)	448
B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua (gr)	657
C: Masa total de picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua (gr)	938
S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (usada para hallar la densidad y la densidad relativa en el procedimiento gravimétrico o la absorción en ambo procedimientos) (gr)	500
Densidad relativa (gravedad específica) SH	2,05
Densidad relativa (gravedad específica) SSS	2,28
Densidad relativa aparente (gravedad especifica aparente)	2,68
Densidad (SH) Kg/m3	2040,55
Densidad SSS (Kg/m3)	2277,85
Densidad aparente (Kg/m3)	2675,93
Absorción (%)	12%

Fuente: Autor.

Tabla 15:

Resultados segundo ensayo de absorción de finos Norma I.N.V.E 222-13

A: Masa al aire de la muestra seca al horno (gr)	437
B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua (gr)	640
C: Masa total de picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua (gr)	920
S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (usada para hallar la densidad y la densidad relativa en el procedimiento gravimétrico o la absorción en ambo procedimientos) (gr)	480
Densidad relativa (gravedad específica) SH	2,19
Densidad relativa (gravedad específica) SSS	2,40
Densidad relativa aparente (gravedad especifica aparente)	2,78
Densidad (SH) Kg/m3	2179,54
Densidad SSS (Kg/m3)	2394,48
Densidad aparente (Kg/m3)	2776,48
Absorción (%)	10%

Fuente: Autor.

De acuerdo a los resultados expuestos en las Tablas 14 y 15, la absorción de la sección fina del material oscila entre un 10% a 12%, comparándolas con las de un material natural, cuya absorción oscila en un rango de 1.2%-2% (GONZÁLEZ SALCEDO, 2008), el agregado reciclado tiene una absorción mayor, esto puede deberse al cemento

remanente impregnado en las partículas, el cual genera que el agua se absorbida en mayor proporción.

4.2.10. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Grueso I.N.V. E – 223 – 13

El objetivo de este ensayo fue la determinación de la gravedad específica y la absorción de la sección gruesa del material. Con el fin de rectificar los resultados se realizaron dos ensayos a diferentes porciones de material.

Inicialmente la muestra se sometió a secado al horno a una temperatura de 110°C. Una vez se culminó el tiempo de secado, se sumergió en agua potable durante un periodo de 24 horas y fue secada superficialmente para hallar la masa saturada superficialmente seca. Finalmente se introdujo la muestra una batea con agua para hallar su peso sumergido y se sometió a secado al horno.

A continuación, se presentan en las Tablas 16 y 17 los resultados obtenidos para el primer y segundo ensayo, respectivamente. Para el primer ensayo se obtuvo una absorción del 12 % y una densidad aparente de 2675,93 Kg/m³. Para el segundo se obtuvo una absorción del 10% y una densidad aparente de 2776,48 Kg/m³.

Tabla 16:
Resultados primer ensayo de absorción de gruesos Norma I.N.V.E 223-13

Peso superficialmente seco	
Peso superficialmente seco (gr)	1413
Peso seco	
Peso canasta sin sumergir	1191
Peso canasta sumergida	1036
Material sumergido + canasta	1853,5
Peso sumergido	817,5
Peso seco	
Peso seco	1291,5

Gravedades específicas y absorción	
Gravedad específica bulk	2,17
Gravedad específica bulk SSS	2,37
Gravedad específica aparente	2,72
% de Absorción	9%

Fuente: Autor.

Tabla 17:

Resultados segundo ensayo de absorción de gruesos Norma I.N.V.E 223-13

Peso superficialmente seco	
Peso superficialmente seco (gr)	2126
Peso seco	
Peso canasta sin sumergir	1204
Peso canasta sumergida	1025,5
Material sumergido + canasta	2250
Peso sumergido	1224,5
Peso seco	
Peso seco	1996
Gravedades específicas y absorción	
Gravedad específica bulk	2,21408763
Gravedad específica bulk SSS	2,35829174
Gravedad específica aparente	2,58716785
% de Absorción	7%

Fuente: Autor.

De acuerdo a los resultados expuestos en las Tablas 16 y 17, la absorción de la sección fina del material oscila entre un 7% a 9%, comparándolas con las de un material natural, cuya absorción oscila en un rango de 2.10%-3.8% (GONZÁLEZ SALCEDO, 2008), el agregado reciclado tiene una absorción mayor, esto, al igual que la sección fina, puede deberse al cemento remanente impregnado en las partículas, el cual genera que el agua se absorbida en mayor proporción.

4.2.11. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio I.N.V. E – 220 – 13

El ensayo tuvo como objetivo hallar la calidad de los agregados al estar sometidos a la acción de los agentes atmosféricos. Este fue realizado para una muestra de agregado de concreto reciclado, siguiendo el procedimiento descrito en la norma I.N.V.E-220-13. Dónde, inicialmente se separaron masas determinadas por medio de tamizado y se sumergieron en una solución de sulfato de magnesio durante 18 horas. Posteriormente, las muestras se sometieron a secado en el horno durante 4 horas y se sumergieron de nuevo. Esta operación se repitió durante cinco ciclos. Los cuales, una vez cumplidos, las muestras fueron lavadas y secadas hasta masa constante a una temperatura de 110°C. Finalmente cada muestra fue tamizada en los tamices descritos en la norma y se tomó el peso retenido para cada tamiz.

En la Tabla 18 se presentan los resultados del examen cuantitativo del ensayo. El porcentaje de pérdida fue del 10%. El examen cualitativo, no se realizó debido a que este se exige para partículas con tamaños mayores de $\frac{3}{4}$ ".

Tabla 18:

Resultados Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio I.N.V. E – 220 – 13.Examen cuantitativo

Retenido Tamiz	Peso de la muestra previa al ensayo	Peso de la muestra después del ensayo	% de pérdida
3/8"	1000	995	0,5
Nº 4	300	297	1,0
Nº8	100	98	2
Nº 16	100	97	3
Nº 30	100	99	1
Nº 50	100	97	3
Porcentaje de pérdida			10,5

Fuente: Autor.

4.3. Evaluación de los Resultados para un Afirmado, una Sub-Base Granular y una Base Granular

Esta sección tiene como objetivo comprobar si el material puede ser usado como un afirmado, una sub-base granular y/o una base granular. Con este fin, se compararon los resultados obtenidos en la caracterización del material, con los requisitos expuestos en los artículos 311-13, 320-13 y 330-13 emitidos por el INVIAS. Para el análisis de la granulometría se tomó la curva granulométrica del primer ensayo, debido a que esta se elaboró con mayor número de tamices, proporcionando así, una mayor precisión en los resultados.

4.3.1. Evaluación del Material para un Afirmado

4.3.1.1. Granulometría del material

En el análisis a continuación, se compara la curva granulométrica escogida, con las franjas granulométricas del material de afirmado expuestas en el artículo 311-13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (Ver Figura 20).

Tabla 311 - 2. Franjas granulométricas del material de afirmado

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 ½"	1"	¾"	⅜"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA								
A-38	100	-	80-100	60-85	40-65	30-50	13-30	9-18
A-25	-	100	90-100	65-90	45-70	35-55	15-35	10-20
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %

Figura 20: Tabla 311-3. Franjas granulométricas del material de afirmado.
Fuente: INVIAS (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Capítulo 3-Afirmados, Sub-bases y Bases. P. 311-1.

La comparación de los valores de la curva granulométrica del material, presentada en la Figura 14, con las franjas granulométricas de las gradaciones propuestas por el INVIAS, mostradas en la Figura 20, se exponen en la Tabla 19. Adicionalmente, en las Figuras 21 y 22 se presenta la curva granulométrica del material confrontada con la Franja de la gradación A-38 y A-25, respectivamente.

Tabla 19:

Comparación de la curva granulométrica del material con un afirmado.

Tamices	Material	gradación A-38		gradación A-25		
		% Que pasa		% Que pasa		
mm	U.S. Estándar	% que Pasa	Curva Gruesa	Curva Fina	Curva Gruesa	Curva Fina
25	1"		100%		100%	
19	3/4"	100,00%	80%	100%	90%	100%
9,5	3/8"	94,44%	60%	85%	65%	90%
4,75	N°4	57,34%	40%	65%	45%	70%
2	N°10	32,76%	30%	50%	35%	55%
0,425	N°40	13,43%	13%	30%	15%	35%
0,075	N°.200	0,36%	9%	18%	10%	20%

Fuente: Autor.

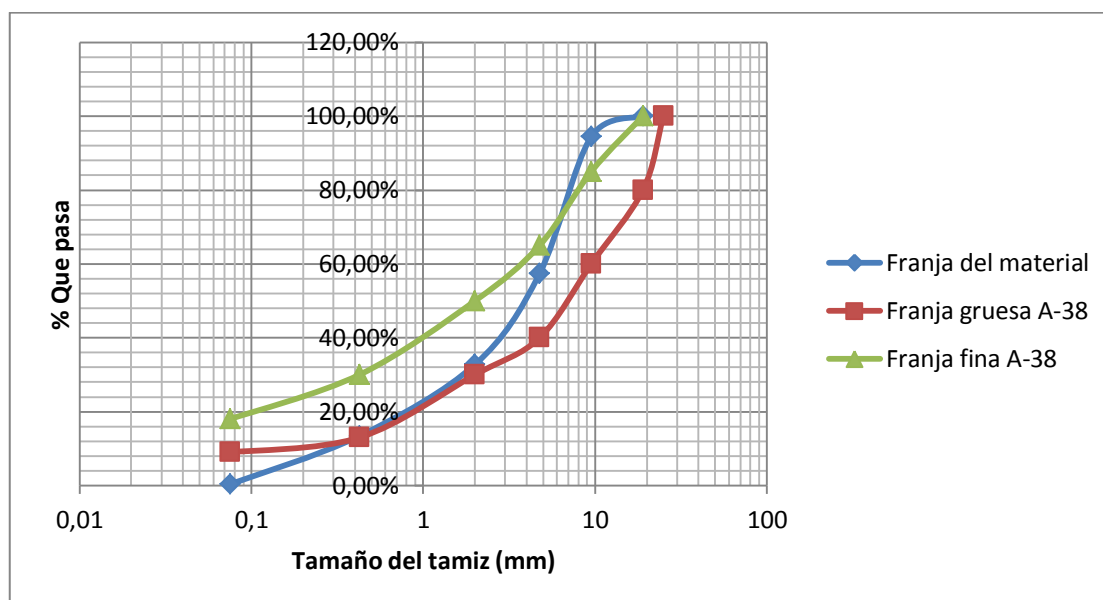


Figura 21: Confrontación de la curva granulométrica del material con la franja granulométrica de la gradación A-38 de un afirmado.

Fuente: Autor.

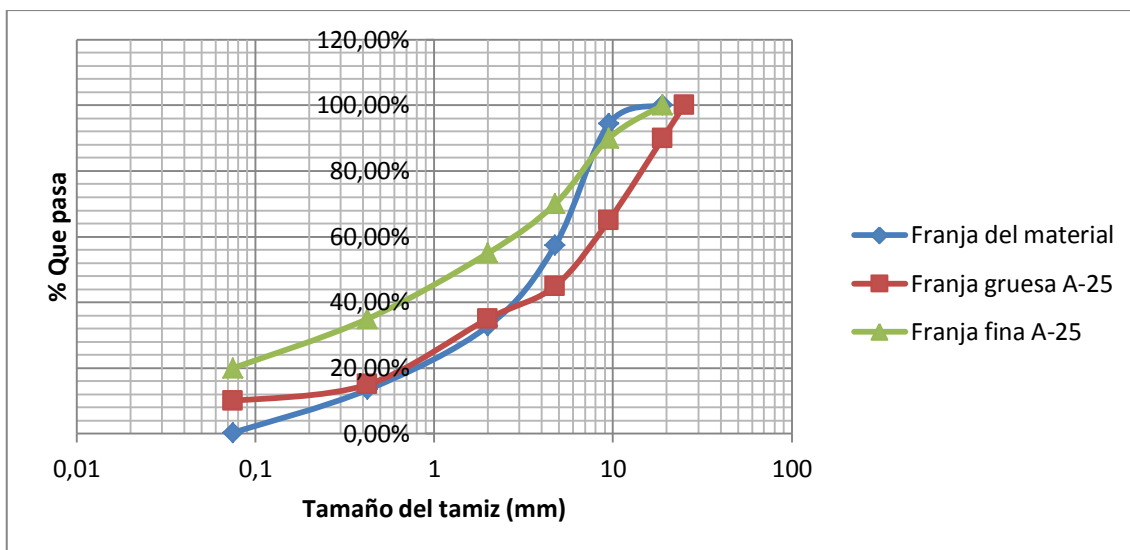


Figura 22: Confrontación de la franja granulométrica del material con la franja granulométrica de la gradación A-25 de un afirmado.

Fuente: Autor.

- Franja granulométrica de la gradación A-38: Al comparar los valores de la curva granulométrica del material con la Franja granulométrica de la gradación A-38 (Tabla 19 y Figura 21) se observa que para el tamiz 3/8" la curva del material sobrepasa a la curva fina en un 10%, así mismo para el tamiz N°200 el porcentaje de finos del material es bajo en comparación a los porcentajes requeridos.
- Franja granulométrica de la gradación A-25: Al comparar los valores de la curva granulométrica del material con la Franja granulométrica de la gradación A-25 (Tabla 19 y Figura 22) se observa que para el tamiz 3/8" la curva del material sobrepasa a la curva fina en un 5%, así mismo para el tamiz N°200 el porcentaje de finos del material es bajo en comparación a los porcentajes requeridos.

De acuerdo a lo anterior, en caso de utilizar el material como un afirmado, la franja de la gradación A-25 es la que más se ajusta a la curva granulométrica del material.

4.3.1.2. .Requisitos de los Agregados para Afirmados

En el análisis a continuación, se comparan los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización con los requisitos de los agregados para afirmado, expuestos en el Artículo 311-13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). En la Figura 23 se observa la Tabla 311-1. Requisitos de los agregados para afirmado INVIAS (2013).

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones	E-218	50
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18
Limpieza (F)		
Límite líquido, máximo (%)	E-125	40
Índice de plasticidad (%)	E-125 y E-126	4 - 9
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	2
Contracción lineal	E-127 o E-129	Tabla 311 - 3
Resistencia del material (F)		
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 311.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E-148	≥ 15

Figura 23: Tabla 311-1. Requisitos de los agregados para afirmado.

Fuente: INVIAS (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Capítulo 3-Afirmados, Sub-bases y Bases. P. 311-2.

En la Tabla 20 se presenta la comparación de los valores obtenidos para el material de estudio con los requisitos de los agregados mostrados en la Figura 23.

Tabla 20:
Comparación de los resultados del material con los requisitos para un afirmado

Características	Norma	Promedio de los Resultados de ensayos	Afirmado
Dureza			
Máximo valor (%) en Máquina de los ángeles. Para 500 Revoluciones	E-218	24%	50
Durabilidad			
Máximo valor (%) perdidas en ensayo de solidez en sulfatos. Sulfato de Magnesio	E-220	11%	18
Limpieza			
Limite líquido. Máximo (%)	E-125	No líquido	40
Índice de plasticidad. Máximo (%)	E-126	No plástico	4-9

De acuerdo con la Tabla 20, se tiene que el material cumple con los requisitos de durabilidad y desgaste. En el caso de la limpieza, al ser una arena proveniente de concreto reciclado, este no presenta límites.

4.3.2. Evaluación del Material para una Sub-Base Granular.

En la Figura 24 se muestran las franjas granulométricas de sub-base granular expuestas en el artículo 320-13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Las cuales, tienen un tamaño máximo de 1 ½” y 1”. Teniendo en cuenta que el tamaño máximo del material de estudio corresponde a ½”, se concluye de antemano que la curva granulométrica de este, no se ajusta a las franjas propuestas.

Tabla 320 - 3. Franjas granulométricas del material de sub-base granular

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
	50.0 2"	37.5 1 ½"	25.0 1"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.425 No. 40	0.075 No. 200
% PASA									
SBG-50	100	70-95	60-90	45-75	40-70	25-55	15-40	6-25	2-15
SBG-38	-	100	75-95	55-85	45-75	30-60	20-45	8-30	2-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %				6 %			3 %

Figura 24: Tabla 320-3. Franjas granulométricas del material de sub-base granular. Fuente: INVIAS (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Capítulo 3-Afirmados, Sub-bases y Bases. P. 320-2.

4.3.3. Evaluación del material para una Base granular

4.3.3.1. Granulometría del material

En el análisis a continuación, se compara la curva granulométrica escogida, con las franjas granulométricas del material de Base granular expuestas en el artículo 311-13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) mostradas en la Figura 25.

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 ½"	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA								
BASES GRANULARES DE GRACACIÓN GRUESA								
BG-40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG-27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG-25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %

Figura 25: Tabla 330-3, Artículo 330-13 "BASE GRANULAR"

Fuente: INVIAS (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Capítulo 3-Afirmados, Sub-bases y Bases. P. 330-3.

Teniendo en cuenta que el tamaño máximo del material es de ½", este se comparó con la Base granular fina BG-25, debido a que las franjas BG-38, BG-27 y BG-40, mostradas en la Figura 25, proponen un tamaño máximo de 1". En la Figura 26 se presenta la confrontación de la curva granulométrica del material con la Franja de la gradación BG-25. Adicionalmente, en la Tabla 21 se presentan los valores numéricos de la curva granulométrica del material y las franjas para Bases.

Tabla 21:
Valores franja del material con las franjas granulométricas de la base granular BG-25

Bases granulares de gradación fina BG-25				
Tamices		Material	% Que pasa	
mm	U.S. Estándar	% que Pasa	Franja Gruesa	Franja Fina
25	1"	0	100%	-
19	3/4"	100,00%	70%	100%
9,5	3/8"	94,44%	50%	80%
4,75	Nº4	57,34%	35%	65%
2	Nº10	32,76%	20%	45%
0,425	Nº40	13,43%	10%	30%
0,075	Nº.200	0,36%	5%	15%

Fuente: Autor

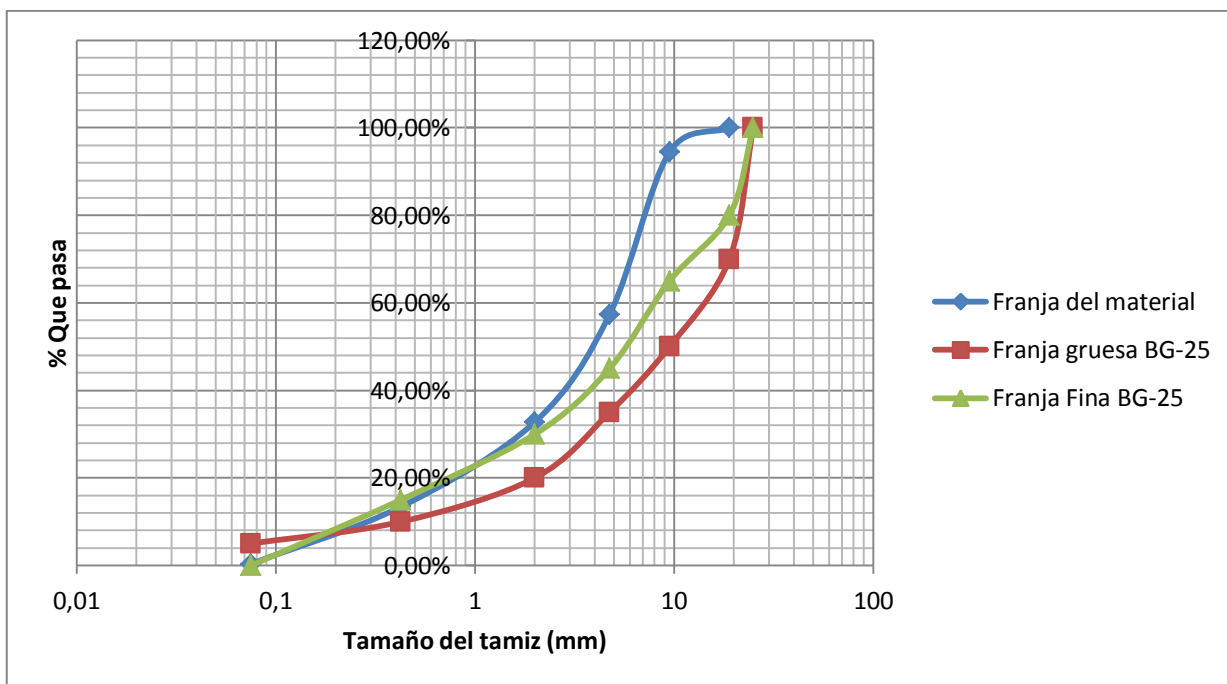


Figura 26: confrontación de la curva granulométrica del material con la Franja de la gradación BG-25

Fuente: Autor

Al comparar los valores de la curva granulométrica del material con la Franja granulométrica de la gradación BG-25 (Tabla 21 y Figura 26) se observa que para el tamiz 3/8" la curva del material sobrepasa a la curva fina en un 15%, en el caso del

tamiz N°200 el porcentaje de finos del material se ajusta más con la curva gruesa del material.

4.3.3.2. Requisitos de los agregados para bases granulares

En el análisis a continuación, se comparan los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización, con los requisitos de los agregados para base granular expuestos en el artículo 330-13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). En la Figura 27 se observa la Tabla 330-2. Requisitos de los agregados para Base Granular INVIAS (2013).

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones - 100 revoluciones	E-218	40 8	40 8	35 7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	30	25
Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	- -	70 75	90 75
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	-	-
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	3	0	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2	2
Geometría de las Partículas (F)				
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	35	35	35
Caras fracturadas, mínimo (%) - Una cara - Dos caras	E-227	50 -	70 50	100 70
Angularidad de la fracción fina, mínimo (%)	E-239	-	35	35
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E-148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

Figura 27: Tabla 330-2. Requisitos de los agregados para base granular. Fuente: INVIAS (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Capítulo 3-Afirmados, Sub-bases y Bases. P. 330-2.

La comparación de los valores obtenidos para el material de estudio con los requisitos de los agregados para afirmados propuestos por el INVIAS, se expone en la Tabla 22.

Tabla 22:

Comparación de los resultados del material con los requisitos para una base granular.

Característica	Norma	Resultados ensayos	Base granular		
			A	B	C
Dureza					
Máximo valor (%) en Máquina de los ángeles. Para 500 Revoluciones	E-218	24%	40	40	35
Durabilidad					
Máximo valor (%) perdidas en ensayo de solidez en sulfatos. Sulfato de Magnesio	E-220	11%	18	18	18
Limpieza					
Límite líquido. Máximo (%)	E-125	No líquido	25	-	-
Índice de plasticidad. Máximo (%)	E-126	No plástico	3	0	0
Geometría de las partículas					
Máximo (%) Índice de aplanamiento y alargamiento	E-230	22,29%	35	35	35
Mínimo (%). Caras fracturadas	E-227				
Una cara		4%	50	70	70
Dos caras		96%		50	70

Fuente: Autor.

De acuerdo con la Tabla 22, se observa que el material cumple con los requisitos de durabilidad, desgaste y geometría de las partículas. En el caso de la limpieza, al ser una arena proveniente de concreto reciclado, este no presenta límites.

4.4. Ensayos De Resistencia a la Compresión para Diferentes Contenidos de Humedad Y Tiempos De Curado

La preparación del material se basó en el procedimiento establecido en las normas I.N.V. E – 611 – 13 (método B) numeral 6.1 y I.N.V. E –612-13 “HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO CEMENTO” (Método B) numeral 6.1.1, 6.1.2, 6.1.4 y 6.1.5. Inicialmente se saturó la sección gruesa del material (retenido N°4) y se secó superficialmente. En el caso de la sección fina, se le adiciono el porcentaje de agua determinado (60%,80%, 120%,140%, 160% y 180% de la humedad óptima) teniendo en cuenta que la humedad óptima del material es del 12% .

Las probetas de ensayo fueron moldeadas con base en el procedimiento descrito en la norma I.N.V. E –612 – 13 numeral 6.2. El cual, consiste en elaborar la probeta mediante tres capas iguales, suministrado a cada capa 25 golpes con un martillo de 24.5 N con caída libre de 305mm (12”). Una vez moldeada cada probeta se sometió a su respectivo tiempo de curado (7días, 15 días, 28 días y 56 días). Finalmente al cumplirse el tiempo de curado para cada probeta, estas se sometieron al ensayo de compresión simple.

A continuación se presenta en la Tabla 23, la resistencia a la compresión para cada probeta en unidad de Mega Pascales (MPa). Dependiendo del tiempo de curado y la cantidad de agua se elaboraron tres a cuatro probetas y se realizó un promedio de los resultados. Sin embargo, al ser un material arenoso se presentaron casos en los cuales, antes de realizar el ensayo la probeta fallo antes de tiempo. Estos resultados se descartaron debido a que se salían del rango y se señalan en rojo en la Tabla 23.

Tabla 23:
Resultados de ensayo de compresión simple para cada probeta

Resistencia a la compresión Mpa				
	7 Días	15 Días	28 Días	56 Días
60%HO (7%)	0,04	0,06	0,08	0,04
	0,05	0,05	0,11	0,23
	0,01	0,04	0,09	0,22
Promedio	0,05	0,05	0,09	0,23
80%HO (10%)	0,11	0,09	0,13	0,05
	0,06	0,09	0,11	0,13
	0,11	0,1	0,13	0,24
	0,01	0,06	0,08	0,25
Promedio	0,09	0,09	0,11	0,25
H.O (12%)	0,1	0,15	0,22	0,49
	0,13	0,15	0,17	0,43
	0,13	0,14	0,11	0,4
	0,12	0,11	0,19	0,11
Promedio	0,13	0,15	0,17	0,44
120%HO (14%)	0,04	0,1	0,08	0,2
	0,06	0,06	0,1	0,12
	0,05	0,07	0,08	0,14
	0,09	0,06	0,06	0,04
Promedio	0,07	0,07	0,09	0,15
140%HO (17%)	0,03	0,04	0,03	0,09
	0,06	0,06	0,08	0,13
	0,07	0,07	0,07	0,12
Promedio	0,07	0,07	0,08	0,11
160%HO (19%)	0,04	0,04	0,05	0,08
	0,03	0,04	0,05	0,09
	0,04	0,04	0,05	0,04
Promedio	0,04	0,04	0,05	0,09
180%HO (22%)	0,02	0,01	0,05	0,07
	0,02	0,04	0,04	0,07
	0,03	0,03	0,05	0,06
Promedio	0,02	0,04	0,05	0,07

Fuente: Autor.

En la Figura 28 se presenta la gráfica de los promedios de las resistencias para cada contenido de humedad y tiempo de curado. Los respectivos análisis para cada variable, humedad y tiempo de curado, se realizan por separado en las secciones 4.4.1 y 4.4.2, respectivamente.

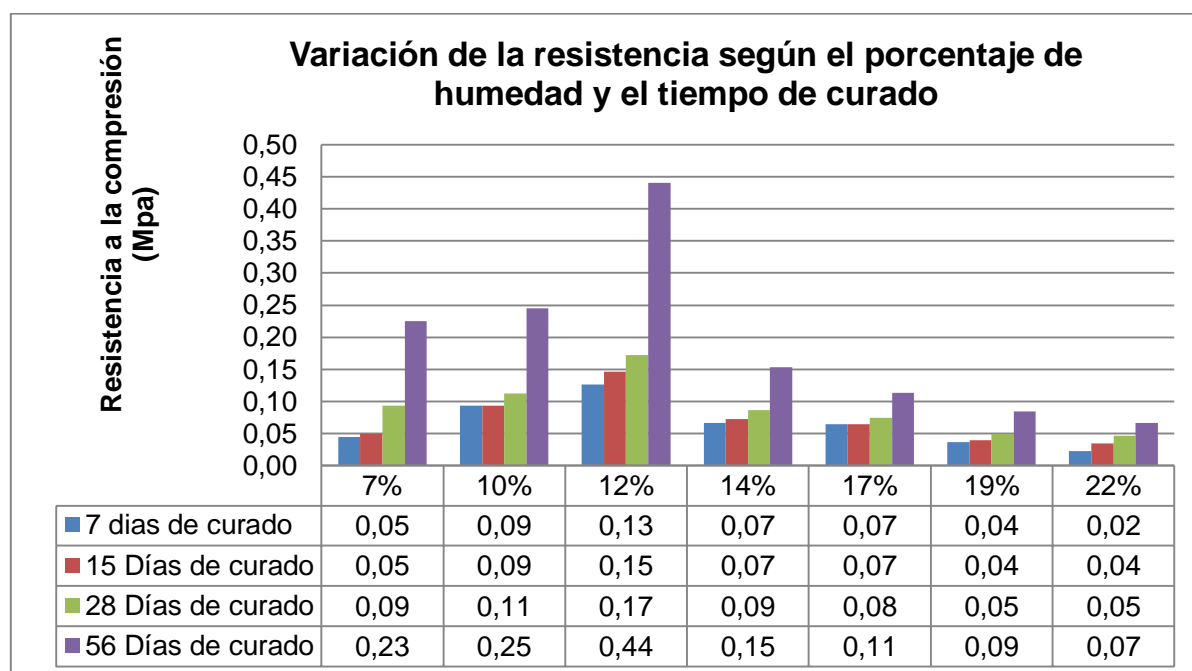


Figura 28: Gráfica de los resúmenes de las resistencias para cada contenido de humedad y tiempo de curado.

Fuente: Autor.

4.4.1. Resumen de Resultados de Falla Visualizando el Cambio Según el Contenido de Humedad

En esta sección se presentan los resultados de tal manera que se visualiza el cambio de la resistencia según el contenido de agua para cada tiempo de curado. En la Tabla 24 se presenta el resumen de los promedios hallados en la Tabla 23 para cada tiempo de curado y porcentaje de humedad.

Tabla 24:

Resumen de los Promedios de Resistencia para cada Tiempo de Curado y Porcentaje de Humedad.

Humedad	Resistencia			
	7 Días de curado	15 Días de curado	28 Días de curado	56 Días de curado
7%	0,05	0,05	0,09	0,23
10%	0,09	0,09	0,11	0,25
12%	0,13	0,15	0,17	0,44
14%	0,07	0,07	0,09	0,15
17%	0,07	0,07	0,08	0,11
19%	0,04	0,04	0,05	0,09
22%	0,02	0,04	0,05	0,07

Fuente: Autor.

A continuación, en la Figura 29 se encuentra la gráfica de los resultados expuestos en la Tabla 24, de tal manera que se visualiza la variación de la resistencia según el porcentaje de humedad para cada tiempo de curado.

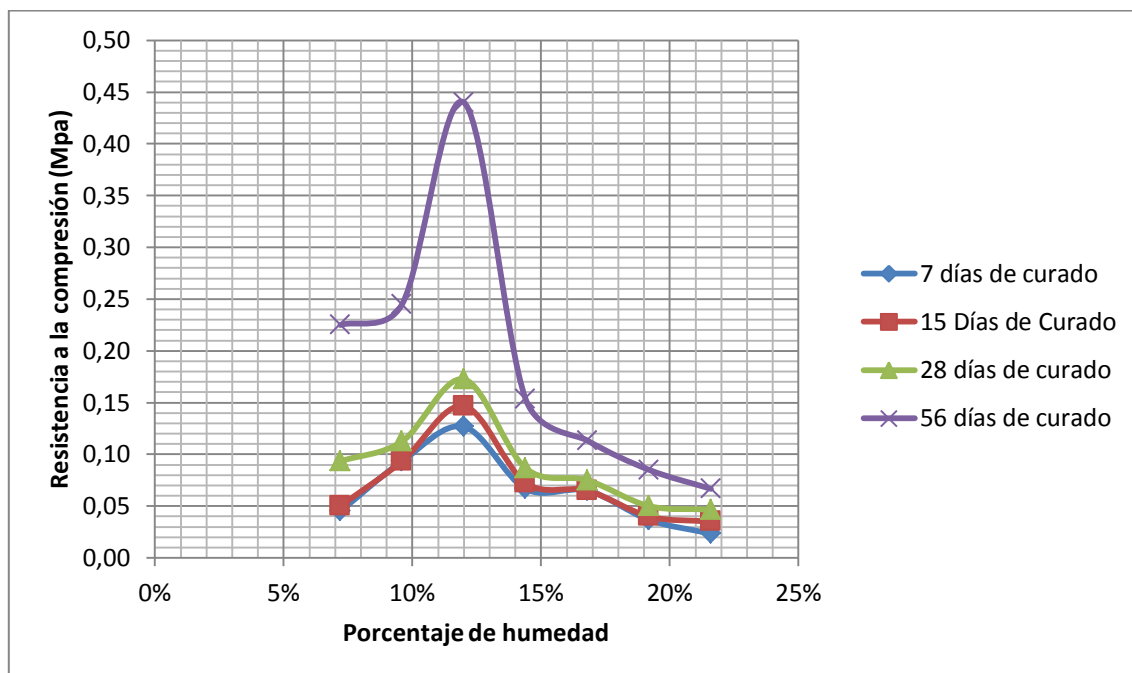


Figura 29: Variación de la Resistencia según el porcentaje de humedad.

Fuente: Autor

Según los resultados expuestos en la Tabla 24 y en la Figura 29, se observa que para todos los tiempos de curado, el material obtuvo la mayor resistencia para su humedad óptima y a medida que se aumentaba o disminuía el porcentaje de agua para la mezcla, esta resistencia se reducía. Así mismo, las resistencias para cada humedad varían según el tiempo de curado a las que fueron sometidas, sin embargo en el caso de los 7,15 y 28 días, la variación para cada punto no es tan significativa como lo es para los 56 días de curado, donde se observa que la resistencia aumenta en gran proporción.

Con el fin de cuantificar las variaciones para cada humedad, se tomó como ejemplo la curva de los 56 días de curado, ya que es donde se presenta la mayor resistencia para el material con 0,44MPa.

En la Figura 30, se presenta la variación de la resistencia en porcentaje para cada contenido de humedad, a un tiempo de curado de 56 días.

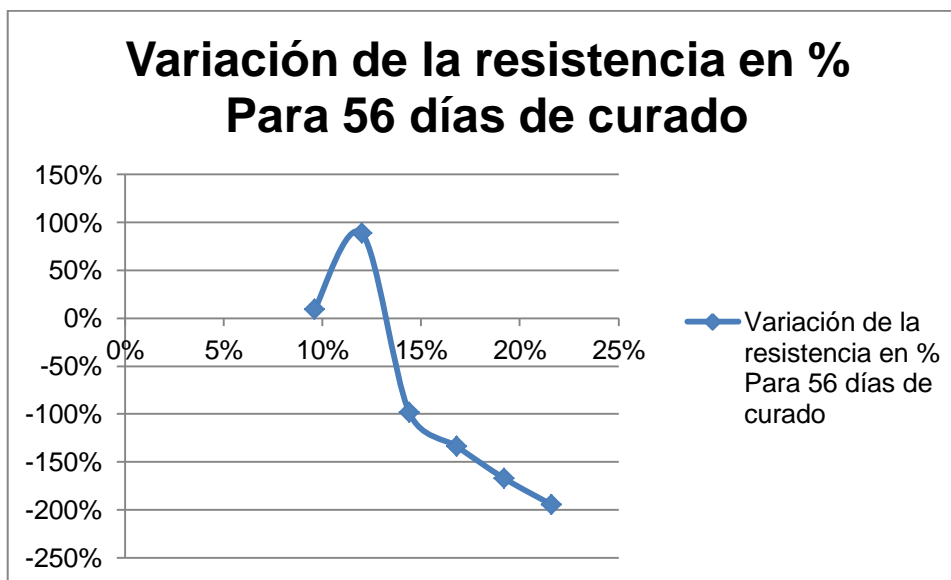


Figura 30: Variación de la Resistencia para Cada Humedad a 56 días de Curado.
Fuente: Autor

En la Tabla 25 se presenta la variación de la resistencia en porcentaje al pasar de un contenido de humedad a otro, según la gráfica de la Figura 30.

Tabla 25:
Variación de la resistencia en porcentaje

Rango	Variación de la resistencia
7%-10%	Aumento en un 9%
10%-12%	Aumento en un 80%
12%-14%	Disminuyó en un 187%
14%-17%	Disminuyó en un 35%
17%-19%	Disminuyó en un 33%
19%-22%	Disminuyó en un 28%

Fuente: Autor

Según los resultados expuestos en la Tabla 25 y en la Figura 30 la humedad óptima tiene una gran influencia en la resistencia del material, ya que al pasar del 10% al 12% (Humedad óptima) la resistencia aumenta un 80% y al pasar del 12% al 14% la resistencia disminuye en un 187%. Así mismo, se observa que a medida que la cantidad de agua se acerca a la humedad óptima la resistencia va aumentando, ya que al pasar del 7% al 12% aumenta un 9% y en el caso del 14% su resistencia baja al pasar al 17% en un 35%.

De acuerdo a lo anterior, se deduce que la resistencia está relacionada con el grado de compactación de la mezcla, debido a que al estar compactada con la humedad óptima la mezcla alcanza su mayor densidad. Este comportamiento se debe a que inicialmente cuando el material se encuentra con un contenido bajo de humedad, el agua no toma el rol de lubricante entre las partículas, en consecuencia, la fricción entre los granos impide el deslizamiento de unas partículas sobre las otras; y por consiguiente, que se densifique adecuadamente. A medida que se le adiciona agua al material, esta actúa como un lubricante entre partículas y hace que se desplacen hacia un empaquetamiento más cerrado que conduce a una reducción de los poros. Así mismo, cuando el material se compacta con la humedad óptima y alcanza su densidad seca máxima, la reducción de porosidad y el incremento de la humedad, conducen a un estado límite en el que se forma una red continua de agua que comienza a tener una continuidad cerrando los poros comunicados. Como consecuencia el aire queda encerrado en forma de burbujas

aisladas. Éstas son retenidas en cada poro y no es posible lograr una mayor densificación. (Paramo, 2002, págs. 5-6)

Con respecto al cemento remanente, en la medida en que haya suficiente agua este continuará hidratándose hasta que todos los espacios de poros disponibles se vean colmados o hasta que no haya más cemento para hidratar, sin embargo esta hidratación total del cemento también depende del tiempo de curado. Si se compara con el caso de un concreto, la clave para el desarrollo tanto de la resistencia mecánica como de las características de durabilidad, no es tanto el grado de hidratación del cemento, como el grado en que los poros entre partículas de cemento se hayan llenado. (Técnicas, 2006, pág. 3)

Sin embargo, el exceso de agua afecta también como se puede observar en las humedades mayores a la óptima, donde la resistencia disminuyó en un rango mayor que la de las humedades menores, esto puede atribuirse al hecho de que el exceso de agua en el material aumenta su porosidad. Así pues, una vez elaborada la probeta el agua flota hacia arriba donde se comprime por los lados o el fondo, ocupando así, un espacio que deja millones de huecos entrecruzados en todas direcciones. Impidiendo que las partículas se unan entre sí y se debilite el material. (López Orozco, 2004)

De acuerdo a lo anterior, puede deducirse que el material se asemeja a un agregado natural, en la medida que su comportamiento mecánico está dependiendo del grado de compactación, ya que su mayor densidad se alcanza con la humedad óptima, sin embargo, el material está alcanzando una cementación una vez que empieza su tiempo de curado, lo que indica que el cemento remanente influye.

4.4.1.1. Material como un Suelo-Cemento con Cemento

Analizando el comportamiento del material como un suelo cemento de acuerdo al ensayo de compresión, se toma como base la curva de resistencia a los siete días de

curado, mostrada en la Figura 29. Debido a que este es el tiempo que se exige en el Artículo 350-13 “Suelo-Cemento” del INVIAS. En dicha curva se observa que el material logra una resistencia de 0,13 Mpa para la humedad óptima. Teniendo en cuenta que la resistencia exigida para un suelo-cemento es de 2.1 MPa (numeral 4.1.1 Artículo 350-13) el criterio no se cumple, sin embargo, el material en su estado natural estaría aportando un 6.2% a la resistencia, si dicho suelo-cemento se fabricara con el material de estudio.

4.4.1.2. Variación de la Densidad a partir del tiempo de curado

En la Figura 31 se presenta la variación de las densidades del material en relación al tiempo de curado, se observa que para los 56 días el material obtiene su mayor densidad de 0,0027 Kg/m². Este comportamiento demuestra que el material tiene su mayor densidad al ser moldeado con la humedad óptima y que esta incrementa en la medida que aumenta el tiempo de curado, ya que a medida que avanza el tiempo de hay una mayor hidratación del cemento remanente y los poros son colmados.

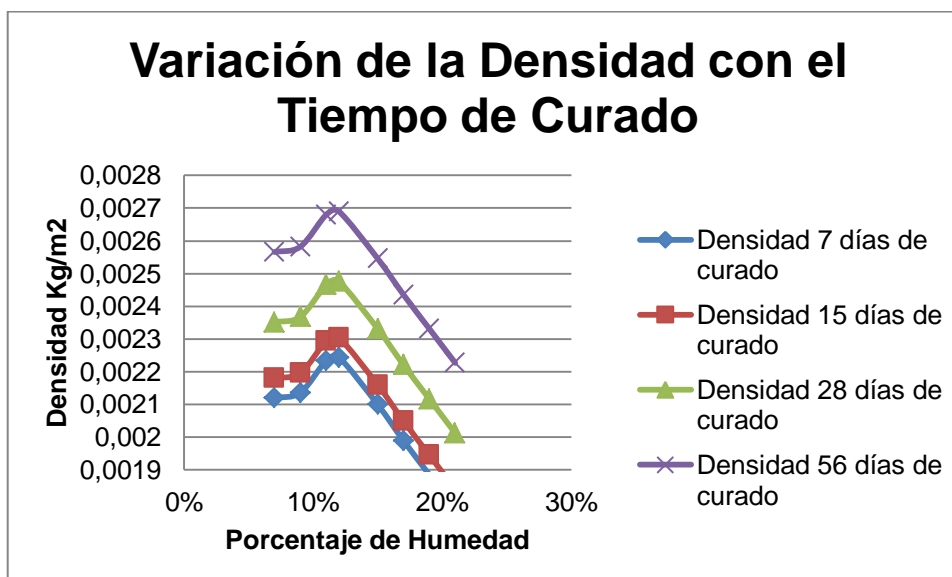


Figura 31: Variación de la Densidad con el Tiempo de Curado.

Fuente: Autor

4.4.2. Resumen de Resultados de Falla Visualizando el Cambio Según el Tiempo de Curado

En esta sección se presentan los resultados de tal manera que se visualiza el cambio de la resistencia según el tiempo de curado para cada contenido de agua.

En la Tabla 26, se presentan las variaciones de la resistencia según el tiempo de curado para cada humedad.

Tabla 26:

Variación de la resistencia según el tiempo de curado para cada humedad

Tiempo de curado (días)	Resistencia Mpa						
	7%	10%	12%	14%	17%	19%	22%
7	0,05	0,09	0,13	0,07	0,07	0,04	0,02
15	0,05	0,09	0,15	0,07	0,07	0,04	0,04
28	0,09	0,11	0,17	0,09	0,08	0,05	0,05
56	0,23	0,25	0,44	0,15	0,11	0,09	0,07

Fuente: Autor.

En la Figura 32 se presenta la gráfica de los resultados obtenidos en la Tabla 22.

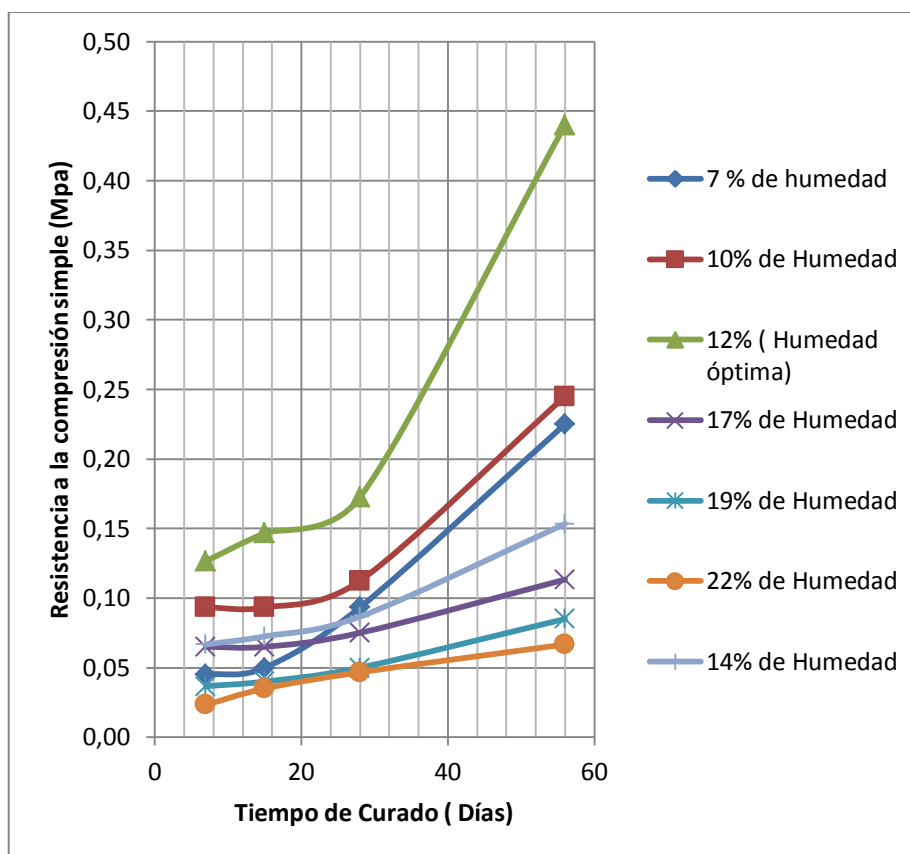


Figura 32: Variación de la resistencia según el tiempo de curado.
Fuente: Autor.

De acuerdo a los resultados expuestos en la Tabla 26 y en la Figura 32, se observa que la resistencia del material aumenta a medida que se incrementa el tiempo de curado, obteniendo el valor mayor a los 56 días para todas las humedades.

En el caso del 7% de humedad, en los 7 y 15 días de curado la resistencia es menor que la de 14% y 17%, y a medida que aumenta el tiempo, para los 28 y 56 días, esta sube notablemente hasta sobrepasarlas. Así mismo, para el 10% de humedad, la resistencia aumenta significativamente al pasar de 28 a 56 días de curado. Para el 19% y 22% de humedad sus resistencias a los 15 y 28 días son similares, sin embargo, al llegar a los 56 días se muestra una variación. La curva que presenta las mayores resistencias es la humedad óptima, ya que, para esta humedad el material tiene su mayor densidad seca mejorando comportamiento mecánico. Con el fin de cuantificar la variación de las

resistencias según el tiempo de curado, se analizará entonces la curva del 12% de humedad. Los resultados se presentan en la Figura 33.

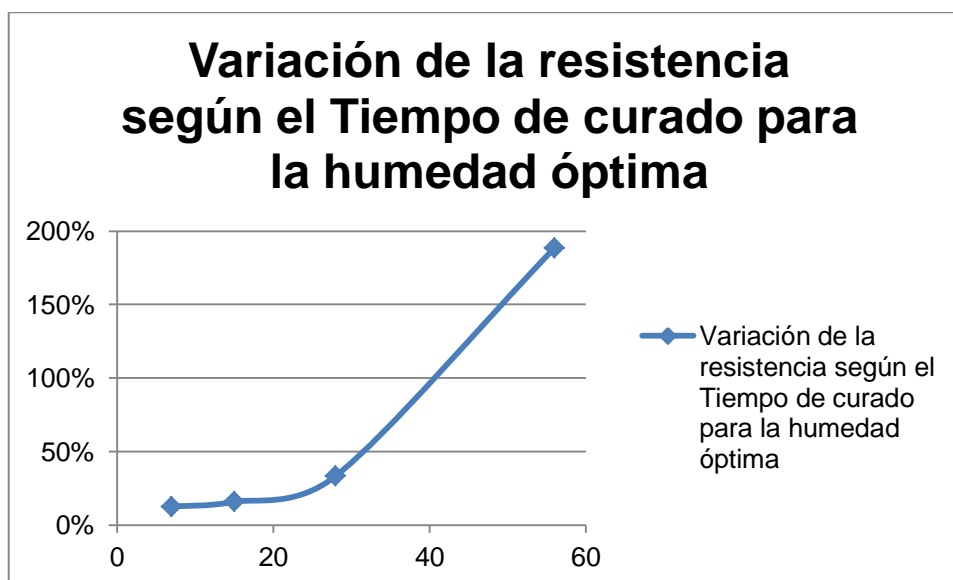


Figura 33: Variación de la resistencia según el Tiempo de Curado para la Humedad óptima.

Fuente: Autor.

En la Tabla 27 se presenta la variación de la resistencia en porcentaje al pasar de un tiempo de curado a otro, según la gráfica de la Figura 33.

Tabla 27:

Variación de la resistencia en porcentaje al pasar de un tiempo de curado a otro

Rango	Variación de la resistencia
0 a 7 días	Aumento en un 13%
7 a 15 días	Aumento en un 16%
15 a 28 días	Aumento en un 33%
28 a 56 días	Aumento en un 188%

Fuente: Autor.

Según los resultados expuestos en la Tabla 27 y en la Figura 33, el tiempo de curado influye en la resistencia del material, debido a que para todos los rangos esta aumenta a

medida que se incrementa el tiempo. Sin embargo, se visualiza un cambio notorio para el caso de 28 a 56 días, pasando de 0,17 a 0,44 Mpa aumentando un 188%.

Las variaciones mencionadas en el párrafo anterior, demuestran la influencia del cemento remanente en la resistencia del material. En primer lugar, el material se autocementa en su estado natural, sin adicionarle cemento, fenómeno que se evidencia en la Figura 32, donde para todas las humedades en el tiempo de curado de 7 días el material incrementó su resistencia. En segundo lugar, teniendo en cuenta el aumento en los porcentajes presentados en la Figura 33, se revela que el tiempo de curado influye en la resistencia del material, debido a que en este proceso el cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua, que en este caso se manejó con la cámara de curado. (Técnicas, 2006)

A continuación se presenta en la Figura 34 se muestra el comportamiento de un concreto convencional en la ciudad de Lisboa, con el fin de comparar este comportamiento con las curvas expuestas en la Figura 32.

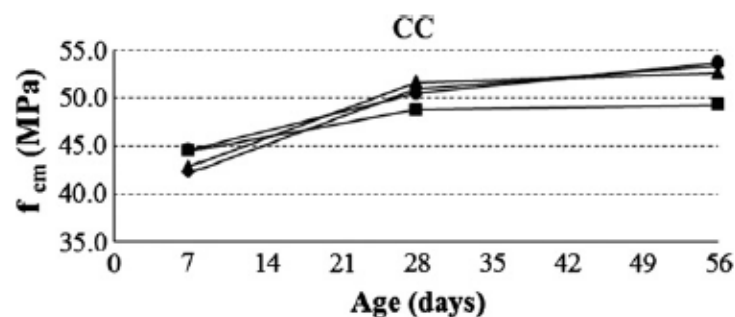


Figura 34: Compressive strength versus time for the reference concrete (CC), for different curing conditions.

Fuente: (Fonseca a, de Brito, & Evangelista b, 2010). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete wasteP.641

En la Figura 34, se evidencia un comportamiento similar en cuanto a que a medida que se aumenta el número de días de curado, la resistencia a la compresión aumenta. Así mismo, la mayor resistencia se obtiene a los 56 días de curado y se presenta un cambio notable de resistencia entre los 7 y 56 días. Sin embargo, los porcentajes de aumento no son tan notorios como el del material de estudio.

4.4.3. Módulo de Elasticidad según el Tiempo de Curado y el Porcentaje de Humedad.

Con el fin de determinar la variación del módulo de elasticidad del material, se tomaron los resultados de las deformaciones, para una curva típica de cada humedad y tiempo de curado, obtenidas en la prueba de compresión simple; por medio de la pendiente de la recta en la zona donde el material tiene un comportamiento elástico. En la Figura 35 se presentan los resultados de los módulos de elasticidad para cada curva típica de cada humedad y tiempo de curado.

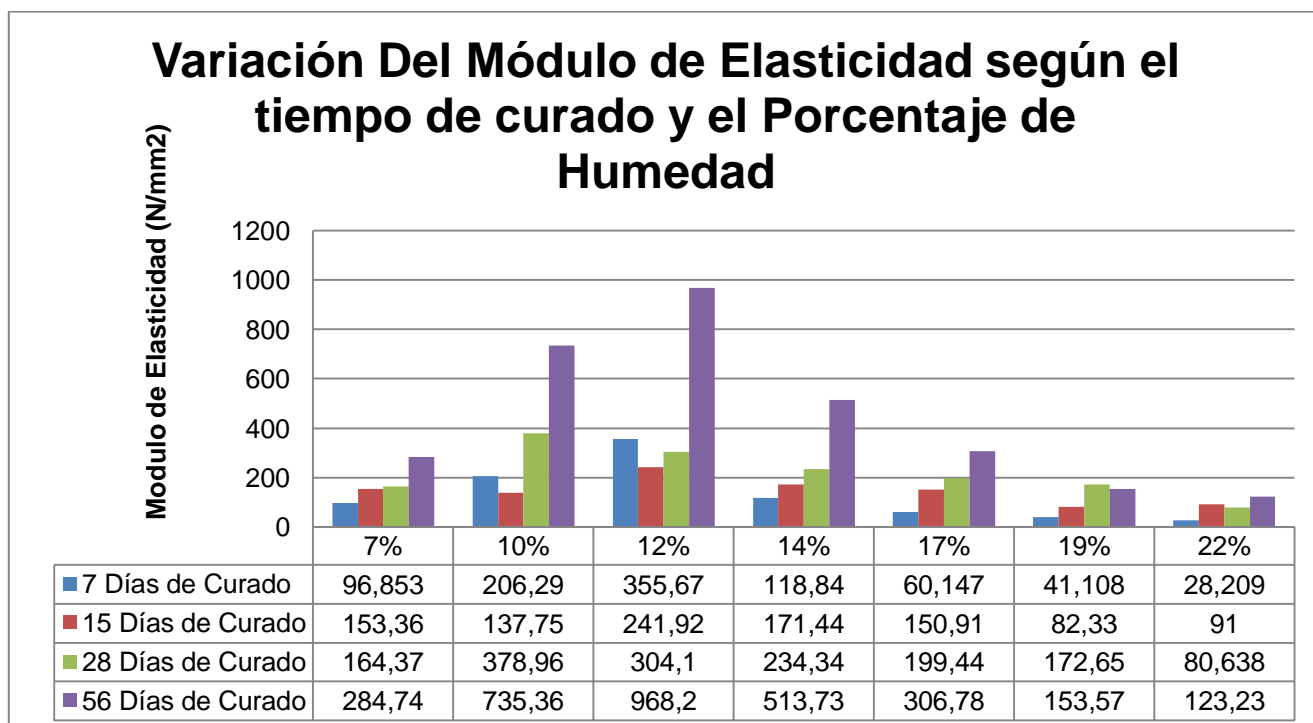


Figura 35: Variación del Módulo de Elasticidad según el Tiempo de Curado y el Porcentaje de Humedad.

Fuente: Autor

Según los resultados expuestos en la Figura 35, al analizar la variación de módulo con la cantidad de humedad y tiempo de curado en la mayoría de casos esta se ve relacionada a medida que aumentan estas dos variables.

En la Figura 36 se presentan los resultados de la Figura 35, evidenciando la variación del módulo de elasticidad según el tiempo de curado.

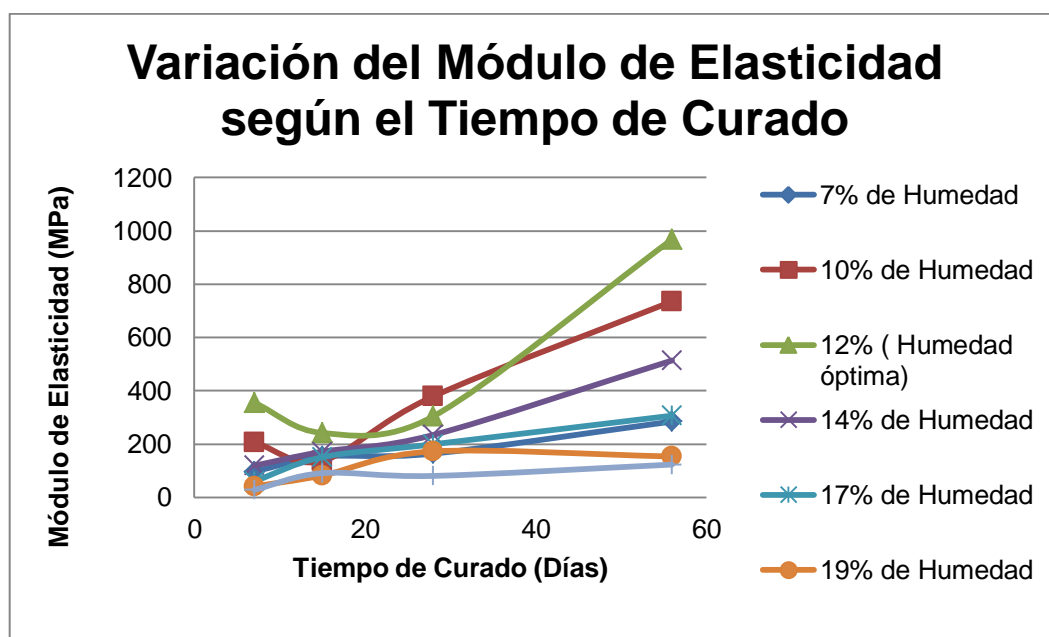


Figura 36: Variación del Módulo de Elasticidad según el Tiempo de curado para Cada Humedad.

Fuente: Autor.

Según los resultados expuestos en la Figura 35 y 36, se tiene:

- Para la curva del 7% de humedad para 7 días de curado se presenta el módulo de elasticidad menor con 96,85 MPa, este aumenta a medida que aumenta el tiempo de curado. Por lo tanto para este caso a 7 días el material será más frágil y tenderá a romperse, mientras que a 56 días se tendrá un módulo mejor (284,74 MPa). El comportamiento de esta curva es similar al de la curva del 17% de humedad.

- Para la curva del 10% de humedad se ve una disminución del módulo de los 7 a los 15 días de curado, lo que demuestra que para este tiempo el material tiene de a ser más frágil y puede romperse, sin embargo cuando aumenta a los 28 días el módulo aumenta hasta ser mayor que el módulo presentado para la humedad óptima. Finalmente a los 56 días el módulo mejora hasta llegar a 735,36 MPa.
- Para la curva del 12% de humedad (óptima) el módulo disminuye de los 7 a 15 días, tiempo en el cual el material puede ser más frágil en comparación con los otros tiempos. Para el caso de los 28 días el módulo aumenta, sin embargo es menor que el presentado para el 10% de humedad. Finalmente para los 56 días de curado se presenta el mayor módulo de todos, 968,2 MPa.
- Para la curva del 14% de humedad, el módulo aumenta a medida que aumenta su tiempo de curado, obteniendo un módulo máximo de 513,73 MPa para los 56 días de curado, evidenciando que para este tiempo, el material tendrá un mejor comportamiento.
- Para la curva del 17% el módulo aumenta proporcionalmente al tiempo de curado, llegando a un módulo máximo de 306,78 MPa a los 56 días de curado.
- Para la curva del 19% el mayor módulo se presenta para los 28 días con 172,65 MPa, evidenciando que para este tiempo el material tendrá un mejor comportamiento que los otros tiempos.
- Para la curva del 22% se presentan los menores módulos, teniendo un módulo máximo de 123,23 MPa, lo que evidencia que para esta humedad el material será más frágil que las otras humedades.

De acuerdo al análisis anterior se tiene que el material tendrá un mejor comportamiento para la humedad óptima a 56 días de curado, ya que llega al máximo valor 968,2 MPa. Este valor sobre pasa al módulo de elasticidad de un material

natural, ya que para una grava densa este oscila entre 100-200 MPa (Kiamco, Alfaro, & Asensio, 2004, págs. 5-11) Demostrando así la influencia de la auto-cementación en el módulo del material. Adicionalmente, para una humedad del 22% el material tiene un comportamiento más frágil ya que para esta humedad se presentó los módulos más bajos.

5. Conclusiones

Con base en el proceso de análisis del agregado de concreto reciclado llevado a cabo en el presente trabajo, se llegó a las siguientes conclusiones:

- De acuerdo con la caracterización del material se concluye que en características como el porcentaje de desgaste y el índice de aplanamiento y alargamiento, tiene un comportamiento similar a los materiales naturales, sin embargo, existen características propias del material según su origen y componentes, como lo son la absorción de finos y gruesos, el número de caras fracturadas y los límites líquidos y plásticos.
- Los resultados de la investigación demuestran la existencia de una propiedad de auto-cementación de los Agregados de Concreto Reciclado (ACR), al observar la tendencia aglomerante del material en función del tiempo para las diferentes humedades de compactación. Los valores máximos de resistencia a la compresión inconfiada del ACR se lograron para los especímenes compactados a la humedad óptima, aumentando exponencialmente en función del tiempo de curado de los especímenes, llegándose a valores máximos de resistencia a la compresión inconfiada de 440 KPa para los especímenes compactados a la humedad óptima del material y ensayados a los 56 días.
- Al obtener los valores máximos de resistencia para los especímenes compactados a la humedad óptima, se evidencia que el comportamiento mecánico del material, es similar al de un agregado pétreo, ya que su máxima densidad seca depende del grado de compactación y su auto-cementación comienza con el tiempo de curado.
- El módulo de elasticidad del material se encuentra influenciado por la cantidad de agua y el tiempo de curado, ya que para la humedad óptima se presentaron los mayores módulos, y a medida que se incrementaban los tiempos, estos aumentaron, hasta llegar a un valor de 968,2 MPa.

6. Recomendaciones y Posibles usos

- Según los resultados de la presente investigación, las características del material de estudio permiten su utilización como un agregado pétreo, con el valor adicional que en su estado natural está aportando una resistencia gracias a las partículas de cemento remanente adherido que le permiten una auto-cementación. Sin embargo, se recomienda la rectificación de los requisitos que se soliciten en su uso futuro (Base, Afirmado, Concretos, etc.).
- En el caso de un suelo-cemento el material no llega a la resistencia requerida en sus siete días de curado, sin embargo, está aportando un 6% en su estado natural y por ende puede necesitar menos cemento que si se elaborará con un agregado normal. Como recomendación, se plantea el estudio de la cantidad de cemento que se podría economizar en el caso de su fabricación.
- Según la granulometría del material, este se clasifica como una arena bien gradada. Al comparar su curva granulométrica con las requeridas para un Base, una Sub-base y un Afirmado. La curva se ajusta más a la gradación A-25 para un Afirmado, seguido de la franja BG-25 para una Base. En el caso de una sub-base el material resulta ser muy fino para su ajuste.
- Se recomienda para investigaciones futuras estudiar el material para mayores tiempos de curado de 56 días a la humedad óptima, con el fin de comprobar hasta cuándo puede aumentar su resistencia. Debido a que, en la presente investigación se llegó a la conclusión que a esta humedad es donde el material tiene su mejor comportamiento mecánico y su resistencia aumenta a medida que se incrementa el tiempo de curado.

Bibliografía

LIBROS

- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Kentucky: Pearson, Prentice Hall.
- Montejofonseca, A. (s.f.). Ingeniería de Pavimentos para carreteras. En A. Montejofonseca, *Ingeniería de Pavimentos para carreteras* (pág. 50).

REVISTAS

- FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, I. Y. (2002). COMPACTACIÓN DE SUELOS Y MATERIALES ESTABILIZADOS. *CATEDRA TRANSPORTE III- UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO*, 5-6.
- Fonseca a, N., de Brito, J., & Evangelista b, J. (2010). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete. *Cement & Concrete composite*, 641.
- GONZÁLEZ SALCEDO, L. O. (2008). *CONCEPTOS GENERALES SOBRE LOS AGREGADOS*. PALMIRA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA .
- Kiamco, C., Alfaro, L., & Asensio, E. (2004). *REGLAMENTO ESTRUCTURAL PANAMEÑO 2004*. Panama.

- León, M. P., & Ramirez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Ingeniería de Construcción*, 215-240.
- López Orozco, J. O. (2004). *POROSIDAD DEL CONCRETO*. Guatemala.
- N, F. a., J, d. B., & L, E. b. (2010). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete. *Cement & Concrete Composites*, 641.
- Paramo, J. (2002). COMPACTACIÓN DE SUELOS Y MATERIALES ESTABILIZADOS. *CATEDRA TRANSPORTE III*, 5-6.
- Técnicas, S. I. (2006). Curado del Concreto. *SIKA*, 3.
- Vidal, V., & Reyes, O. (2011). Aplicación de los residuos de hormigón en materiales de construcción. *Ingeniería y Desarrollo*, 11.
- Amorim, P., de Brito, J., & Evangelista, L. (2014). Concrete Made with Coarse Concrete Aggregate: Influence of Curing on Durability. *ACI Materials Journal*, 195-204.
- Castaño, J. O., Misle Rodriguez, R., Andres Lasso, L., Gómez Cabrera, A., & . Ocampo, M. S. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. *Tecnura*, 121 -129.
- Escandon Mejia, J. C. (2011). DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN EDIFICACIONES EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.
- Koenders, E. A., Pepe, M., & Martinelli, E. (2013). Compressive strength and hydration processes of concrete with. *Cement and Concrete Research*, 203-212.

- López, G. F., López-Colina, P. C., Serrano López, M. A., & Domingo Cabo, A. (Agosto de 2013). The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled. *Construction and Building Materials*, 260-266.
- Ortuño, L. (1991). Compactación de los suelos parcialmente saturados. 3-22.
- Pepe, M., Koendersb, E. A., Faella, C., & Martinelli, E. (2014). Structural concrete made with recycled aggregates: Hydration process and compressive strength models. *Mechanics Research Communications*, 139–145.

CIBERGRAFÍA

- *Ingenieria Civil Proyectos y apuntes.* (s.f.). Obtenido de <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/05/53-tamano-maximo-del-agregado.html>
- Galeon. *Hispavista.* (s.f.). Obtenido de <http://www.galeon.com/matcon/lab02/tamamax.htm>

