



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Estudio del Efecto de la Adición de Concretos Reciclados
Sobre las Propiedades Físico-Mecánicas de Concretos
Permeables en Estado Endurecido y su Colocación.**

Edinson Murillo Mosquera

Línea de Investigación: Materiales, Durabilidad, Patología y Patrimonio

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura
Escuela de Construcción y Hábitat
Plan de Estudio Profundización
Medellín Colombia

2022

**Estudio del Efecto de la Adición de Concretos Reciclados
Sobre las Propiedades Físico-Mecánicas de Concretos
Permeables en Estado Endurecido y su Colocación.**

Edinson Murillo Mosquera

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Construcción

Director:

PhD., Henry Alonso Colorado

Codirector:

MSc. Yhan Paul Arias

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Arquitectura

Escuela de Construcción y Hábitat

Plan de Estudio Profundización

Medellín Colombia

2022

Resumen

En este trabajo de profundización se revisan los desarrollos y el estado del arte relativos a la investigación y las prácticas del concreto permeable. Se han revisado las investigaciones sobre las propiedades mecánicas, e hidrológicas del concreto permeable realizadas en varios estudios. Se discutieron las investigaciones de campo de algunas secciones de prueba y pavimentos de concreto permeable en servicio. Se realizó una revisión de las distintas metodologías para aumentar la eficiencia hidráulica y mecánica de los pavimentos de concreto permeable, seleccionando las de mejores resultados en cuanto a densidad, porosidad, permeabilidad y resistencia. Se indagaron las propiedades físicas y mecánicas de concretos permeable, como la densidad, la porosidad, la permeabilidad y la resistencia mediante correlaciones lineales de acuerdo con la literatura y luego utilizando como árido grueso los residuos de construcción y demolición, específicamente residuos de cilindros de concreto provenientes de una construcción a las afueras de la ciudad de Medellín se fabrican cilindros de concreto permeable con agregados reciclados y naturales. Mediante pruebas de laboratorio se analiza el rendimiento mecánico y la permeabilidad del concreto permeable fabricado con agregado reciclado y agregado natural con el fin de compararlo con lo hallado en la literatura. Para esta prueba las variables de control fueron el tamaño máximo de partícula del árido, la relación agua cemento y el porcentaje de agregado utilizado. Los porcentajes de reemplazo utilizados de volumen de áridos reciclados fueron 100%; el diámetro máximo nominales utilizado fue de 12,7 mm; y la relación agua/cemento utilizada fue de 0,35, para el concreto permeable fabricado con agregado natural se utilizó el mismo porcentaje, relación agua/cemento y tamaño máximo de agregados. Se realizó la caracterización de los agregados reciclados y naturales, así como pruebas de laboratorio de las proporciones de las mezclas para determinar varias propiedades, tales como el contenido de vacíos, el peso unitario, la resistencia a la compresión y la permeabilidad. Los resultados de las pruebas de laboratorio relevantes para el rendimiento mecánico e hidrológico del concreto permeable, por ejemplo, la resistencia a la compresión, la porosidad, la densidad y la permeabilidad, y sus correlaciones, se discuten con gran detalle.

Palabras clave: Concreto permeable, árido reciclado de concreto, permeabilidad, porosidad, densidad, resistencia.

Study of the Effect of the Addition of Recycled Concrete on the Physical-Mechanical Properties of Permeable Concrete in Hardened State and its Placement.

Abstract

This work reviews the developments and state of the art concerning the research and practices of pervious concrete. Research on the mechanical, and hydrological properties of pervious concrete conducted in various studies have been reviewed. Field investigations of some test sections and in-service pervious concrete pavements were discussed. A review of the different methodologies to increase the hydraulic and mechanical efficiency of pervious concrete pavements was carried out, selecting those with the best results in terms of density, porosity, permeability and strength. The physical and mechanical properties of permeable concrete, such as density, porosity, permeability and resistance are investigated through linear correlations according to the literature and then using construction and demolition waste as coarse aggregate, specifically waste concrete cylinders from a construction site on the outskirts of the city of Medellin, permeable concrete cylinders are manufactured with recycled and natural aggregates. By means of laboratory tests, the mechanical performance and permeability of pervious concrete made with recycled aggregate and natural aggregate were analyzed in order to compare them with those found in the literature. For this test, the control variables were the maximum particle size of the aggregate, the water-cement ratio and the percentage of aggregate used. The replacement percentages used of recycled aggregate volume were 100%; the nominal maximum diameter used was 12,7 mm; and the water/cement ratio used was 0,35; for the permeable concrete manufactured with natural aggregate, the same percentage, water/cement ratio and maximum aggregate size were used. The characterization of recycled and natural aggregates was carried out, as well as laboratory tests of the mix proportions to determine several properties, such as void content, unit weight, compressive strength and permeability. The results of laboratory tests relevant to the mechanical and hydrological performance of pervious concrete, e.g., compressive strength, i_a , porosity, density, and permeability, and their correlations, are discussed in detail.

Keywords: Pervious concrete, recycled concrete aggregate, permeability, porosity, density, strength.

Contenido

1.	Lista de Figuras	IV
2.	Lista de Ecuaciones	VI
3.	Lista de Tablas	VI
4.	Lista de Símbolos y abreviaturas	7
5.	Introducción.	9
6.	Planteamiento del Problema	10
6.1	Pregunta de Profundización	11
6.2	Objetivos	11
6.2.1	Objetivo General:	11
6.2.2	Objetivos Específicos:	11
7.	Marco de Referencia	12
7.1	Marco teórico	12
7.1.1	Conceptos Generales	12
7.1.2	Materiales del Concreto Permeable	13
7.1.3	Propiedades Físicas del Concreto permeable	15
7.1.4	Agregados Reciclados	20
7.1.5	Antecedentes de concreto permeable fabricado con agregado reciclado. 26	26
7.2	Marco Normativo	31
7.3	Estado del Arte	33
7.3.1	Usos y Aplicaciones del Concreto Permeable	33
7.3.2	Conclusiones del estado del Arte	39
8.	Metodología Experimental	43
8.1	Introducción	43
9.	Descripción y selección Diseño de Mezcla para el diseño de la mezcla de concreto	44
9.1	Diseño de Mezcla de Concreto permeable	45
10.	Caracterización de los Materiales y Dosificación de Mezclas	52
10.1	Análisis granulométrico del agregado grueso	54
10.2	Densidad y Absorción del Agregado Grueso	55
10.3	Ficha técnica del cemento	56
10.4	Diseño de mezclas de Mezclas del componente experimental.	56
10.5	Dosificación de Materiales	57

11. Resultado y Discusión	63
11.1 Correlación de la Porosidad y la Densidad	64
11.2 Correlación de la Permeabilidad y la Resistencia a Compresión	66
11.3 Evaluar experimentalmente el comportamiento físico y mecánico de un concreto permeable con áridos reciclados y naturales	69
11.4 Resultados Permeabilidad Vs. Resistencia a la compresión simple.	72
12. Análisis de los Resultados obtenidos y sus usos.	76
12.1 Sistemas de drenajes para recolección de aguas pluviales	78
12.2 Sistemas de drenajes recolección de aguas pluviales en pavimentos de concreto permeable	78
12.3 Sistemas de drenajes de recolección de agua pluvial en estructura de paso de concreto permeable en terreno inclinado	79
12.4 Procesos de Colocación	79
13. Conclusiones y Recomendaciones	83
13.1 Conclusiones	83
13.2 Recomendaciones	86
14. Bibliografía.	91

1. Lista de Figuras

	Pág.
Figura 7-1: cemento de uso general argos. (elaboración propia).....	13
Figura 7-2: Agregado grueso Unal (elaboración propia).....	14
Figura 7-3: Permeámetro de cabeza constante [12].....	18
Figura 7-4: Permeámetro de cabeza variable [12]	19
Figura 7-5: Agregado reciclado de bloque de concreto. (elaboración propia).....	20
Figura 7-6: Distribución de los residuos convencionales dispuestos por los establecimientos industriales según tipo de residuo.[15].....	21
Figura 7-7: Mapa de densidad de palabras clave para la ecuación de búsqueda 8 (VOSviewer, 2020)	28
Figura 7-8: Producción de número de artículos científicos por países a nivel mundial (Scopus, 2020)	29
Figura 7-9: Producción de artículos por año sobre concreto permeable utilizando agregado reciclado. (scopus, 2020)	29
Figura 7-10: Autores en función de los artículos producidos. (scopus,2020).....	30
Figura 7-11: Concreto permeable en vías [43]	34
Figura 7-12: Concreto permeable decorativo para los juegos olímpicos de 2008, beijing (china). Foto: concrete decor jornal. Vol.10 no.2 feb/marzo 2010.	35
Figura 7-13: Parqueadero de motos universidad nacional sede Medellín. (tomado de: https://medellin.unal.edu.co/direccion-de-ordenamiento-y-desarrollo-fisico/obras-finalizadas.html)	38
Figura 8-1 : Esquema metodológico (elaboración propia).....	44

Figura 9-1: Valores máximos y mínimos de la relación a/c de cada metodología. (elaboración propia).....	51
Figura 9-2 : Valores máximos y mínimos de la resistencia a compresión de cada metodología. (elaboración propia)	51
Figura 9-3 : Valores máximos y mínimos de la permeabilidad de cada metodología. (elaboración propia).....	51
Figura 10-1 : Cilindros del proyecto ocre arconsa. Fuente: Edinson murillo	52
Figura 10-2 : Cimex Universidad Nacional sede Medellín. (elaboración propia).....	53
Figura 10-3 : Agregado pétreo utilizado (elaboración propia).....	53
Figura 10-4 : Granulometría agregado reciclado de cilindros de concreto sin ajustar (elaboración propia).....	54
Figura 10-5 : granulometría agregado natural (elaboración propia)	55
Figura 10-6 : Gravedad específica y absorción para los Agregados	55
Figura 10-7 : Relación entre contenido de vacíos y la resistencia a la compresión a los 28 días para tamaños de agregados N° 67 Y N° 8 (ACI 522 R-10)	60
Figura 10-8 : Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregado N° 8. (ACI 522 R-10)	61
Figura 11-1 : Porosidad vs Densidad para diferentes relaciones agua cemento.....	65
Figura 11-2 : Porosidad vs Densidad para diferentes tamaños máximos de partícula.....	66
Figura 11-3 : Permeabilidad vs resistencia a la compresión para diferentes relaciones agua cemento (a) a/c = 0,26, (b) a/c = 0,30, (c) a/c = 0,35	68
Figura 11-4 : Permeabilidad vs Resistencia a la compresión para diferentes relaciones agua cemento (a) TMN = 9,5 mm, (b) TMN = 12,5 mm, (c) TMN = 19,5 mm.	68
Figura 11-5 : Porosidad vs permeabilidad; (a) fabricado con agregado natural (AN), (b) fabricado con agregado reciclado (AR)	71
Figura 11-6 : Permeámetro de cabeza constante (elaboración propia)	72
Figura 11-7 : Permeabilidad vs resistencia a la compresión; (a) fabricado con agregado reciclado (AR), (b) fabricado con agregado natural (AN).....	75
Figura 12-1 : Zanja rellena de roca bajo el pavimento. [43]	78
Figura 12-2 : Zanja de roca a lo largo del borde del pavimento. [43]	78
Figura 12-3 : Elevación y vista en planta de la instalación inclinada [43]	79
Figura 12-4 : Transporte y colocación de concreto permeable. [43].....	80
Figura 12-5 : Colocación y consolidación. [43]	81
Figura 12-6 : Juntas de dilatación y acabado. [43].....	81
Figura 12-7 : Curado y Protección. [43]	82

2. Lista de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 7-1: Ecuación de Darcy [12]	17
Ecuación 7-2: Coeficiente de permeabilidad [12]	17
Ecuación 7-3: Coeficiente de Permeabilidad [12]	18
Ecuación 7-4: Relación de permeabilidad, la viscosidad y el peso específico. [12]	19
Ecuación 7-5: Permeabilidad en función de la relación de las viscosidades.	19
Ecuación 10-1: Peso unitario seco compactado (ACI 522 R-10)	59
Ecuación 10-2: relación entre valor efectivo y peso del agregado (ACI 522 R-10)	59
Ecuación 10-3: Peso del agregado grueso (ACI 522 R-10)	59
Ecuación 10-4: Peso del agregado superficialmente seco (aci 522 r-10)	60
Ecuación 10-5: Volumen de pasta de cemento (ACI 522 R-10)	62
Ecuación 11-1: Ecuación de Densidad. [7]	70
Ecuación 11-2 Ecuación de Contenido de Vacíos	70
Ecuación 11-3: Ecuación de porosidad.[40]	70

3. Lista de Tablas

Tabla 7-1: Políticas públicas enmarcadas bajo el concepto de economía circular (Elaboración Propia)	22
Tabla 7-2: Generación de RCD a partir de los PGIRS Municipales del AMVA1 [18]	24
Tabla 7-3: Generación de RCD por material y actividad, 2018 (en millones de toneladas)[21]	25
Tabla 7-4: Resumen de los índices de reciclaje de los diferentes residuos	26
Tabla 7-5: Tabla de motor de Búsqueda (elaboración propia)	27
Tabla 7-6: NSR 10 (Elaboración propia)	31
Tabla 7-7: Normas I.N.V.E-13 (elaboración propia)	31
Tabla 7-8: NTC (Elaboración propia)	32
Tabla 7-9: ACI (Elaboración propia)	32
Tabla 7-10: ASTM (Elaboración propia)	33
Tabla 7-11a: Resumen Artículos Relevantes (Elaboración Propia)	40
Tabla 7-12b: Resumen Artículos Relevantes (Elaboración Propia)	41
Tabla 7-13c: Resumen Artículos Relevantes (Elaboración Propia)	42
Tabla 9-1: Cuadro Comparativo sobre metodología de diseño. (Elaboración Propia)	46
Tabla 10-1: Especificaciones del Cemento Argos de uso General	56
Tabla 10-2: Característica de los agregados (elaboración Propia)	58
Tabla 10-3: tabla de referencia Valor efectivo b/b0 (ACI522 R-10)	59
Tabla 10-4 : Resumen valores característicos (elaboración propia)	60
Tabla 10-5: Resistencia a la compresión esperada y % de vacíos. (elaboración propia)	61
Tabla 10-6: Características del cemento (elaboración propia)	61
Tabla 10-7: Cantidad de material a utilizar (elaboración propia)	62

Tabla 10-8: Cantidades de material a utilizar ajustadas (elaboración propia).....	62
Tabla 10-9: Cantidad de Materiales para 5 cilindros (elaboración propia).....	63
Tabla 10-10: Dosificación de Mezclas (elaboración propia).....	63
Tabla 11-1: Tabla de valores de las Propiedades obtenidas de los diseños de Mezcla. (elaboración propia).....	74

4. Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área de la muestra (para permeabilidad)	m ²
L	Longitud de la muestra	m o mm
h	Altura	m
k	Coefficiente de Permeabilidad	cm/s
Q	Volumen	m ³
f'c	Resistencia a la Compresión	MPa
E	Módulo de Elasticidad	MPa
h ₁	Altura de columna de agua 1	cm
h ₂	Altura de columna de agua 2	cm
i	Gradiente Hidráulico	adimensional
v	Velocidad de Darcy	cm/s
t	Duración de recolección de agua	s
a	Área de la sección transversal del tubo vertical	cm ²
K	Constante de densidad = 1273240	mm ³ Kg/m ³
D	Diámetro de la muestra	mm
L	Longitud de la muestra	mm
B	Masa sumergida de la muestra	g
ρ _w	Densidad de agua	Kg/m ³
A	Masa seca de la muestra (en la ecuación de densidad)	g
Pe	Peso específico de la masa	Kg/m ³
Pe (sss)	Peso específico de la masa saturado	Kg/m ³
PUS	Peso unitario suelto	Kg/m ³

Símbolo	Término	Unidad SI
PUC	Peso unitario compacto	Kg/m ³
H	Contenido de Humedad	%
a	Absorción	%
PSUS	Peso unitario seco compactado	Kg/m ³
PAG	Peso de agregado grueso	Kg/m ³
Pc	Peso específico del cemento	Kg/m ³
VP	Volumen de Pasta de cemento	m ³
PAG _(sss)	Peso del agregado superficialmente seco	Kg/m ³
k_T	Permeabilidad a una temperatura T	cm/s
$Y_{u(T)}$	Unidad de peso de agua a temperatura T	N/m ³
η_T	Viscosidad del fluido a una temperatura T	Ns/m ²

Abreviaturas

Abreviatura Término

ACI	American Concrete Institute.
ASTM	American Society for Testing and Materials
NTC	Norma Técnica Colombiana
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
NSR-10	Norma Sismo Resistente
AN	Agregado Natural
ARC	Agregado reciclado de concreto
TMN	Tamaño máximo nominal
TMP	Tamaño máximo de partícula
a/c	Relación agua cemento
RCD	Residuo de Construcción y demolición
AR	Agregado reciclado
RC	Residuo de concreto
PGIRS	Plan de gestión integral de residuos solidos

5. Introducción.

El concreto permeable se utilizó por primera vez en el siglo XIX en Europa como pavimento y muros de carga. La eficiencia en el costo fue la principal causa debido a la disminución de la cantidad de cemento. Se aceptó de nuevo en la década de 1920 para casas de dos pisos en Inglaterra y Escocia. Se hizo cada vez más factible en Europa después de la Segunda Guerra Mundial debido a la falta de cemento. Sin embargo, este concreto no fue tan popular en los EE. UU. hasta la década de 1970 [1].

Durante sus primeros días, el concreto permeable se usaba principalmente para soportar la carga, hecho in-situ, exterior y muros de contención, y como subbase para las placas de concreto convencionales. [2]. Para dichos usos, La permeabilidad fue una de las mayores desventajas junto con la baja resistencia a la compresión y la flexión, pero igual, también tenía algunos beneficios que se conservan en la actualidad tales como: economía de material en comparación con el concreto convencional (sin finos, menos cemento, menos agua), ya que al no tener finos y menos cemento el costo de los materiales disminuye, menor contracción debido a los finos, menor peso unitario, y mayores valores de aislamiento térmico debido al mayor contenido de vacío, lo que le permite ser usado hoy en día sobre todo en pavimentos.[3]

La capacidad del concreto permeable ofrece ventajas al medio ambiente, a los organismos públicos y a los propietarios de edificios, al permitir controlar las aguas pluviales in-situ y abordar los problemas de escorrentía de las aguas pluviales. Esto puede ser de gran ayuda en las zonas urbanas o donde el terreno es muy difícil de manejar. Dependiendo de los reglamentos locales y del medio ambiente, un pavimento de concreto permeable y su subbase pueden proporcionar suficiente capacidad de almacenamiento de agua para eliminar la necesidad de estanques de retención, cunetas, entre otras. [4]

El concreto permeable también es utilizado en áreas de estacionamiento, lugares con pocos visitantes, invernaderos, en los pasillos peatonales y en calles residenciales. Es una apuesta vital para la producción sostenible y es ciertamente una de las muchas estrategias de desarrollo de bajo efecto utilizadas por los constructores para proteger el agua de alta calidad y disminuir la escorrentía. [4] [5]

Por otra parte, el uso de agregado de concreto reciclado evita que el material de desperdicio termine en los vertederos y reduce la necesidad de extraer materias primas de las fuentes de agregado naturales, proporcionando una sostenibilidad en los procesos constructivos y contribuyendo con el medio ambiente.

Algunos estudios realizados sobre el uso del concreto reciclado, han demostrado que los agregados en las mezclas de concreto permeable indican muy poca o ninguna pérdida de resistencia a la compresión, pues la mayor de las preocupaciones de usar agregado de concreto reciclado están asociadas con el concreto estructural, donde si es fundamental la resistencia, a diferencia del concreto permeable, que si bien la resistencia es importante, lo es mucho más la permeabilidad.[5] [6]

El concreto reciclado se ha utilizado como agregado en el concreto nuevo y como base bajo pavimento. El concreto reciclado es simplemente un viejo pavimento triturado o concreto estructural. Las propiedades y el rendimiento del nuevo concreto dependen de la calidad y de la fuente del original concreto antes de ser reciclado. En el marco de referencia se hace alusión al panorama nacional e internacional de la producción y consumo del agregado reciclado.

6.Planteamiento del Problema

El concreto permeable es un tipo de concreto altamente poroso, ya que al mezclarse con poco o ningún material fino permite el paso de altos volúmenes de agua hacia el suelo por medio de una filtración natural (ACI Committee 522, 2010). En algunos estudios, los cuales se presentan más adelante, se ha abordado la fabricación de concreto permeable con agregado reciclado proveniente de diferentes tipos de materiales como por ejemplo de bloques de concreto, cilindros de prueba, demolición de vivienda, entre otros, obteniendo resultados aceptables con unos, y no tan aceptables para otros, de acuerdo con la especificación que este exige. Por lo tanto, la adición de agregado reciclado cilindros de concreto específicamente en la fabricación de concreto permeable, abordaría una solución a la producción de residuos de construcción y demolición, y ayudaría a evacuar el agua lluvia. Además, al estar utilizando con material reciclado, lo convertiría en un producto respetuoso con el medio ambiente. Pero antes de su

implementación habría que revisar sus propiedades mecánicas y permeabilidad para determinar su utilidad, lo que llevaría a plantearse una Pregunta de Profundización referida a continuación.

6.1 Pregunta de Profundización

¿Cómo modifica la adición de residuos de concreto (RC) como agregado grueso las propiedades en estado fresco y endurecido frente a cargas estáticas y dinámicas en un concreto permeable?

6.2 Objetivos

6.2.1 Objetivo General:

Evaluar en mezclas de concreto permeable, el efecto de la adición de residuos de concreto (RC) como agregado grueso, provenientes de cilindros de concreto triturados, en las propiedades en estado endurecido y su colocación. (contrastado con la literatura)

6.2.2 Objetivos Específicos:

- Determinar la metodología adecuada para el diseño de una mezcla de concreto permeable con agregado de residuo de concreto (ARC). a partir de la literatura.
- Correlacionar según la literatura la porosidad y la densidad, en los concretos permeables, elaborados con adición de agregado de residuo de concreto (ARC) en la mezcla.
- Correlacionar de acuerdo con la literatura la resistencia a compresión y la permeabilidad fabricados con adición de agregado de residuo de concreto (ARC) en mezclas de concreto.
- Relacionar de acuerdo a la literatura las propiedades en estado plástico y endurecido, de los concretos permeables fabricados, con los usos y los procesos de colocación.

- Evaluar experimentalmente el comportamiento físico y mecánico de un concreto permeable con áridos reciclados provenientes de una industria antioqueña.

7. Marco de Referencia

Este capítulo hace referencia al marco de referencia, que a su vez está compuesto por el marco teórico general, donde se describen las ecuaciones de búsqueda que se utilizaron para construir el estado del arte, así como los conceptos que se usaron en el trabajo. También la revisión del panorama nacional e internacional del concreto permeable y el agregado reciclado, así como ensayos y pruebas de laboratorio que se le realizaron al concreto permeable. Se presenta el marco normativo donde se describen las normas vigentes a nivel nacional e internacional que se aplican para el concreto permeable y convencional. Además, se incluye el estado del arte, donde se muestra un panorama general de lo que se está haciendo a nivel local e internacional de concreto permeable con agregado reciclado.

7.1 Marco teórico.

7.1.1 Conceptos Generales.

El concreto permeable es descrito por la ACI como "material de grado abierto, sin asentamiento, que está compuesto por cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua" (ACI 2019). Otros nombres comunes para el concreto permeable son concreto poroso o concreto sin finos. El concreto permeable se ha introducido en la construcción con más fuerza recientemente y se ha hecho popular como un sistema de pavimentación debido al movimiento "verde", Es decir, desde la economía circular y el reciclaje de los materiales hasta otros retos medioambientales relacionados con la seguridad de los materiales y la fabricación. Se han producido importantes avances en este ámbito, con un número creciente de trabajos que abarcan diversos aspectos medioambientales, como la economía circular, el reciclaje y la evaluación del ciclo de vida de los materiales. Este aumento se debe a la importancia que los científicos, la industria, el gobierno y la sociedad están dando ahora a estos temas. Los concretos permeables se utilizan más a menudo para resolver la escorrentía de aguas pluviales y para reducir el efecto de isla de calor.[7]

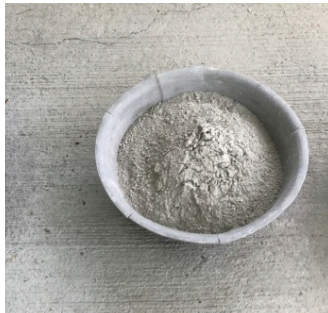
En los últimos 10 años, de acuerdo con la literatura se han realizado investigaciones con diferentes mezclas de concreto permeables y se han analizado sus propiedades. En general, a mayoría de los investigadores consultados en los artículos encontrados en la literatura (tabla 8-11a y 8-11b), están de acuerdo en que el diseño óptimo para el concreto permeable se hace con un agregado de 3/4" a 3/8", 15 a 35% de vacíos y poros de 0,08 a 0,32 pulg. [3]. Se debe tener cuidado al determinar la relación agua cemento (a/c) dado que si se le adiciona poca agua se verá afectada la resistencia a la compresión, y con demasiada agua, la pasta de cemento se regará y se asentará creando una fuerza desigual en el espécimen, y obstruyendo los vacíos en la parte inferior, y posiblemente creando concreto impermeable. . [8]

7.1.2 Materiales del Concreto Permeable

7.1.2.1 Cemento

Al igual que en el hormigonado tradicional, en el concreto permeable pueden utilizarse cementos portland (ASTM C 150, C 1157) y cementos mixtos (ASTM C 595, C 1157). [9]. Además, pueden utilizarse materiales cementantes suplementarios, como las cenizas volantes (puzolanas) (ASTM C 618), así como la escoria de alto horno granulada molida (ASTM C 989). Se recomienda, de acuerdo a [9], que los materiales se sometan a pruebas para poder determinar las propiedades que pueden ser importantes para el rendimiento (tiempo de fraguado, tasa de desarrollo de la resistencia, porosidad y permeabilidad, entre otras).

Figura 7-1: cemento de uso general argos. (elaboración propia)



7.1.2.2 Agregado

El contenido de agregado fino se limita en el concreto permeable y el agregado grueso se mantiene. Las gradaciones de agregado grueso comúnmente utilizadas de acuerdo con la literatura consultada incluyen ASTM C 33 No. 67 (3/4 pulg. a No. 4), No. 8 (3/8 pulg. a No. 16), o No. 89 (3/8 pulg. a No. 50) tamices [en unidades métricas: No. 67 (19,0 a 4,75 mm), No. 8 (9,5 a 2,36 mm), o No. 89 (9,5 a 1,18 mm), respectivamente]. Agregado de un solo tamaño hasta 1 pulg. (25 mm). También se puede utilizar la norma ASTM D 448 para definir las clasificaciones. [9]

Figura 7-2: Agregado grueso Unal (elaboración propia)



7.1.2.3 Agua

De acuerdo a la literatura estudiada [9] se utilizan normalmente relaciones de agua/cemento (a/c) entre 0,27 y 0,35 con la inclusión adecuada que ayuden a aumentar las propiedades mecánicas como la resistencia. También se ha se han utilizado con éxito proporciones entre 0,34 y 0,40, sin el uso de aditivos. La relación entre la resistencia y la relación agua/cemento no está clara en el caso del concreto permeable, pues a diferencia del concreto convencional, el contenido total de pasta es menor que el contenido de vacíos entre el agregado y la pasta.

7.1.2.4 Aditivos

A pesar de que en esta investigación no se emplearán aditivos, es necesario aclarar que, de acuerdo con la literatura investigada, los aditivos químicos se utilizan en el concreto permeable para mejorar sus propiedades mecánicas, tal como se hace en el concreto convencional. [9]

Debido al rápido tiempo de fraguado asociado al concreto permeable, se utilizan comúnmente retardadores o mezclas de aditivos estabilizadores de la hidratación. El uso de aditivos químicos debe seguir estrictamente las recomendaciones del fabricante.

7.1.3 Propiedades Físicas del Concreto permeable.

7.1.3.1 Propiedades en estado Fresco

7.1.3.1.1 Asentamiento

En general el asentamiento para el concreto permeable es cero, sin embargo, se han usado valores en el rango de 20 a 50mm. La prueba del asentamiento que se puede realizar de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 396 (Norma de referencia ASTM C143, prueba que se considera para fines de control de calidad, de modo que como en el caso del concreto convencional, sólo se considera el resultado como un valor de referencia, debido principalmente a que la mezcla es demasiado rígida y la medición del asentamiento en la mayoría de los casos no es aplicable. [6]

7.1.3.1.2 Peso Unitario

El peso unitario del concreto permeable es del orden del 70% del concreto convencional. Su determinación se hace de acuerdo con lo especificado en la ASTM C1688. 15. [6]

7.1.3.1.3 Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado se reduce en el concreto permeable con respecto al concreto convencional, por lo que en algunos casos se deben usar aditivos químicos para permitir la adecuada colocación.[6]

7.1.3.2 Propiedades en estado endurecido.

7.1.3.2.1 Porosidad

La porosidad es una medida de los espacios vacíos entre los agregados. La condición para que un concreto sea permeable es que el contenido de vacíos sea mayor al 15%. [6]

7.1.3.2.2 Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto permeable pueden desarrollar resistencias a la compresión en el rango de 500 psi a 4000 psi (3,5 MPa a 28 MPa), lo que es adecuado para una amplia gama de aplicaciones. Un valor típico es de 2500 psi (17 MPa). Como con cualquier concreto, las propiedades y combinaciones de materiales específicos, así como las técnicas de colocación y las condiciones ambientales, dictarán la resistencia real en el lugar de aplicación. La resistencia a compresión del concreto permeable se ve afectada principalmente por la proporción de la matriz y el esfuerzo de compactación sección transversal agregado material cementante vacío.[10]

7.1.3.2.3 Resistencia a la Flexión

La resistencia a la flexión de los concretos permeables varía generalmente entre 150 psi (1 MPa) y 550 psi (3,8 MPa). Hay muchos factores que influyen en la resistencia a la flexión, en particular el grado de compactación, la porosidad y la relación agregado: cemento (a/c). Sin embargo, la aplicación típica construida con concreto permeable no requiere la medición de la resistencia a la flexión para el diseño.

7.1.3.2.4 Permeabilidad

También conocida como propiedad hidráulica, de acuerdo con Torghroli, [3], la permeabilidad es la capacidad que tiene un material para que un fluido sea capaz de atravesar por medio de él sin alterar su estructura. El concreto es un material permeable, es decir que al estar sometido a presión de agua exteriormente se produce escurrimiento a través de su masa. El rango de permeabilidad de este concreto depende de su constitución, generalmente varía de 80 a 720 litros/min/m².

Según la Norma del Comité ACI 522R-10 la capacidad filtrante va del rango de 80lt/min/m² a 730 lt/min/m² [11]. Para evaluar la permeabilidad a través de la medición de su coeficiente de permeabilidad "k", se utiliza un permeámetro de cabeza variable, de acuerdo a la recomendación de ACI 522R-10 [10].

Esta constante de permeabilidad, también conocida como conductividad hidráulica, se calcula basada en la Ley de Darcy [12]: en 1856, Henri Philibert Gaspard Darcy publicó una ecuación empírica simple para la velocidad de descarga del agua a través de los

suelos saturados. Esta ecuación se basa principalmente en las observaciones que Darcy hace sobre el flujo de agua a través de arenas limpias y se da como:

Ecuación 7-1: Ecuación de Darcy [12]

$$v = ki$$

v: velocidad de descarga, que es la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo a través de un área de sección transversal unitaria bruta de suelo en ángulo recto con la dirección del flujo

k: conductividad hidráulica (también conocida como coeficiente de permeabilidad)

Ahora bien, para determinar la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad del suelo se utilizan dos pruebas de laboratorio estándar: la prueba de carga constante y la prueba de caída de carga o carga variable. La prueba de carga constante se utiliza principalmente para suelos de grano grueso. Sin embargo, para suelos finos las velocidades de flujo a través del suelo son demasiado pequeñas y, por lo tanto, se prefieren las pruebas de caída de carga o carga variable. *i*: gradiente hidráulico que se define como $\frac{\Delta h}{L}$. A continuación se da una breve descripción de cada una.[12]

Prueba de carga constante

En la figura 7-3 se muestra una disposición típica de la prueba de permeabilidad de carga constante. En este tipo de configuración de laboratorio, el suministro de agua a la entrada se ajusta de tal manera que la diferencia de la carga entre la entrada y la salida se mantiene constante durante el periodo de prueba. Después que se estableció una velocidad de flujo constante, el agua se colecta en un matraz graduado para una duración conocida.

El índice de permeabilidad “k” de la muestra se puede hallar mediante la ecuación:

Ecuación 7-2: Coeficiente de permeabilidad [12]

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

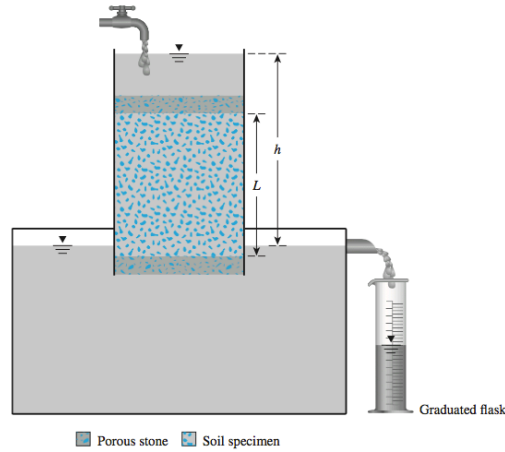
Donde

A: área de la sección transversal de la muestra de suelo

t: duración de la recolección de agua

L: longitud de la muestra

Q: Volumen de la Muestra

Figura 7-3: Permeámetro de cabeza constante [12]

Prueba de caída de carga o Carga variable

En la Figura 7-3. se muestra una disposición típica de la prueba de permeabilidad de caída de carga o carga variable. El agua de un tubo vertical fluye a través del suelo. Se registra la diferencia inicial de carga, h_1 , en el tiempo t_0 , y se permite que el agua fluya a través de la muestra de suelo de tal manera que la diferencia final de carga en el tiempo $t = t_2$ es h_2 .

El índice de permeabilidad "k" de la muestra se puede hallar mediante la ecuación:

Ecuación 7-3: Coeficiente de Permeabilidad [12]

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

Donde

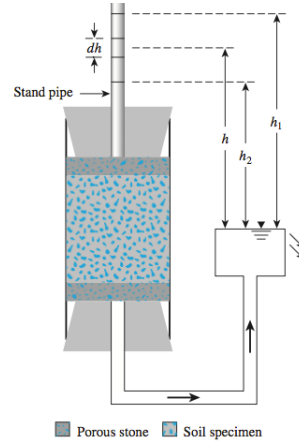
a : área de sección transversal del tubo vertical

A : área de sección transversal de la muestra de suelo

t : duración de la recolección de agua

L : longitud de la muestra

Q : Volumen de la Muestra

Figura 7-4: Permeámetro de cabeza variable [12]

Es habitual expresar el valor de la permeabilidad k a una temperatura de 20°C . Dentro del rango de temperaturas de ensayo, suponiendo $\gamma_{u(T_1)} \cong \gamma_{u(T_2)}$ que Así, a partir de la ecuación:

Ecuación 7-4: Relación de permeabilidad, la viscosidad y el peso específico. [12]

$$\left(\frac{k_{(T_1)}}{k_{(T_2)}}\right) = \left(\frac{\eta_{(T_2)}}{\eta_{(T_1)}}\right) \left(\frac{\gamma_{u(T_1)}}{\gamma_{u(T_2)}}\right)$$

$k_{(T_1)}, k_{(T_2)}$ = permeabilidad a temperaturas T_1 y T_2 , respectivamente

$\eta_{(T_1)}, \eta_{(T_2)}$ = viscosidad del fluido a temperaturas T_1 y T_2 , respectivamente

$\gamma_{u(T_1)}, \gamma_{u(T_2)}$ = unidad de peso de agua a temperaturas T_1 y T_2 , respectivamente

Se obtiene:

Ecuación 7-5: Permeabilidad en función de la relación de las viscosidades.

[12]

$$k_{20^\circ\text{C}} = \left(\frac{\eta_{T^\circ\text{C}}}{\eta_{20^\circ\text{C}}}\right) k_{T^\circ\text{C}}$$

Los valores típicos de la permeabilidad para muestras saturadas están en el rango de 100 cm/s a 0.001 cm/s. por otra parte la relación $\frac{\eta_{T^\circ\text{C}}}{\eta_{20^\circ\text{C}}}$ puede variar entre 1.135 y 0.797 para una variación de la temperatura entre 15°C y 30°C .

7.1.4 Agregados Reciclados.

“La economía circular se implementa como la nueva alternativa eficaz que propone responder y satisfacer las necesidades básicas humanas y del ecosistema a partir de las 6 R, las cuales se conocen como: Reducir, Reutilizar, Reciclar, Redefinir, Revalorizar y Redistribuir. El objetivo principal de esta economía reside sobre la reducción del uso de materias primas por la producción de los desechos.”[13]

Figura 7-5: Agregado reciclado de bloque de concreto. (elaboración propia)



Para diseñar e implementar la economía circular directamente asociada específicamente a la construcción, es necesario contemplar diferentes perspectivas que permitan a la misma analizar e identificar los materiales referentes al sistema energético y al proceso resultante de las materias primas, para lo cual se deberá identificar dentro del marco el tipo de residuo y la clasificación de los aprovechables y no aprovechables, de igual manera es preciso evaluar la viabilidad técnica y económica referente a la estrategia de economía circular.[13].

Panorama general en Colombia

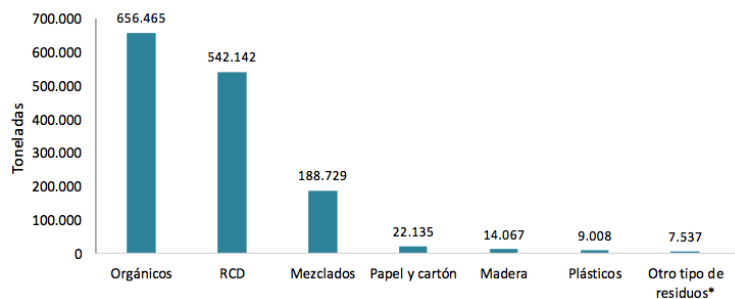
Según el decreto 1713 de 2002, por medio del cual se reglamenta la gestión integral de residuos sólidos en Colombia, los escombros pueden ser definidos como todo residuo sólido sobrante de las actividades de la construcción, reparación o demolición de obras civiles o de otras actividades conexas, complementarias o análogas. Basándose en este concepto y en la procedencia de los escombros, surge la sigla RCD (residuo de construcción y demolición), que incluye en su definición la procedencia del ya conocido residuo sólido. Para el propósito de este trabajo, el término: escombro, siempre podrá ser entendido como RCD, y viceversa.[14]

Es preocupante saber que en Colombia se le apunta a la economía circular y hay toda una normativa sobre el tratamiento de los materiales reciclados y residuos de construcción y demolición (RCD), la cual se ilustra en la Tabla 7-1, pero aun los índices de reciclaje en el país no aumentan de forma considerable, algo que sin duda alguna ayudaría a disminuir la contaminación ambiental, más aún cuando las cifras de RCD son altas, tal como lo indican las estadísticas del DANE.

“Durante el año 2018 los establecimientos industriales generaron 9´080.533 toneladas de residuos convencionales (escombro de concreto, bloques, ladrillos, etc.) de los cuales dispusieron aproximadamente 1.440.085 toneladas. Es decir, que solo 15,9% del total generado es dispuesto entre reutilización, reciclaje, compostaje (residuos orgánicos), combustible para calderas, venta, donación y almacenamiento”[15]; mientras que el 84,1% restante se encuentra sin aprovechamiento, por lo tanto contribuyendo a la contaminación ambiental.

Los residuos clasificados como orgánicos representaron la mayor proporción de residuos dispuestos, 45,6%, seguido por los residuos de construcción y demolición con 37,6%, y los residuos mezclados con 13,1%. [15]

Figura 7-6: Distribución de los residuos convencionales dispuestos por los establecimientos industriales según tipo de residuo.[15]



Con aproximadamente el 6% de RCD que se genera Colombia, se hace necesario pensar en reutilizar todos estos escombros de construcción como agregados para nuevos materiales, dada la gran oferta de materia primas en el país, pues alrededor del mundo, múltiples investigaciones han mostrado que estos pueden sustituir de forma satisfactoria en muchos casos a los agregados naturales [2]. De esta manera se contribuye a disminuir el impacto negativo de estos materiales en el medio ambiente, con políticas enmarcadas hacia la economía circular, pues además ya se cuenta con un marco legal en Colombia (ver Tabla 7-1), [16].

**Tabla 7-1: Políticas públicas enmarcadas bajo el concepto de economía circular
(Elaboración Propia)**

<i>Año</i>	<i>Norma</i>	<i>Entidad</i>	<i>Descripción</i>
2018	Resolución 0463	Unidad de Planeación Minero-Energética	Se establece el procedimiento para conceptuar sobre los proyectos de eficiencia energética/gestión eficiente de la energía que se presenten para acceder a los beneficios tributarios sobre el IVA y/o la renta
2017	Resolución 0472	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RCD y se dictan otras disposiciones
2016	Decreto 0596	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Define el esquema operativo de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y el régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio, y se dictan otras disposiciones
2015	Decreto 1076	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible, que compila normas reglamentarias preexistentes
2015	Resolución 0549	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Reglamenta los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la Guía para el Ahorro de Agua y Energía en Edificaciones
2015	Decreto 1285	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Decreto único reglamentario del sector vivienda, ciudad y territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones
2013	Decreto 2981	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Reglamenta la prestación del servicio público de aseo
2012	Resolución 1414	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se crea el Comité Interno del Sello Ambiental Colombiano del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
2009	Decreto 3695	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Reglamenta la ley 1259 de 2008 y se dictan otras disposiciones
2008	Ley 1259	Congreso de Colombia	Por medio del cual se instaure en el territorio nacional la aplicación del compar ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones
2008	Resolución 0542	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Establece el procedimiento de autorización a organismos de certificación para otorgar el derecho de uso del sello ambiental colombiano y se dictan otras disposiciones
2005	Resolución 1555	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Por la cual se reglamenta el uso del Sello Ambiental Colombiano
2004	Decreto 3266	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Se crea la dirección de licencias, permisos y tramites ambientales del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial

Las obras civiles, en la mayoría de las etapas constructivas, generan escombros, residuos de materiales de diferentes tamaños (virutas, polvillo de corte, piezas de cerámica, etc.), residuos tóxicos y algunos contaminantes orgánicos que son conocidos como residuos de construcción y demolición (RCD). Estos residuos han de ser correctamente tratados para minimizar la contaminación y potenciar su aprovechamiento, y así favorecer el entorno social y el medio ambiente.

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [14], en Colombia se producen anualmente más de 0,5 millones de toneladas de residuos de construcción, lo que corresponde a un 6 % de la generación total anual de residuos en el país. Además, señala que el 20 % de los materiales empleados en obra se desperdician. Así, es posible evidenciar el problema actual que enfrenta el país respecto a los RCD y la necesidad de tomar medidas para reducir el impacto ambiental, social y económico que generan en la sociedad.[16]

Dada la cantidad de residuos de construcción y demolición es posible crear a partir de estos, materia prima renovable, que genere un impacto positivo en el medio ambiente, contrarrestando el impacto ambiental negativo que genera la elaboración de un material tan usado extensivamente como el concreto, el cual requiere materias primas no renovables, las cuales a su vez generan contaminación y deterioro de medio ambiente al ser obtenidas principalmente mediante minería a cielo abierto. [17]

“En tal sentido, la ciudad de Medellín y Colombia se ve afectada por la explotación de canteras para la obtención de agregados, teniendo como consecuencia una degradación ambiental de la corteza terrestre urbana, material particulado en la atmósfera y, derivado de los procesos de demolición y edificación, disposición de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en lotes que pierden su potencial como paisaje o áreas urbanizables.” [17]

Por otra parte, “según la información reportada en los PGIRS (Plan de gestión integral de residuos sólidos) de los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la generación anual de Residuos de la construcción y demolición proyectada para el año 2016 fue de 6208 toneladas por día (ver tabla 7-2). Es de anotar que el problema es mayor de lo que parece, pues solo los municipios de Medellín e Itagüí reportan generación de RCD”. [18]

Tabla 7-2: Generación de RCD a partir de los PGIRS Municipales del AMVA1 [18]

AÑO	Barbosa Cód. 079	Girardota Cód. 308	Copacabana Cód. 212	Bello Cód. 088	Medellín Cód. 001	Itagüí Cód. 306	Envigado Cód. 266	Sabaneta Cód. 631	La Estrella Cód. 380	Caldas Cód. 129	TOTAL (Ton/mes)	TOTAL (Ton/día)
2015	NR	NR	26	31	186.000	1.215	264	NR	73	131	187.479	6.164
2016	NR	NR	NR	NR	187.625	1.204	NR	NR	NR	NR	188.829	6.208
2017	NR	NR	NR	NR	192.557	1.193	NR	NR	NR	NR	193.750	6.370
2018	NR	NR	NR	NR	195.055	1.182	NR	NR	NR	NR	196.236	6.452
2019	NR	NR	NR	NR	203.946	1.171	NR	NR	NR	NR	205.117	6.744
2020	NR	NR	NR	NR	216.972	1.160	NR	NR	NR	NR	218.132	7.171
2021	NR	NR	NR	NR	229.022	NR	NR	NR	NR	NR	229.022	7.529
2022	NR	NR	NR	NR	219.419	NR	NR	NR	NR	NR	219.419	7.214
2023	NR	NR	NR	NR	211.384	NR	NR	NR	NR	NR	211.384	6.950
2024	NR	NR	NR	NR	222.400	NR	NR	NR	NR	NR	222.400	7.312
2025	NR	NR	NR	NR	206.438	NR	NR	NR	NR	NR	206.438	6.787

“Con una generación de este tipo de residuos de 8000 t/día (AMVA; 2010), y una actividad extractiva que degrada el ecosistema urbano, esta colectividad que supera los 2.400.000 habitantes experimenta un daño creciente de su ecosistema urbano, ya que, para obtener una tonelada de agregados para concreto, es necesario remover varias toneladas de suelo superficial, anulando allí la actividad biótica. Por ello las exigencias que se reclaman desde la industria de la construcción en la actualidad, obligan el desarrollo de nuevas herramientas de gestión que permitan potenciar los recursos, principalmente en países en donde la inversión es limitada”. [17]

Aunque la generación de RCD haya disminuido en comparación con años anteriores, de acuerdo con la investigación de Bedoya y Dzul, 2015, se hace necesario una implementación adecuada de las políticas establecidas para el manejo de residuo de construcción y demolición, de tal forma que se contribuya a la economía circular y así mismo al cuidado y preservación del medio ambiente.

Los áridos reciclados procedentes de la construcción y residuos de demolición, es decir, los agregados reciclados, se obtienen triturando el concreto de desecho y luego, la fracción gruesa de los agregados triturados pueden utilizarse para sustituir a los agregados gruesos naturales en el proceso de producción de concreto. Las ventajas y desventajas del uso de los áridos reciclados han sido ampliamente estudiadas[19].

Se ha demostrado que el comportamiento mecánico no cambia significativamente en los concretos con una sustitución del 50%, y hasta del 75% de sus agregados naturales por los reciclados. A pesar de presentar una densidad menor y una mayor absorción que los

áridos naturales, es factible hacer concretos permeables con buen comportamiento mecánico, mezclando la cantidad adecuada de cada componente del concreto.[19]

Por otro lado, el uso de agregados reciclados tiene un impacto ambiental significativo ya que se explotan menos recursos naturales y se pueden utilizar residuos de la industria de la construcción. En el proceso de trituración, hay una fracción fina remanente que puede ser incorporada durante la elaboración del concreto para reemplazar parte de los agregados finos naturales[20].

Panorama Internacional

En Estados Unidos en 2018, se generaron 600 millones de toneladas de desechos de Construcción y demolición RCD, distribuidos de la siguiente manera: los residuos de concreto con un 67,5 % son la mayor parte; seguidos por los residuos del concreto asfáltico con un 17,8 %; luego los productos de madera constituyeron el 6,8 %; y por último otros productos representaron el 7,9% combinado. En la Tabla 8-3 se muestra la generación de los residuos de construcción y demolición de los EEUU.[21]

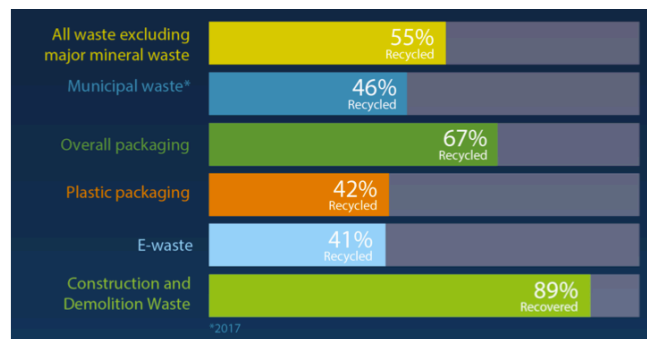
Tabla 7-3: Generación de RCD por material y actividad, 2018 (en millones de toneladas)[21]

	Residuos de Construcción	Escombros de demolición	Total Construcción y Escombros
Concreto	24,2	381,0	405,2
Productos de Madera	3,4	37,4	40,8
Drywall y Yesos	3,9	11,3	15,2
Acero	0,0	4,7	4,7
Ladrillos y Baldosas de Arcilla	0,3	12,0	12,3
Teja de Asfalto	1,2	13,9	15,1
Teja de Concreto	0,0	107,0	107,0
Total	33,0	567,3	600,3

Por otro lado, las tasas de reciclaje y el uso de materiales reciclados en la Unión Europea (UE) están creciendo constantemente. En general, la UE recicló alrededor del 55% de todos los residuos, excluyendo los principales residuos minerales en 2016 (en comparación con el 53% en 2010). La tasa de recuperación de residuos de construcción y demolición alcanzó el 89% (2016), mientras que la tasa de reciclaje de residuos de envases superó el 67% (2016, en comparación con el 64% en 2010). La tasa de residuos

de envases de plástico fue más del 42% (2016, en comparación con el 24% en 2005). La tasa de reciclaje de los residuos municipales se situó en el 46% (2017, en comparación con el 35% en 2007), mientras que los residuos de equipos eléctricos y electrónicos como las computadoras, televisores, frigoríficos y teléfonos móviles, donde se incluyen materiales valiosos que pueden recuperarse (desechos electrónicos), alcanzó el 41% en la UE (2016, comparado con el 28% en 2010).[22]

TABLA 7-4: RESUMEN DE LOS ÍNDICES DE RECICLAJE DE LOS DIFERENTES RESIDUOS[22]



Como se puede visualizar en la información suministrada en la tabla 7-4 los residuos de construcción y demolición hacen la diferencia en cantidad respecto a los demás residuos, convirtiéndose de esta manera en uno de los contaminantes más significativos.

De ahí que en la Unión Europea y en Estados Unidos haya políticas encaminadas a minimizar la contaminación producida por los residuos de construcción y demolición (algunas de ellas se muestran en la Tabla 8-1y se menciona más adelante en el marco normativo). Por esta razón es importante dar una mirada a lo que está pasando a nivel internacional y revisar detenidamente las políticas que estos países implementan para adoptar algunas de las políticas implementadas en la economía circular, de modo que la estrategia realmente se implemente y no pase a ser una iniciativa más.

7.1.5 Antecedentes de concreto permeable fabricado con agregado reciclado.

En este capítulo se desarrolla la descripción y el análisis de las metodologías e indicadores desarrolladas en diferentes lugares del mundo para evaluar las propiedades del concreto permeable fabricado con agregado reciclado. Contempla el análisis desde el contexto internacional y, luego, se particulariza este levantamiento de información en Colombia.

Contexto Internacional

En la actualidad en una búsqueda por la medición de la sostenibilidad, y una economía circular bajo sistemas estandarizados, se viene trabajando incansablemente en la industria de la construcción en diferentes lugares del mundo desde hace algo más de 20 años. Inicialmente, Asia, encabezado por China, Europa y Norteamérica, son los principales lugares del mundo en desarrollar estos rankings y ubicarlos en el panorama del aporte de la construcción para el desarrollo sostenible. En estas zonas es donde más se ha investigado en cuanto al desarrollo del concreto permeable utilizando los residuos de construcción y demolición como agregado.

Al hacer una búsqueda en la base de datos de Scopus con las palabras claves (ecuación) se encontró la información registrada en la tabla 8-5.

Tabla 7-5: Tabla de motor de Búsqueda (elaboración propia)

No	Motor de búsqueda	Tipo	Ecuación	No de Resultados
1	Scopus	Todos	Pervious Concrete	1040,00
2	Scopus	Todos	Pervious and recycled	113
3	Scopus	Todos	Pervious Concrete and recycled	100
4	Scopus	Todos	Pervious Concrete and recycled and concrete	102
5	Scopus	Todos	Permeable concrete	1471
6	Scopus	Todos	Permeable concrete and recycled	92
7	Scopus	Todos	Pervious Concrete and recycled or permeable Concrete and recycled	177
8	Scopus	Articulo	Pervious Concrete and recycled or permeable Concrete and recycled	107
9	Scopus	Articulo	Búsqueda seleccionada a partir de la lectura	34

A través del uso del software VOSviewer es posible crear mapas bibliométricos, los cuales son “una representación espacial de un dominio científico, que permiten delimitar diferentes áreas de investigación, con la finalidad de analizar su estructura conceptual y la dinámica de su evolución”[23]. En particular para comprender la estructura conceptual del estudio del concreto permeable en el mundo, se desarrollan mapas de densidad con

base en los resultados obtenidos en algunas de las ecuaciones de búsqueda presentadas con anterioridad.

Así es como los resultados obtenidos en la ecuación de búsqueda número 8 se toman como referencia para el análisis sistemático en el programa VOSviewer, de modo que se hace una lectura completa de los artículos y se descartan aquellos que no cumplen con los objetivos establecidos, es decir, artículos donde se estudiaron específicamente los concretos permeables con adición de agregado reciclado de concreto. Así, la clasificación permite afinar mediante una revisión detallada, primero seleccionando los títulos relacionados de concreto permeable adicionando solo agregado reciclado de concreto, ya que los últimos 107 artículos que arrojó la última ecuación de búsqueda relacionaban agregado reciclado de concreto combinado con otros tipos de agregados como: arcillas, cauchos, conchas de caracol, entre otros. Segundo, se incluyó una revisión de resumen de cada artículo seleccionado de acuerdo con su título, y finalmente, se incluyó una revisión a los materiales utilizados y los resultados, obteniendo finalmente así un total de 34 artículos como insumo para la revisión bibliográfica complementaria.

En términos generales, como se puede apreciar en la Figura 7-8, se puede ver que en materia de investigación relacionada con concreto permeable usando agregado reciclado, el país que más ha aportado es China, con 33% de la producción mundial de artículos científicos de los 107 que arrojó la ecuación de búsqueda 8, seguido de Estados Unidos con 9,3% de la producción mundial, y luego le siguen países como India, Malasia, Australia entre otros. Mientras que de Latinoamérica el que más aporta es Brasil con 4 artículos de los 107, seguido por México con 3, Colombia, Ecuador y Chile con de 2,2 y 1 artículo respectivamente.

Figura 7-7: Mapa de densidad de palabras clave para la ecuación de búsqueda 8 (VOSviewer, 2020)

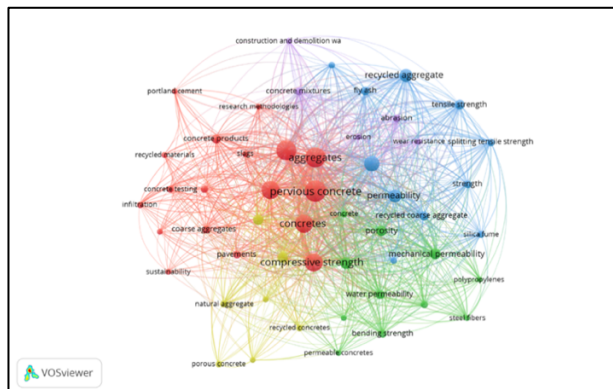
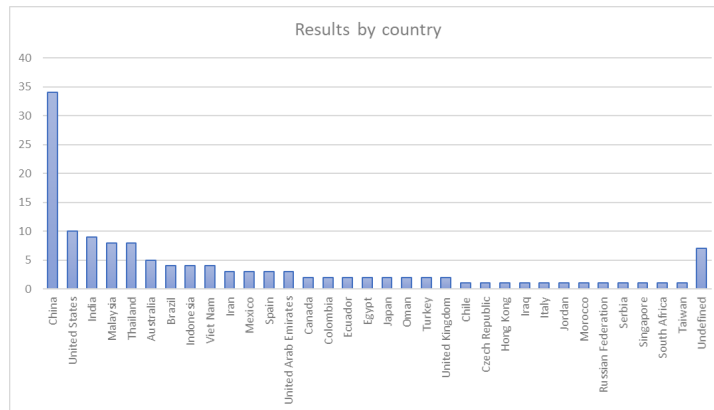
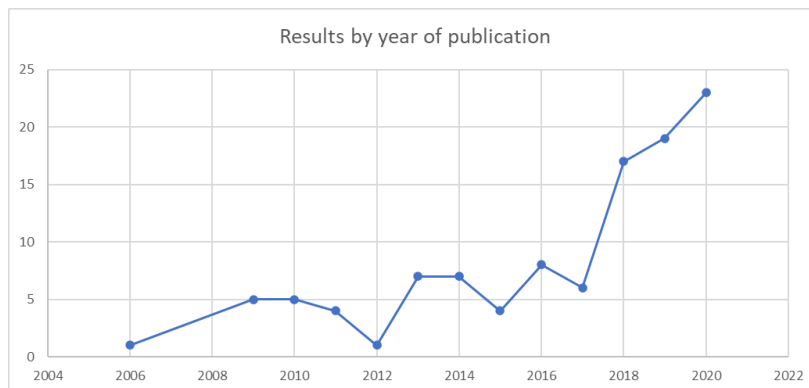


Figura 7-8: Producción de número de artículos científicos por países a nivel mundial (Scopus, 2020)



Hace más de 20 años se viene investigando sobre concreto permeable y agregado reciclado en la Figura 7-9. Se puede observar como en los últimos 8 años ha crecido exponencialmente la producción de artículos científicos sobre concreto permeable utilizando el gradado reciclado como reemplazo del agregado natural. De acuerdo con el comportamiento exponencial de la gráfica artículos vs años se esperaría que la producción artículos, donde se estudien las propiedades mecánicas y físicas, aplicaciones, e implementación del concreto permeable continúe en aumento, algo que sería muy beneficioso para la ciencia, el sector de la construcción y el medio ambiente en particular.

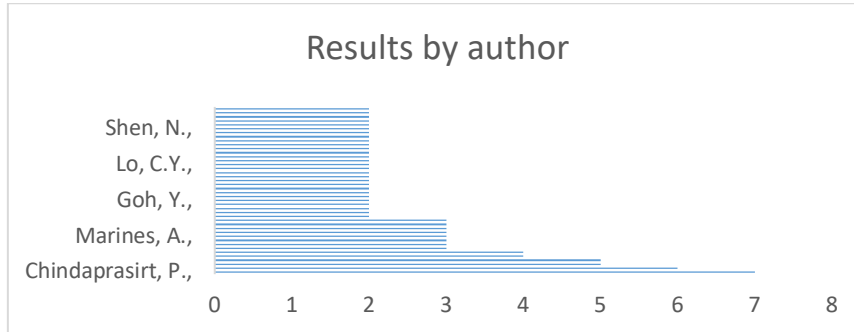
Figura 7-9: Producción de artículos por año sobre concreto permeable utilizando agregado reciclado. (scopus, 2020)



Entre algunos de los autores que más han aportado a la investigación de concreto permeable incluyendo como residuos, no solo de construcción y demolición sino,

también de otros materiales reciclado, ver Figura 7-10, están “Prinya Chindaprasirt” con participación en 7 de los 107 artículos, seguido de “Sata, Vanchai”, con 6 artículos de los 107.

Figura 7-10: Autores en función de los artículos producidos. (scopus,2020)



Contexto Nacional

En el ámbito nacional hay varios trabajos relacionados con concreto permeable y concreto convencional reemplazando el agregado natural por agregado de residuo de construcción y demolición (RCD), y otros tipos de residuo, pero al buscar en la literatura las combinaciones de ambas, es decir concreto permeable utilizando agregado reciclado, es poco lo que se ha investigado del tema.

De acuerdo a la investigación realizada por [7], la resistencia a compresión del concreto permeable con reemplazo del 100% de agregado natural por agregado reciclado, se reduce un 40% por debajo de resistencia a compresión cuando el concreto permeable se elabora con agregado natural. Si se usa solo 50% de agregados reciclados (y 50% de agregado natural), la resistencia a compresión del concreto permeable es un 35% menos. Puesto que el agregado reciclado en general tiene mayor absorción de agua, exige mayor cantidad de parte cementante, influyendo levemente en los valores de la resistencia a compresión obtenidos. Cabe anotar que los valores obtenidos de las resistencias a compresión del concreto permeable obtenidos en la investigación [7], estuvieron por encima de la resistencia establecida por el comité de ACI para el concreto permeable, que establece valores entre 3,5MPa y 28MPa, de acuerdo a su uso. [10]

7.2 Marco Normativo

El Estado del Arte normativo del concreto permeable y convencional sostenible arrojó un panorama interesante en la materia en Colombia respecto al concreto convencional sustentado en la NTC y NSR-10. Sin embargo, en cuanto a concreto permeable, la información es pobre, de modo que es aconsejable mirar además las normas internacionales, tanto en el comité ACI 522R-10, como en la ASTM. Sin embargo, los retos son enormes y complejos, teniendo presente la poca normativa que hay en Colombia y Latinoamérica sobre la elaboración y ensayos del concreto permeable.

En las siguientes tablas 7-6 a 7-10 se indican y describen los ensayos que se pueden hacer a los agregados al concreto permeable e hidráulico.

Tabla 7-6: NSR 10 (Elaboración propia)

NSR 10 – Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010	
Referencia	Descripción
Título A	Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente
Título C	Concreto estructural

Tabla 7-7: Normas I.N.V.E-13 (elaboración propia)

INV 10 – INVIAS 2013	
Referencia	Descripción
INV E-213-2013	Granulometría de Agregado Grueso.
I.N.V.E-217-13	La densidad Bulk (Peso Unitario) y Porcentaje de Vacíos de los Agregados
I.N.V.E-223-13	Densidad, Densidad Relativa (Gravedad específica) y Absorción del Agregado Grueso
I.N.V.E-404-13	El Asentamiento del Concreto
I.N.V.E-402-13	La elaboración y Curado de especímenes de Concreto
I.N.V.E-410-13	La Resistencia a la compresión de Cilindros de Concreto

Tabla 7-8: NTC (Elaboración propia)

NTC - Norma Técnica Colombiana	
Referencia	Descripción
NTC 396	Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.
NTC 174	Concretos. especificaciones de los agregados para concreto
NTC 454	Concreto Fresco. Toma de muestras.
NTC 504	Ingeniería Civil y Arquitectura. Refrendado de especímenes cilindros de Concreto.
NTC 550	Concretos, elaboración y curado de especímenes de concreto en obra.
NTC 3512	Concretos, Requisitos para Cámaras y Cuartos Húmedos Generalidades.
NTC 2871	Concretos, Ensayo Resistencia a la Flexión
NTC 673	Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de Concreto.
NTC 890	Ingeniería civil y Arquitectura. Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto por medio de su resistencia a la penetración
NTC 4025	Concretos. Método de ensayo para determinar el módulo de Elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a Compresión.

Tabla 7-9: ACI (Elaboración propia)

ACI American Concrete Institute	
Referencia	Especificación
ACI 522R-10	Report on Pervious Concrete
ACI 522.1-13	Specification for Pervious Concrete Pavements
ACI 211.3R	Specification for Pervious Concrete of mix design

Tabla 7-10: ASTM (Elaboración propia)

ASTM - American Society for Testing and Materials	
Referencia	Descripción
ASTM C330	Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete
ASTM C567	Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete
ASTM C331	Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units
ASTM C123	Standard Test Method for Lightweight Particles in Aggregate
ASTM C1688/C1688M-12	Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete
ASTM C1701/C1701M-9	Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete
ASTM C1747/C1747M-11	Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion
ASTM C1754/C1754M-11	Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete.

7.3 Estado del Arte.

7.3.1 Usos y Aplicaciones del Concreto Permeable

Chandrappa and Biligiri, [1] en su investigación mencionan la utilización del concreto permeable como carpeta asfáltica en proyectos de vías de pequeñas magnitudes (Figura 7-11), la cual ha cobrado gran importancia en el sector de la construcción, gracias al agarre de los neumáticos en el terreno, debido a que mejora el coeficiente de fricción en mas del 25,7% por la la composición del pavimento.[24], así como el juego que hace este concreto con la naturaleza y su beneficio al medio ambiente. En el artículo en mención se estudian las mejoras de los acabados en los concretos permeables, revisando que haya seguridad y un buen confort, de tal forma que sea satisfactorio para

los usuarios. Para eso se realizaron pruebas de durabilidad mecánica e hidrológica, lo cual se hizo evaluando las propiedades del concreto permeable en estado endurecido y estas pruebas arrojaron como resultados que el índice de daño derivado de la porosidad medida del concreto permeable han demostrado ser inducido por la carga estática y cíclica. Después de los investigadores haber aplicado 20000 ciclos con un nivel inferior del 10 % y un nivel superior del 65,75 y 85 % de la resistencia a la tracción, el daño inducido se ha cuantificado midiendo el aumento de la porosidad.[24]

Figura 7-11: Concreto permeable en vías [43]



También se revisó la capacidad de descontaminación de aguas de tormenta mediante la filtración de aguas lluvias del concreto permeable. Esta es una gran ventaja de los concretos permeables en pavimentos frente a los pavimentos convencionales de asfalto, ya que estos no proporcionan una filtración de las aguas lluvias como si lo hacen los pavimentos de concreto permeable en más de un 28%[9] . Por esta razón, se realizó un estudio sobre las estrategias de recuperación del agua recogida en los pavimentos de concreto permeable, de manera tal que esta pudiera volver a ser productiva. De igual manera se revisó el ciclo de vida del concreto permeable, ya que de acuerdo con los autores, el concreto permeable tiene un gran futuro en el sector de la construcción y sobre todo en las vías gracias a ventajas como la reduce la escorrentía superficial en áreas pavimentadas, permite el uso de un alcantarillado de menor capacidad, además de filtrar de manera natural el agua de lluvia y reducir las cargas de polución que puedan entrar en los arroyos, lagunas y ríos, entre otros. Lo que puede llegar a convertir este material en un gran éxito en sector de infraestructura vial en el futuro, con mayor estudio y perfeccionamiento en ampliación.[1]

La mayoría de las ciudades del mundo desarrollado dependen de los sistemas de redes de tuberías, que se han desarrollado desde el siglo XIX. Los sistemas tradicionales captan la escorrentía de las tormentas y la distribuyen posteriormente a los cursos de agua o sistemas de alcantarillado cercanos. Algunos de estos sistemas se han vuelto ineficaces e ineficientes. Además, suelen ser muy caros. En lugar de centrarse en el tratamiento de "fin de tubería", se puede desafiar el enfoque tradicional de tratamiento de aguas residuales optimizando la utilización de los recursos y el desarrollo de tecnologías novedosas y más productivas como los pavimentos de concretos permeables.[24].

Figura 7-12: Concreto permeable decorativo para los juegos olímpicos de 2008, Beijing (China). Foto: concrete decor journal. Vol.10 no.2 feb/marzo 2010.



Por otra parte, Liu et al. [25] en su investigación concluyen que el tratamiento de la superficie con una emulsión de polímeros de silicio es eficaz para mejorar la resistencia del concreto permeable con agregado reciclado, manteniendo al mismo tiempo una buena permeabilidad. Así mismo se comprobó que muestras con adecuada porosidad de orden de 15% a 35% y bajo contenido de cemento presentan características más favorables, como una mayor resistencia mecánica.

Los autores Yap et al. [5] evaluaron las propiedades mecánicas y superficiales, la permeabilidad y la evaluación de los gases de efecto invernadero del concreto permeable verde hecho con agregado grueso reciclado de desechos de construcción. Basándose en los resultados experimentales, se reemplazó agregado de concreto reciclado para sustituir los áridos gruesos naturales hasta el 100% en la producción de concreto permeable, en la que el máximo de reciclado de residuos es de hasta el 87% en peso o el 73% en volumen. Se logró una reducción de las emisiones de CO₂ de hasta un 24%, pero así mismo este reemplazo del agregado de reciclado de concreto (RCA)

redujo las resistencias a la compresión, a la tracción y a la flexión del concreto permeable. Y los análisis de FESEM y EDX mostraron que la trayectoria de fallo en los especímenes de RCA se dió por el poco mortero adherido rígido, lo que causó la mala adherencia de la pasta de áridos. A pesar del aumento del módulo de elasticidad, el concreto permeable con mayor contenido de RCA mostró un fallo prematuro a una tensión menor bajo la misma carga de compresión.

El-Hassan, Kianmehr and Zouaoui, [11], investigaron el rendimiento reológico, físico, de transporte, mecánico y de durabilidad del concreto permeable hecho con escoria y agregado de concreto reciclado. Se encontró que la trabajabilidad del concreto permeable se ve afectada con el contenido de agregado reciclado de concreto RCA, así como también afectó la poca cantidad de cemento utilizado, y la forma y naturaleza áspera e irregular de las partículas del RCA. La adición de escoria disminuyó notablemente la porosidad, pero a su vez dió lugar a una mejor trabajabilidad debido a su textura superficial más lisa. También se examinó el potencial de obstrucción del concreto permeable a lo largo de una vida útil simulada de 20 años y se encontró que la tasa de obstrucción fue más alta en los primeros 5 años y disminuyó con el tiempo de exposición. También se encontró que los concretos de porosidades menores al 15% se obstruyen a un ritmo más rápido que los de mayor porosidad, debido a su mayor cantidad de poros que permiten adherencia de agente externos. Sin embargo, la permeabilidad pudo ser restaurada entre el 71 y el 86% de su valor original mediante el lavado con agua a presión. La escoria permitió una eliminación más fácil de tales partículas debido a su textura de superficie más suave y restauró mejor la permeabilidad. Después de 20 años de exposición simulada, todas las mezclas de concreto superaron el límite mínimo de permeabilidad del concreto permeable, siempre que se mantengan mediante el lavado con agua a presión. Por otro lado, encontró que las resistencias a la compresión, a la tracción, a la fractura y a la flexión de 28 días disminuyeron con más agregado reciclado RCA reemplazando por agregado natural NA. Mientras que la incorporación de escoria podría mejorar el rendimiento mecánico debido a la densificación de la matriz, la reducción de los vacíos y el fortalecimiento de la estructura del concreto. Aun así, todos los concretos permeables tuvieron propiedades mecánicas aceptables, independientemente del porcentaje de sustitución del RCA.

Otros estudios [11] pudieron evidenciar que la resistencia a la abrasión del concreto permeable está influida principalmente por la sustitución del RCA, pues presenta una

mayor pérdida de masa respecto al concreto elaborado con agregado natural NA. Pero, aun así, se pudo usar hasta un 20% de agregado reciclado de concreto RCA como reemplazo del natural NA, sin que se vea afectada la abrasión del concreto permeable.

Por otra parte los investigadores Aliabdo, Abd Elmoaty and Fawzy, [26], estudiaron la adición de agregados reciclados, fibras de polipropileno, fibra de caucho, y goma de miga en el concreto permeable, encontrando que afecta los índices de permeabilidad, aumentándola un 37% más con respecto al concreto permeable realizado con agregado natural. También concluyeron que el uso de agregado de concreto reciclado tiene un efecto negativo significativo en la resistencia a la compresión del espécimen, aunque los resultados alcanzados están todavía en los rangos típicos propuestos por ACI 522R de 3,8 MPa y 28 MPa, viéndose más afectado cuando el reemplazo está entre 50% y 100% de agregado reciclado, donde generalmente produce resistencias a la tracción menores a los valores recomendados por la ACI 522R.

Berry et al. [27], en su investigación sobre los efectos de la incorporación de cantidades variables de RCA en la resistencia y las propiedades hidráulicas del concreto permeable, encontraron que los valores de densidad fueron generalmente similares al aumentar el contenido de RCA; sin embargo, la sustitución del 100% de RCA dio como resultado valores de densidad muy bajos. Además, las mediciones indicaron que el aumento del contenido de RCA disminuía la conductividad hidráulica. Sin embargo, todas las mezclas produjeron una conductividad hidráulica aceptable en 0,2 cm/s y 1,2 cm/s de acuerdo con Comité ACI 522, 2010. Concluyeron también que la angularidad del RCA probablemente dio lugar a una distribución más ineficiente de los espacios de los poros, lo que dio lugar para que el agua fluyera. También la relación entre la resistencia a la compresión y la conductividad hidráulica reveló que el concreto permeable con agregado reciclado de concreto (RCA) muestra una relación similar a la del concreto permeable con agregados naturales, y los valores se sitúan dentro de un rango esperable para ser considerado un sustituto adecuado. Los autores basándose en los resultados de este estudio, concluyeron que el agregado reciclado de concreto (RCA) puede ser sustituido hasta un 50% y proporcionar resistencia y valores de conductividad similares al diseño de la mezcla de control, hecho con agregado natural.

Por su parte en el ámbito local, de acuerdo a Ulloa-Mayorga et al [7], estudios realizados en la ciudad de Bogotá sobre la influencia de la incorporación de dos diferentes tipos de

agregados reciclados, agregado cerámico de ladrillos (RA1) y agregado de concreto triturado (RA2) de los residuos de construcción y demolición (RCD), identificaron que el aumento del contenido de agregado reciclado presentó reducción de la resistencia a la compresión debido a que el agregado reciclado muestra menores resistencias (resistencia a la degradación y 10% de finura) en comparación con el agregado natural. Mientras que los resultados de resistencia a la compresión obtenidos en este estudio se encontraron dentro del intervalo permitido para el concreto permeable (Comité ACI 522, 2010). Por otra parte, La permeabilidad característica del concreto permeable fue mayor que el rango reportado por el ACI (Comité ACI 522, 2010), por lo que podría considerarse como un concreto macroporoso, es decir con separación de 5 a 10 mm entre partículas y con una cantidad de vacíos que permite una porosidad de 30 al 40 %, alcanzando una permeabilidad de al menos 25 000 mm/h. La mezcla de concreto permeable con agregado reciclado de concreto (RCA) tenía un coeficiente de permeabilidad más alto, superando en un 15% la mezcla de agregado natural (NA). También se encontró que los RCA caracterizados pueden ser utilizados para producir concreto permeable, ya que cumplen con los rangos presentados por ACI (Comité ACI 522, 2010) de 0.2cm/s a 1,2cm/s, alcanzando resistencias a la compresión y a la flexión de hasta 5,79 MPa y 2,14 MPa, respectivamente, y una permeabilidad de 24,79 mm/s. Por último, la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín apostando a la sostenibilidad de la construcción y considerando el número de motocicletas que circulan en el campus universitario, ha aumentado la capacidad de parqueaderos para motocicletas en las distintas sedes de la Universidad, especialmente en la Sede del Volador, decidió construir un parqueadero de motos de concreto permeable que permitió aumentar la capacidad instalada de celdas de parqueadero de 300 a 800, es decir un 267%, logrando también una adecuada organización de peatones, bicicletas, vehículos y motos, garantizando la seguridad vial dentro del Campus. [28]

Figura 7-13: Parqueadero de motos universidad nacional sede Medellín. (tomado de: <https://medellin.unal.edu.co/direccion-de-ordenamiento-y-desarrollo-fisico/obras-finalizadas.html>)



De acuerdo: [28] “estos pavimentos instalados permiten la infiltración del 100% de agua lluvia, conservan el ciclo natural del agua, permiten reducir el efecto isla de calor, mitigan las inundaciones, favorecen el paso del agua hacia los árboles y de las reservas de agua subterránea, eliminan el empozamiento, limpian el agua lluvia, reducen el riesgo de hidroplaneo y facilitan la reutilización de gran parte del agua lluvia que se filtra en el parqueadero. Todo esto se logra, pues el proyecto consideró la construcción de filtros, que recogen y conducen el agua lluvia a un tanque de almacenamiento con capacidad de hasta 40 m³ de agua, para su posterior reutilización en riegos y en un futuro cercano en baños y zonas de aseo de los edificios más próximos”.

“Este pavimento es una apuesta novedosa que hace la Sede, pues es el primer proyecto de esa magnitud en la ciudad, en él se implementan 3600 m² de superficie permeable, comparados con los 30 m² que se encuentran instalados en el único referente cercano realizado en el Campus de la Universidad EAFIT. Así la Sede realiza una importante apuesta al mejoramiento de su infraestructura, propicias intervenciones ambientalmente, sostenibles y genera espacios de innovación, implementación y apropiación de nuevas tecnologías”.

7.3.2 Conclusiones del estado del Arte.

Del estado de arte descrito anteriormente se puede concluir que hay una gran variedad de resultados, de los cuales se seleccionaron los resultados más relevantes de la búsqueda bibliográfica (matriz bibliográfica) de la investigación, se elaboró una tabla donde se registraron propiedades importantes de estas investigaciones, es decir de los documentos y proyectos de investigación más relevantes, los cuales permitieron tomar decisiones y plantear los valores más aproximados de relación agua cemento, días de curado, resistencia a la compresión buscada, resistencia a la flexión y permeabilidad, al momento de proponer el diseño experimental. Estos datos tomados de los documentos más relevantes y resientes, luego de hacer una revisión detenida, se resumen en las Tablas 7-11a, 7-11b, 7-11c, donde además se incluyen algunas propiedades del concreto permeable.

Tabla 7-11a: Resumen Artículos Relevantes (Elaboración Propia)

Número	Título	Autores	Año	Lugar	Tamaño máximo nominal (mm)	Absorción (%)	a/c	% Agregado Natural	% Agregado Reciclado	Peso volumétrico (kg/m ³)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a la Flexión (MPa)	Coficiente de Permeabilidad (cm/s)	Contenido de Vacíos %	Densidad (Kg/m ³)
1	Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate	Aliabdo A.A., Abd Elmoaty A.E.M., Fawzy A.M.	2018	Alexandria University, Egypt	9.5	11.5		2.7							
					19	10.1	0.3	50-100	50-0	1600 y 2000	30.0	2.00	0.2-1.2	20.0	1972
2	Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete	Nicholas A. Brake, Hamid Alahdadi, Fath Adam	2016	Lamar University, United States	9.5	3.5	0.27	100	0	1800	11.00	1.00	0.93	27.0	1855
					9.5	3.8	0.3	100	0	1398	38.00	4.00	0.29	9.0	2228
3	Fai-G Binder Pervious Concrete	Elango, K. S. Revathi, V.	2017	Dept. of Civil Engineering, K.S.R. College of Engineering, Tiruchengode.	10	2.8	0.35	100	0	1390	17.2	1.89	1.55	18.0	2350
					10	2.6	0.7	100	0	1390	12.2	1.3	1.98	21.0	2096
					10	3.2	0.35	100	0	1390	14.00	1.54	1.95	20.0	2232
4	Correlation between permeability and porosity for pervious concrete Correlación de la permeabilidad	Sandoval, G. F. B.; Galobardes, I.; Schwantes- cezaró, N	2019	Departamento de Construção Civil, Universidade	10	5.8	0.34	100	0	1500	9.56	1.57	0.497	19.0	2800
					10	13.6	0.34	17.49	82.51	1300	6.36	2.46	0.99	23.0	2120
5	Metodología de diseño para concretos permeables y sus respectivas correlaciones de permeabilidad	José Mauricio Pomas Morales.	2017	Costa Rica	10	3.1	0.27	100	0	2031	18.16	1.51	0.16	15.0	2325
					10	5.4	0.27	100	0	1990	19.45	1.57	0.19	17.0	2116
6	Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete	Zhang, Zhiqian Zhang, Yufen Yan, Changgen	2017	China	10	12.8	0.28	37.00	63.00	1810	15.5	2.55	0.35	15.3	2113
					10	9.5	0.28	34.00	66.00	1910	16.5	2.59	0.38	16.5	2101
					12.5	7.1	0.28	30.00	70.00	1490	17.8	2.77	0.31	15.9	2116
7	Sustainable desing of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate	Jian-Xin Lu, Xian Yan, Pingping He, Chi Sun Poon	2020	China	12.5	4.7	0.28	24.00	76.00	1510	20.00	3.02	0.32	16.4	2112
					12.5	2.9	0.28	19.00	81.00	1470	23.6	3.41	0.35	15.1	2210
					12.5	0.9	0.28	9.00	91.00	1920	24.2	3.56	0.37	16.3	2001
8	Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag	El-Hassan, Hlal Klamheir, Peiman Zouaoui, Southall	2019	United Arab Emirates	20	0.34		50	50	1920	18.33	1.92	0.37	15.7	2120

Tabla 7-12b: Resumen Artículos Relevantes (Elaboración Propia)

Título	Autor/año/ revista/ universidad	Tipo de Agregado Reciclado	Proporción de los Agregados	Diseño de Mezcla utilizado	Aditivo en la mezcla	Tamaño de agregado (mm)	Porosidad (%)	Relación agua/cemento (a/c)	Densidad (kg/m ³)	Permeabilidad (mm/s)	Equipo de medición de la permeabilidad	Resistencia a la Compresión (Mpa)	Resistencia a la Flexión (MPa)
Evaluating the use of recycled concrete aggregate in pervious concrete pavement.	Rabbah Rizvi/2010/Construction and Building Materials	Concreto		ACI Comité 522-R		9.5	31.7-39.3		1710-1965	16.0-78.5	Permeámetro de cabeza variable	5-9.2	Sin Ifomación
Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete, aggregate	Rasihah Siravindrarajah/2012/International Journal of Concrete Structures and Materials	Concreto	1:2.8-1:4	ACI Comité 522-R	Escofía	5-13; 13-20	7-32.4	0.33	1385-1650	9.8-17.1	Permeámetro de cabeza variable	4.5-13.3	Sin Ifomación
Properties of Pervious Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregate	Bradford M. Berry/2012/TRB 2012 Annual Meeting	Concreto	14.3	ACI Comité 522-R	Aditivo que incorpora aire, reductor de agua de alto nivel que modifica la viscosidad	4.75-25	Sin Ifomación	0.27	1789-1890	7.5-8.7	Permeámetro de cabeza variable	2.5-17.7	Sin Ifomación
Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate)	M. Aamer Rafique Bhatta/2013/Construction and Building Materials/Universiti Teknologi/Malaysia	Concreto	1:5.9	ACI Comité 522-R	Polímeros	5-22	23-28	0.3	Sin Ifomación	24-37	Permeámetro de cabeza variable	6.5-16	1.9-3.2
Use of lightweight aggregates in pervious concrete	Zaetang/2013/Construction and Building Materials/Khon Kaen University,Thailand	Concreto	1:2.3-1:1.4	ACI Comité 522-R	Superplastificante	4.8-9.5	19.6-29.7	0.24	602-775	3-29.3	Permeámetro de cabeza variable	2.6-4.5	Sin Ifomación
Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method	Alireza Joghaghani/2015/Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology	Concreto	1:7.4; 1:3.98	Método Taguchi	Sin Ifomación	9.5-12.5	13.5 - 33.1	0.25 - 0.35	1565-1672	6.4 - 16.3	Permeámetro de cabeza variable	6.2 - 10.4	1.2 - 2.4
Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete	Erlan Güneysi/2016/Materials and Structures	Concreto	1:3.7; 1:5.7	Sin Ifomación	Sin Ifomación	9.5-12.5	22-25.3	0.27 ; 0.32	1781-1925	5.9-12.4	Permeámetro de cabeza variable	13.5-18	Sin Ifomación
Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate	YuwadesZaetang/2016/Construction and Building Materials/Kaistart University	Concreto	14.5	Sin Ifomación	Superplastificante	4.75-9.5	13-25	0.24	1820-2000	2.2-10.1	Permeámetro de cabeza variable	13-17	2.8-4.8
The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete	TAVARES L. M./2016/Tracoe de Structures and Materials Journal/Universidade do Vale do Rio dos Sinos	Concreto	Sin Ifomación	Sin Ifomación	Sin Ifomación	Sin Ifomación	Sin Ifomación	0.33 - 0.41	Sin Ifomación	16 - 35	Sin Ifomación	10.45 - 19.85	Sin Ifomación
Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled aggregate pervious concrete	Patrick W.Barnhouse/2016/Construction and Building Materials/ University of Colorado Boulder	Concreto	1:3; 1:3.2	Sin Ifomación	Arena y dióxido de titanio	4.75	30-40	0.27	1312-1568	35-40	Permeámetro de cabeza variable	2.1-4	Sin Ifomación
Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete	Patrick W. Barnhouse/2016/Construction and Building Materials/University of Colorado Boulder	Concreto	01:03.2	Sin Ifomación	Sin Ifomación	4.75	30-40	0.26	1580 - 1660	25	Sin Ifomación	33 - 36	Sin Ifomación
Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete	Patrick W. Barnhouse/2016/Construction and Building Materials/University of Colorado Boulder	Concreto	01:03.2	Sin Ifomación	Sin Ifomación	4.75	30-40	0.26	1580 - 1660	25	Sin Ifomación	33 - 36	Sin Ifomación
Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete	ZhiquanZhang/2017/Construction and Building Materials/Chang'an University	Concreto y Cerámica	14.3	Sin Ifomación	Superplastificante	5-10	15.1-16.5	0.34		3.1-3.8	Permeámetro de cabeza variable	15.5-24.2	2.5-3.6
Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates	Vivian A. Ulloa-Mayorga/2018/Ingeniería e Investigaciones/Universidad Santo Tomás	Concreto y Cerámica	1:3-1:3.2	Sin Ifomación	Superplastificante	9.5-12.5	34.5-36.4	0.28	1360-1469	21.2-24.8	Permeámetro de cabeza variable	4.59-5.8	1.4-2.1
Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates	Soon PohYap/2018/Journal of Cleaner Production/University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia	Concreto	1:3.6-1:4.1	Sin Ifomación	Sin Ifomación	4.5-9.5	Sin Ifomación	0.35	Sin Ifomación	14.2-26.4	Permeámetro de cabeza variable	5.5-11.4	1.7-2.4
Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate	Ali Alabdoo/2018/Construction and Building Materials/Alexandria University, Egypt	Concreto	14.1	Sin Ifomación	Arena; polipropileno fibras; caucho; sílice y estireno látex de butadieno	12.5-9.5; 25-19	14-25	0.3	1620-1925	4.2-10.2	Permeámetro de cabeza variable	3-15.2	1.3-3.0
Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates	Soon Poh Yap/2018/Journal of Cleaner Production/University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia	Concreto	14.1	Sin Ifomación	Sin Ifomación	4.5-9.5	17.86-22.51	0.35	Sin Ifomación	14.2-26.4	Permeámetro de cabeza variable	6.84 - 9.12	
Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag	HitaEl-Hasan/2019/Construction and Building Materials/United Arab Emirates University	Concreto	1:2.4-1:4	Sin Ifomación	Escofía	4.75-22	10.2-22	0.4	1625-1984	1.9-21.1	Permeámetro de cabeza variable	2.5-37	0.9-3.1
Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate	Barnali Debnath/2019/Construction and Building Materials/National Institute of Technology, Agartala, Tripura 799046, India	Concreto	1:2.06-1:2.6	Sin Ifomación	Superplastificante y arena	2.36-19	2.14-25.95	0.28-0.35	Sin Ifomación	5.3-19.1	Permeámetro de cabeza variable	Sin Ifomación	Sin Ifomación
Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method	Tiejun Liu/2019/Cement and Concrete Research/School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology	Concreto	1:2.2 - 1:3.4	ACI (ACI 522R-13, 2013)	Sin Ifomación	5-10	2 - 16	0.34	1725 - 2025	0.25 - 5.0	Permeámetro de cabeza variable	5.5 - 27	0.3 - 2.9

Tabla 7-13c: Resumen Artículos Relevantes (Elaboración Propia)

Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method	Tiejun Liu/2019/Cement and Concrete Research/School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology	Concreto	1:2.2 - 1:3.4	ACI (ACI 522R-13, 2013)	Silicona	5 - 10	2 - 16	0.34	1750 - 2062	0.25 - 4.2	Pemeámetro de cabeza variable	15.0 - 37.5	1.5 - 3.75
Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate	Jian-Xin Lu/2019/Journal of Cleaner Production/The Hong Kong Polytechnic University	Concreto	01.05.5	ACI (ACI 522R-13, 2013)	Polvo de sílice	5 - 10	27 - 29	0.45	1800 - 1963	2.0 - 2.5	Pemeámetro de cabeza variable	19 - 27	
Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate	Ali Rezaei Lori/2019/Construction and Building Materials/Tarbiat Modares University, Tehran, Iran	Concreto	01.04.8	ACI (ACI 522R-13, 2013)	Sin Ifomación	12.7	15 - 35	0.33	2470	3.53	ASTM C78	21.93	3.49
The prediction analysis of properties of recycled aggregate permeable concrete based on back-propagation neural network	Shoukai Chen/2020/Journal of Cleaner Production/North China University of Water Resources and Electric Power	Concreto	1 : 4.5	ACI (ACI 522R-13, 2013)	Sin Ifomación	10 - 20	14.34 - 35.76	0.3	Sin Ifomación	2.88 - 5.00	ASTM C1701 (Pemeámetro de cabeza constante)	2.1 - 11.4	0.7 - 2.3
Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures	Gabriel Luzani Vieira/2020/Journal of Cleaner Production/Pontifical Catholic University of Rio Grande Do Sul (PGETEMAP/UCRS), Brazil	Concreto	1.4 - 1.4.5	Sin Ifomación	cenizas volantes	4.75-9.5	6.6 - 11.3	0.25 - 0.30	Sin Ifomación	3.5 - 7.5	Pemeámetro de cabeza variable	3.75 - 9.50	2.25 - 3.3
Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology	Glucose Zhang/2020/Construction and Building Materials/College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing	Concreto	1.5	Metodología de superficie de respuesta (TVC)	superplastificante	9.5-12.5	32.4	0.32	1077	Sin Ifomación	Sin Ifomación	17.1	Sin Ifomación
Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates	Hussein Adebayo Ibrahim/2020/Construction and Building Materials/Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya	Concreto	1:2.8, 1:3, 1:3.2	ACI Comté 522-R	Sin Ifomación	4.75 - 10	16.08; 17.15; 17.32	0.30, 0.35, 0.40	Sin Ifomación	24.65; 25.31; 24.97	Pemeámetro de cabeza variable	10.71; 11.56; y 13.54	0.98 - 1.32
Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers	Ali Toghiani/2020/Construction and Building Materials/Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang	Concreto	1.4.1	ACI Comté 522-R	Sin Ifomación	5-10	29.4 - 30.8	0.34	1466.8 - 1685.4	25.3 - 26.5	Pemeámetro de cabeza variable	10.6 - 26.8	0.9 - 3.43
Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers	Ali Toghiani/2020/Construction and Building Materials/Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang	Concreto	1.4.5	ACI Comté 522-R	puzolánicos	5-10	27.8 - 29.1	0.34	1531.3 - 1782.9	24.4 - 25.6	Pemeámetro de cabeza variable	18 - 29.6	1.1 - 3.14
high volume of construction and demolition waste as aggregates	Lixiang Yang/2021/Construction and Building Materials/East China University of Science and Technology, 200237 Shanghai, China	Concreto	1.4.5	Sin Ifomación	Sin Ifomación	9.5 - 13.2	17.0-19.2	0.27-0.37	1882-1935	6.5	Pemeámetro de cabeza variable	8.9-15.7	1.3-2.7
Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate	Susana Viana Bitencourt/2021/State University of Rio de Janeiro, Brazil/Case Studies in Construction Materials	Pavimento asfáltico	1.4	ACI (ACI 522R-13, 2013)	Sin Ifomación	12.5-19	21.8 - 25.3	0.37	1680-1930	2.7 - 2.9	Pemeámetro de cabeza variable	3.7 - 12.8	1 - 2.7
Analysis of properties of pervious concrete prepared with difference paste-coated recycled aggregate	Nou Jike/2022/Journal of Cleaner Production /Zhejiang University, Hangzhou, 310058, PR China	Ladrillo	1.5	Sin Ifomación	Sin Ifomación	1.18-10	10-26	0.5	1650-2200	0.1	Pemeámetro de cabeza variable	9.6-21.6	Sin Ifomación
Combined reusing of sorghum husk ash and recycled concrete aggregate for sustainable pervious concrete production	Murtadha Adekikun Tijani/2022/Journal of Cleaner Production/Department of Civil Engineering, Osun State University, Osogbo, Nigeria	concreto	1.4; 1.5.3	ACI522R (2010)	Ceniza de cascara de sorgo	9.5 - 12.5	16.86 - 20.46	0.4 - 0.5	1600-2000	0.3 - 13.6	ASTM D5084 (2016) (Pemeámetro de cabeza constante)	1.07 - 4.79	Sin Ifomación
Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate	Helena Lunkes Siteder/2022/Construction and Building Materials/Department of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil	Concreto	1:03	ACI522R (2010)	Sin Ifomación	12.5	15.0 - 21.8	0.3	1897 - 2175	5.61 - 27.09	ASTM D5084 (2016) (Pemeámetro de cabeza constante)	2.79 - 15.23	0.010- 2.20
Evaluating the effect of recycled concrete aggregate and sand in pervious concrete paving blocks	Machado da França Ana Paula/2022/Road Materials and Pavement Design/Taylor & Francis Group	Concreto	1:0.6 ; 1:1.2 ; 1:2	Sin Ifomación	Aditivo modificador de la reología	2.36 - 9.5	29.46 - 30.47	0.33	1619 - 1784	2.32 - 6.27	ASTM C1701 (2016)	6.50 - 17.76	5.05 - 16.77

8. Metodología Experimental

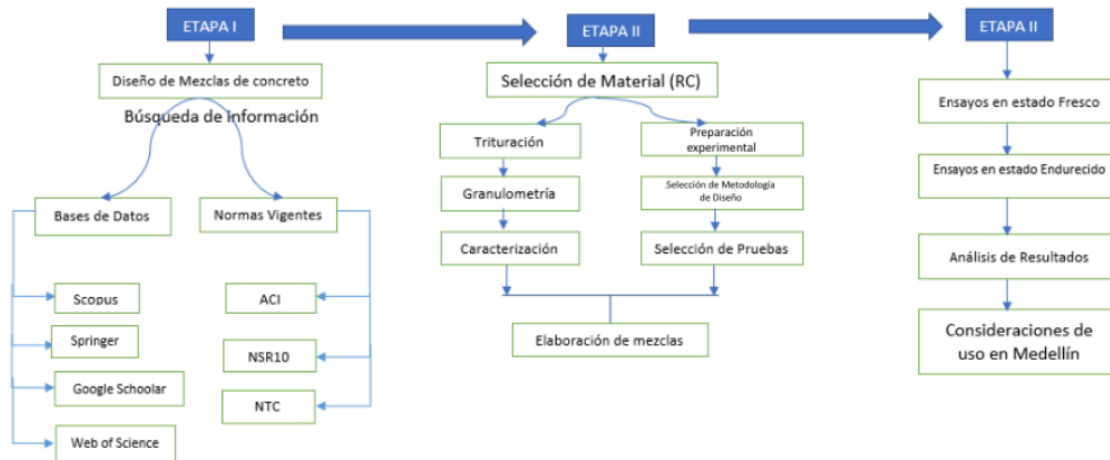
8.1 Introducción

En este capítulo se muestra la metodología experimental, donde inicialmente se describen los pasos a desarrollados en el trabajo, seguido de la comparación de algunas de las metodologías de diseño de mezcla de concreto permeable que han utilizado algunos autores del tema, y se hace un cuadro comparativo de las dichas metodologías. Por último, se muestra el diseño experimental que se utilizó para desarrollar la metodología de diseño seleccionada, donde se muestran las variables de entrada con sus respectivos valores de frontera, y las variables respuestas.

La metodología se desarrolló en tres etapas, la primera se indagó a través de la literatura, luego se definieron los procesos de diseño de mezclas de concretos permeables desarrollados bajo normas A.C.I, NSR, NTC, en libros de tecnología del concreto y en bases de datos como: Scopus, Springer, Google Scholar, y Web of Science. Todo esto permitió crear un estado del arte de la tecnología en el que se contrastaron las condiciones adecuadas de diseño. Una vez definida una metodología de diseño de mezcla de concreto permeable, se aplicó la etapa dos. (Ver Figura 8-1)

En la etapa dos, se seleccionaron los residuos provenientes de cilindro de concreto de una fuente (ARCONSA), se caracterizaron físicamente y se realizó un proceso de conminución. Posteriormente se planteó un diseño experimental con apoyo del software Minitab para la ejecución de ensayos y pruebas, usando como factores del diseño: el porcentaje de adición agregado reciclado (ARC), la relación agua cemento a/c , el tamaño máximo de partícula (TMP), y como variables respuestas en estado endurecido, la resistencia mecánica a compresión, el módulo elástico, la permeabilidad al agua, la densidad, la absorción, y el contenido de vacíos, lo que permitió hacer una correlación entre las propiedades logradas y el efecto de la adición de agregado reciclado ARC en las mezclas de concreto permeable.

Figura 8-1 : Esquema metodológico (elaboración propia)



9. Descripción y selección Diseño de Mezcla para el diseño de la mezcla de concreto

Se realizó una revisión bibliográfica detallada de los materiales, procesos, especificaciones y de los desarrollos recientes en este tema utilizando las bases de datos de la Universidad de Nacional, Bibliografía especializada, y Normas Técnicas nacionales e internacionales. Esta revisión se hizo con el fin de seleccionar la metodología adecuada de diseño de mezcla de concreto permeable, y para mejorar la literatura para concreto permeable en diseño de mezclas que es muy escasa en nuestra región, donde se diseña usando normas internacionales. En gran parte de la literatura consultada el diseño de mezcla que más se utiliza para el concreto permeable es el de Método del ACI 522. El resumen de algunos métodos encontrados en la búsqueda se describe y se incluyen las respectivas referencias en este trabajo.

Para la dosificación del diseño de mezcla del concreto permeable, son tomados como base los procedimientos del Método del Comité 211.3R-02 del ACI, recomendaciones del Comité 522, y estudios realizados por Pervious Pavement Organization, National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), Portland Cement Pervious Concrete Pavement. El sustento reside en que siguiendo estas recomendaciones y experiencias podemos obtener una estructura de concreto con contenido de vacíos importantes a

diferencia de un concreto convencional, por lo que la cantidad de mortero debe ser suficiente para recubrir todas las partículas de agregado y formar puentes de adherencia. Básicamente el comité ACI 522, se apoyó en el trabajo desarrollado por el comité ACI 211.3R-02, en su apéndice N° 6 [29]

9.1 Diseño de Mezcla de Concreto permeable

“El objetivo del diseño de una mezcla de concreto es determinar los pesos de los principales componentes de una mezcla de concreto de acuerdo con ciertos requisitos, como la resistencia, la manejabilidad, etc.”[30]

Los métodos dependen de ciertas ecuaciones y gráficos basados en análisis matemático de los resultados obtenidos de la experiencia de campo que se adquiere.

En general, los métodos de diseño de mezclas dan algunas indicaciones al diseñador para validarlas y ajustarlas mediante mezclas experimentales en los laboratorios locales a fin de comprobar las variables relacionadas a las características y propiedades de los materiales locales y las condiciones del entorno [30] [30], para así poder llevar un método adecuado y más exacto al campo de acuerdo a las solicitudes de cada proyecto, y no caer en la práctica de ensayo y error.

Después de revisar varios métodos de dosificación de concreto permeable, se encontró que varios de los métodos situados a continuación se basan en la experimentación, otros como el de la ACI en procesos iterativos, otros en el aumento y/o variación de parámetros como la relación agua/cemento, el tamaño máximo de agregado de partículas, pasta de cemento y/o densidad. Todos estos métodos buscan mejorar propiedades como la resistencia a la compresión y flexión, la permeabilidad, el porcentaje de vacíos.

Finalmente se seleccionó la ACI, puesto que, de acuerdo con las investigaciones revisadas, utilizando este método se obtuvieron mejores resultados en la resistencia a la compresión, permeabilidad y porcentaje de vacíos, además de que no requiere tantos ensayos o desarrollo de parámetros nuevos, como alguna de las otras metodologías, como se muestra en la siguiente tabla 9-1 comparativa:

Tabla 9-1: Cuadro Comparativo sobre metodología de diseño. (Elaboración Propia)

Método de diseño	Características	Fundamentación	Valores Obtenidos usando el Método
Método de la NRMCA	<ul style="list-style-type: none"> Sugiere que el índice de compactación de los agregados debe estar entre 1% y 8% Relación a/c entre el 0,27 y 0,36 Uso de aditivos en la pasta 	Este es un método más experimental, ya que propone inicialmente un lote de prueba y recomienda la utilización de aditivos para mejorar las características del concreto permeable. particularmente aditivos que aumenten la resistencia mecánica del concreto permeable.	Relación a/c: 0,27 – 0,36 R. Compresión: 3,4 MPa a 28MPa. Permeabilidad: 0,7cm/s - 1,7 cm/s % de Vacíos: 13% - 30%
Método del ACI 522	<ul style="list-style-type: none"> Determinación de la relación de volumen seco de agregado b/b_0 Determinación de la masa unitaria compacta de los agregados. 	Se caracteriza por ser un proceso iterativo, cuya finalidad es alcanzar una mezcla con equilibrio entre vacíos, resistencia, cantidad de pasta y trabajabilidad de acuerdo a los valores establecidos de diseño	Relación a/c: 0,20 – 0,35 R. compresión: 3,5Mpa 28MPa Permeabilidad: 0,2cm/s – 2,1 cm/s % de Vacíos: 15% a 20%
Método de Nguyen et al	<ul style="list-style-type: none"> Establecer un valor para el volumen de vacíos superior al 15% para luego usar la ecuación del método. La cantidad de arena utilizada debe ser el 7% del total 	Se basa en la cuantificación de la capa de pasta de cemento que recubre la grava y en la suposición de que la pasta de cemento actúa sólo como recubrimiento; no llena el vacío entre los granos de grava.	Relación a/c: 0,37 R. compresión: 24,3 MPa R. Flexión: 4,0 MPa Permeabilidad: 0,11 cm/s – 0,08 cm/s % de Vacíos: >15%

	<p>de los agregados que se vayan a utilizar.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de drenaje de pasta para determinar a/c. 		
Método de Yahia e Kabagire	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de la distribución, la dimensión y la forma de los agregados. • Determinación de la densidad de empaquetamiento. • Tamaño de agregados 10, 14 y 20 mm. 	<p>Consiste en la utilización del concepto de la densidad de empaquetamiento del agregado para facilitar la dosificación del concreto Permeable que cumpla con las propiedades deseadas.</p>	<p>Relación a/c: SN</p> <p>R. compresión: 4,7 MPa – 24.5MPa</p> <p>Permeabilidad: 0,19 cm/s – 1,5 cm/s</p> <p>% de Vacíos: 14% a 30%</p>
Método de Jimma e Rangaraju	<ul style="list-style-type: none"> • Se sugiere incrementar la relación a/c. • Aumento de tamaño de agregado • Se sugiere utilizar aditivo. 	<p>Se fundamenta en que dos características de la pasta de cemento deben ser consideradas en el diseño, como lo son la fluidez y la capacidad de formación de película. Debido a que una pasta muy fluida no formará una película estable lo que ocasionaría una baja resistencia a la compresión y una baja permeabilidad del CP debido a la colmatación de los vacíos en su interior.</p>	<p>Relación a/c: 0,2 – 0,37</p> <p>R. compresión: 2,5 MPa – 20,7 MPa</p> <p>Permeabilidad: 0,05 cm/s – 0,23 cm/s</p> <p>% de Vacíos: 14%-35%</p>

Método de la NRMCA [31]

“Está dividido en 5 etapas, la primera consiste en la determinación de las propiedades de los agregados que serán utilizados. Para eso, se debe seleccionar el tamaño del agregado grueso de acuerdo con la norma ASTM C 33, la cual recomienda usar tamaños de 2,36 mm a 9,5 mm o 1,18 a 9,5 mm cuando se vaya a producir concreto permeable para tráfico de personas. Para tráfico más pesado el agregado a utilizar es de 4,75 mm a 19 mm o mayor. Después de la etapa de selección se deben realizar algunos ensayos con esos agregados para obtener el valor de la densidad y absorción, peso unitario en estado seco y humedad antes de realizar la dosificación. Se estima el volumen de pasta y se escoge el índice de compactación que varía entre 1 % - 8 %, caracterizando la menor o mayor compactación a ser aplicada de los agregados, es decir establecer las relaciones entre la humedad y el peso unitario seco del agregado grueso de acuerdo con la norma establecida en cada región, que para el caso Colombia es I.N.V. E – 142 – 13. Esta norma no se describe en este apartado ya que no fue utilizada esta metodología. La determinación de la relación a/c que puede ser obtenida de dos formas: escogiendo un valor entre 0,27 y 0,36 y evaluando la consistencia de las mezclas; o realizando diversos ensayos con los intervalos antes mencionados y con incrementos de la relación a/c de 0,2. En esta fase se recomienda el uso de aditivos que ayuden en el aumento de las resistencias a la compresión, flexotracción y del módulo de elasticidad del concreto permeable. Luego se estiman los pesos de material cementante, agua y agregado, y se hace la dosificación del aditivo” seleccionado de acuerdo con las propiedades deseadas del concreto permeable.

Método del ACI 522 [10]

Se caracteriza por ser un proceso iterativo, cuya finalidad es alcanzar una mezcla con equilibrio entre vacíos, resistencia, cantidad de pasta y trabajabilidad. La densidad seca de los agregados gruesos se utiliza para dosificar el concreto permeable. Muchos estudios fueron realizados y los resultados muestran que la relación del volumen seco de agregado grueso en una unidad de volumen de concreto (b/b_0) puede ser usada como un parámetro de diseño del concreto permeable. El método puede dividirse en 8 etapas: determinación del peso del agregado, ajuste al estado de saturado superficialmente seco (SSS), cálculo del volumen de pasta, determinación de la cantidad

de cemento, cálculo del volumen de agua, determinación del volumen sólido, verificación de la cantidad de vacíos, y ensayo del lote experimental.

Método de Nguyen et al. [32]

Es un método modificado para el diseño de la mezcla del concreto permeable. Se basa en la cuantificación de la capa de pasta de cemento que recubre la grava y en la suposición de que la pasta de cemento actúa sólo como recubrimiento; no llena el vacío entre los granos de grava. Este método de dosificación de la mezcla se divide en tres pasos: la determinación del volumen de los áridos, volumen de la pasta de cemento, y relación agua-cemento.

Método de Yahia e Kabagire [33]

Consiste en la utilización del concepto de la densidad de empaquetamiento del agregado para facilitar la dosificación del concreto permeable que cumpla con las propiedades deseadas. Los autores resaltan que la densidad de empaquetamiento depende de la distribución, la dimensión y la forma de los agregados, así como del método de compactación. Se usa una relación agua/cemento de 0,30 y agregados con diferentes tamaños máximos nominales (10 mm, 14 mm y 20 mm). Para determinar la densidad de empaquetamiento aplicaron la norma ASTM C29, el cual se utiliza a menudo para determinar los valores de densidad aparente que son necesarios para utilizar muchos métodos de selección de proporciones para las mezclas de concreto.

A partir de los valores obtenidos para cada tipo de agregado, fue posible determinar el porcentaje de volumen de pasta usado en las mezclas (entre 12-33 %) y la cantidad de agregado grueso (entre 1500-1700 kg/m³). Los autores compararon los dos métodos usados para el cálculo de la densidad de empaquetamiento y verificaron que los resultados son semejantes. Concluyen que el método propuesto por la norma ASTM C29 puede ser utilizado por su facilidad para el diseño de concreto permeable, al momento de calcular la densidad de empaquetamiento

Método de Jimma e Rangaraju [34]

Los autores introdujeron el concepto de la capacidad de la pasta para formar una película como un parámetro para la dosificación de concreto permeable. Dos características de la pasta deben ser consideradas en ese abordaje, la fluidez, con un asentamiento mayor de 2cm para concreto permeable, y la capacidad de formación de película. Una pasta muy fluida no formará una película estable lo que ocasionaría una baja resistencia a la compresión y una baja permeabilidad del concreto permeable debido a la colmatación de los vacíos en su interior.

El espesor de la pasta sería el valor promedio de material que envuelve cada agregado individualmente. Una pasta más espesa produce una película más gruesa, lo que conlleva a una menor permeabilidad debido a la reducción de los vacíos, pero de esta forma contribuye al mejor desempeño de las propiedades mecánicas y de durabilidad. Una pasta más fluida genera una película más fina debido al escurrimiento de ésta hacia el fondo, de modo tal que la permeabilidad y las propiedades mecánicas son perjudicadas. De esta forma la idea es obtener un espesor de pasta que genere propiedades reológicas adecuadas al concreto permeable para que no ocurra colmatación de los vacíos y en cambio se produzca una maximización de la permeabilidad y las propiedades mecánicas.

Después de una revisión de la literatura como se muestra en este capítulo y se resume en la tabla 9-1, el siguiente paso fue comparar las 5 metodologías mediante las figuras 9-1 a 9-3, en las que se hace una comparación de la metodología vs los variables de control y las variables respuesta, y a partir de estos datos toma una determinación de cual metodología sería mas adecuado utilizar. Las dosificaciones finales de la mezcla son muy similares, variando los componentes de la pasta de cemento en cantidades mínimas, siempre en mayor cantidad para la ACI 522R-10.

La misma cantidad de árido grueso y arena se utilizaron para las metodologías. La principal diferencia entre las metodologías ACI es la forma de iniciar el diseño de la mezcla. La ACI 522R-10 comienza calculando los pesos de los componentes, calculando después los volúmenes como se describe en la tabla 9-1, comienza con los volúmenes y finaliza con los pesos de los componentes.

Figura 9-1: Valores máximos y mínimos de la relación a/c de cada metodología. (elaboración propia)

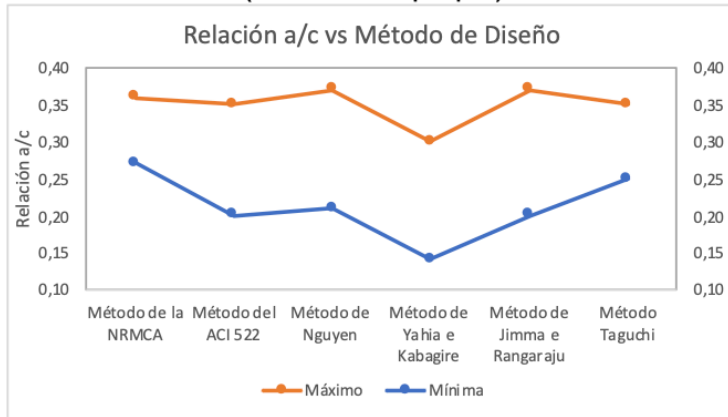


Figura 9-2 : Valores máximos y mínimos de la resistencia a compresión de cada metodología. (elaboración propia)

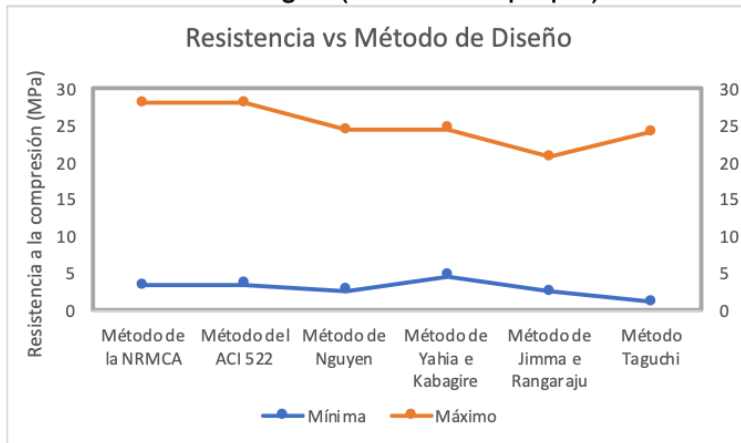
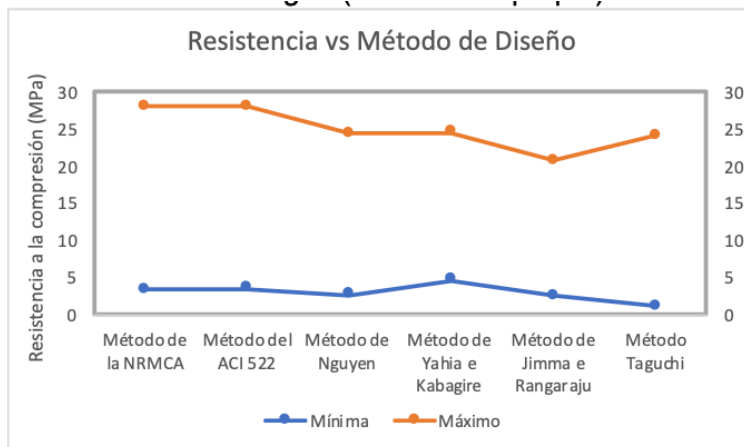


Figura 9-3 : Valores máximos y mínimos de la permeabilidad de cada metodología. (elaboración propia)



De acuerdo con las Figuras 9-1 a 9-3 en sus valores máximos, en comparación con la metodología ACI 522R-10, las otras metodologías tienden a tener una resistencia a la compresión menor, al igual que la permeabilidad. Las mezclas con la metodología ACI 522R-10 tienden a resistir mejor el impacto de las cargas de tráfico y tardan más en formar grietas en su estructura debido a la mayor resistencia a la deformación por el diseño de la dosificación, donde la pasta es menos seca y la mezcla tiene mayor trabajabilidad.

10. Caracterización de los Materiales y Dosificación de Mezclas.

En este capítulo se describe el análisis granulométrico de los áridos reciclados y naturales con sus respectivas graficas granulométricas, así mismo se registra la densidad y absorción. También se muestra la ficha técnica del cemento de uso general tipo Argos, y se describe el proceso del diseño de mezcla, donde se ilustra el paso a paso del cálculo de las cantidades y los ajustes respectivos aplicando la metodología seleccionada del Comité 211.3R-02 del ACI. Por último, todas las cantidades se resumen en una tabla 10-1.

El material pétreo que se utilizó, como agregado grueso natural fue suministrado por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, mientras que el agregado grueso de residuos de cilindros de concreto fue suministrado por la empresa, especializada en la construcción de proyectos de vivienda ARCONSA a las afueras de la ciudad de Medellín, especialmente en el municipio de sabaneta en el proyecto Ocre. Este material fue demolido en el laboratorio de la universidad Nacional de Colombia sede Medellín Cimex (Figura 10-1)

Figura 10-1 : Cilindros del proyecto ocre arconsa. Fuente: Edinson murillo



Figura 10-2 : Cimex Universidad Nacional sede Medellín. (elaboración propia)



Figura 10-3 : Agregado pétreo utilizado (elaboración propia)



Se realizó una revisión bibliográfica detallada de los materiales, procesos, especificaciones y desarrollos recientes en este tema, utilizando las bases de datos de la Universidad Nacional de Colombia, bibliografía especializada y normas técnicas nacionales e internacionales.

Los ensayos de caracterización de los materiales son de gran importancia dado que, de acuerdo con la calidad de los materiales, garantizan el éxito del diseño del concreto permeable y su comportamiento en estado fresco y endurecido.

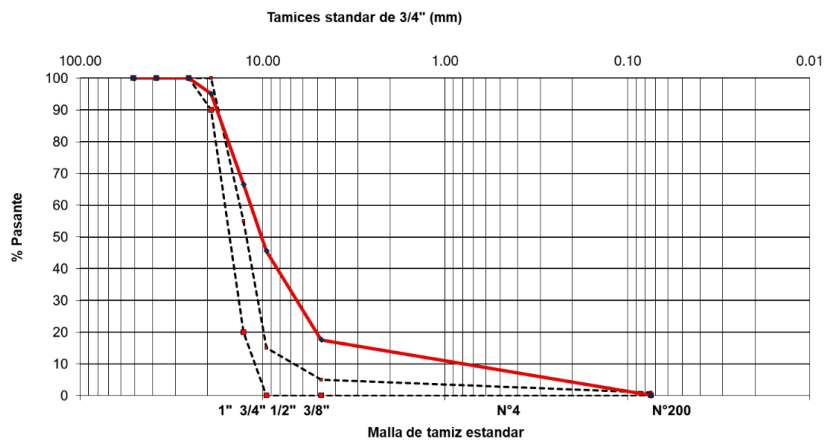
A continuación, se presentan los resultados y análisis de la caracterización de los agregados, sus gráficas granulométricas, el peso específico y la absorción de los agregados. También se presenta la ficha técnica del cemento utilizado, y todos los cálculos de acuerdo con las normas establecidas para materiales y concretos, tales como ASTM, AASHTO, NTC, normas internacionales y la I.N.V.E-213, norma Colombia. Todo esto se describe a continuación.

10.1 Análisis granulométrico del agregado grueso

El análisis granulométrico de los agregados natural 3/4" y agregado de residuo de bloques de concreto, como se mencionó anteriormente, se basó en la norma colombiana I.N.V.E-213-13, NTC-174; y en las normas internacionales ASTM C-136 – 01 AASHTO T-27 - 99 NLT 150. A continuación, se muestran los resultados de la granulometría.

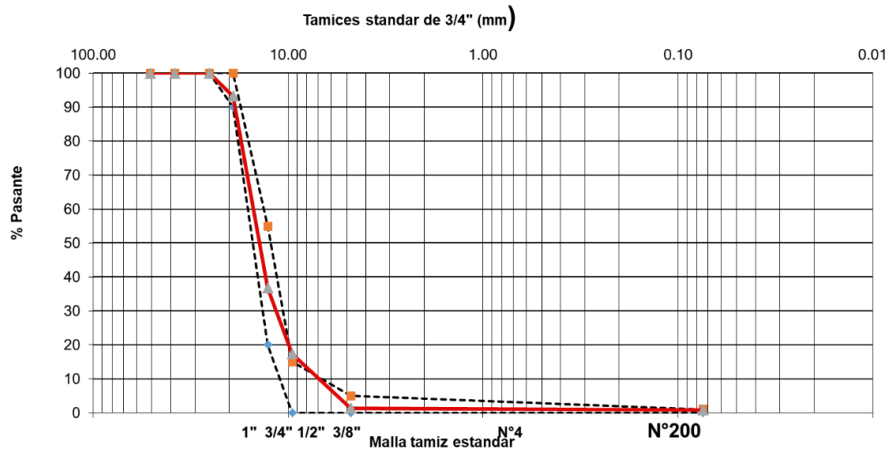
Como se puede observar en la Gráfica 11-1, la curva de la granulometría del agregado de residuo de cilindros de concreto se sale de los límites establecidos por la norma, por lo que fue necesario tamizar para que el material se ajustara a la curva, cuando en el diseño de mezcla no se presenta la curva granulométrica, ya que el diseño no se basa en el ajuste granulométrico de los agregados.

Figura 10-4 : Granulometría agregado reciclado de cilindros de concreto sin ajustar (elaboración propia)



Puesto que el agregado natural de 3/4" cumple con la granulometría establecida por la norma, no fue necesario ajustar el agregado a la curva granulométrica como sucedió con el agregado de residuos de bloques de concreto.

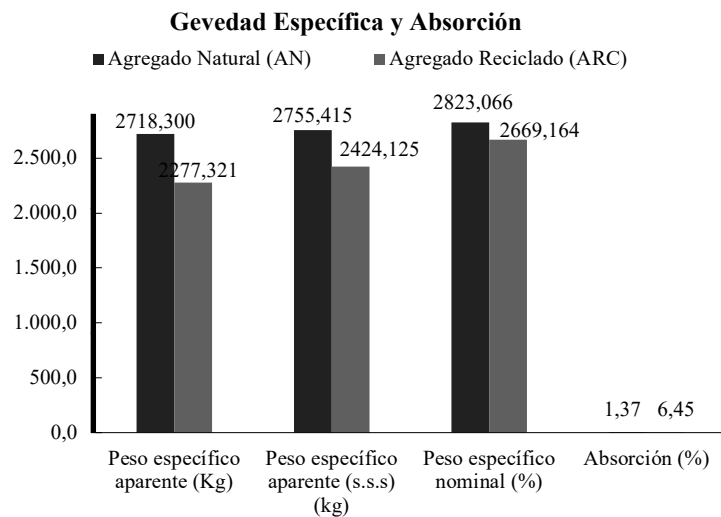
Figura 10-5 : granulometría agregado natural (elaboración propia)



10.2 Densidad y Absorción del Agregado Grueso

En el Figura 10-6 se puede observar que el peso específico aparente se encuentra en los rangos establecidos por la norma. Por lo tanto, se puede decir que su valor es adecuado para el diseño de la mezcla. Por otra parte, la absorción es del 1.37%, mientras que en el agregado de reciclado de bloque de concreto Gráfica 11-3 es de 6.45%, lo que indica una absorción bastante alta, ya que da superior para el agregado reciclado de bloque de concreto, razón por la cual en cada caso se debe hacer un ajuste adecuado del agua en dichas proporciones basados en el cálculo de porcentaje de humedad a la hora de hacer el diseño.

Figura 10-6 : Gravedad específica y absorción para los Agregados



10.3 Ficha técnica del cemento

El cemento utilizado en la investigación fue el tipo Argos de uso general, del cual se presenta la ficha técnica a continuación:

Tabla 10-1: Especificaciones del Cemento Argos de uso General
(Fuente: ARGOS, 2019) (elaboración propia)

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CEMENTO ARGOS USO GENERAL			
PARÁMETROS QUÍMICOS	UNIDADES	NORMA DE ENSAYO	VALOR
Finura	Blaine, min, cm ² /s	NTC33	A
	Retenido Tamiz 45µm (%)	NTC294	A
Cambio de longitud por autoclave, expansión.	máx (%)	NTC107	0,80
Tiempo de fraguado, Ensayo vicatB	No menos de, minutos	NTC118	45
	No mas de, minutos	NTC118	420
Contenido de Aire en Volumen de mortero,	máx (%)	NTC224	12
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx	mm	NTC4927	0,02
RESISTENCIA A LA COMPRESION			
3 días	(MPa)	NTC220	8
7 días		NTC220	15
28 días		NTC220	24

10.4 Diseño de mezclas de Mezclas del componente experimental.

El objetivo del diseño de una mezcla de concreto es determinar los pesos de los principales componentes de una mezcla de concreto de acuerdo con ciertos requisitos, como la resistencia, la manejabilidad, etc.”[31]

Los métodos dependen de ciertas ecuaciones y gráficos basados en análisis matemático de los resultados obtenidos de la experiencia de campo que se adquiere.

En general, los métodos de diseño de mezclas dan algunas indicaciones al diseñador para validarlas y ajustarlas mediante mezclas experimentales en los laboratorios locales a fin de comprobar las variables relacionadas a las características y propiedades de los materiales locales y las condiciones del entorno [31] [31], para así poder llevar un método adecuado y más exacto al campo de acuerdo a las solicitudes de cada proyecto, y no caer en la práctica de ensayo y error.

Después de revisar varios métodos de dosificación de concreto permeable y hacer un comparativo mediante gráficas como se muestra en la figuras 9-1 a 9-3, y se resumen en la tabla 10-1, se encontró que varios de los métodos situados a continuación se basan

en la experimentación, otros como el de la ACI en procesos iterativos, otros en el aumento y/o variación de parámetros como la relación agua/cemento que la recomienda, el tamaño máximo de agregado de partículas, pasta de cemento y/o densidad. Todos estos métodos buscan mejorar propiedades como la resistencia a la compresión y flexión, la permeabilidad, el porcentaje de vacíos. Finalmente, se seleccionó la ACI 522R, puesto que, de acuerdo con las investigaciones revisadas utilizando este método se encontraron mejores resultados en la resistencia a la compresión, permeabilidad y porcentaje de vacíos, además de que no requiere tantos ensayos o desarrollo de parámetros nuevos como alguna de las otras metodologías. Igual haciendo el comparativo que se ilustra en las Figuras 9-1 a 9-3, con los valores obtenidos en la literatura, es la que mejores valores presenta, tales como la resistencia a la compresión que está entre 3,5 y 28 MPa, la permeabilidad que está entre 0,2 y 2,1 mm/s y la relación agua/cemento que está entre 0,2 y 0,35. Mientras que para las otras metodologías estudiadas estos parámetros son más irregulares y como se expone en la descripción de cada una de ellas en el capítulo 9 y se ilustra en la tabla 9-1 hay que variar más parámetros, aumentar más la cantidad de pasta y en algunos casos hasta utilizar aditivos, por eso después de revisada la literatura se optó por seleccionar la metodología ACI 522R como metodología de diseño de mezcla para el componente experimental del trabajo.

10.5 Dosificación de Materiales

A partir del diseño de Mezclas seleccionado y siguiendo cada uno de los pasos establecidos en el método del Comité 211.3R-02 del ACI, recomendaciones del Comité 522, se realizaron 5 cilindros de moldes 100mmx200mm por cada una de las 8 combinaciones arrojadas por el diseño experimental. Esto nos da un total de 40 cilindros, de los cuales 3 fueron para ensayos destructivos como resistencia a la compresión, uno para módulo de elasticidad y otro para prueba a la permeabilidad, partiendo de un diseño inicial de 1 m^3 , correspondiente a una resistencia esperada de 210 kg/cm^2 .

A continuación, se realiza el procedimiento del desarrollo de la metodología de diseño de mezcla de concreto permeable utilizando la metodología de la ACI 522R, replicando el procedimiento aplicado en el laboratorio.

1. Se caracterizaron los materiales para el diseño con agregados naturales (AN), cuyas propiedades se presentan en la tabla 10-2:

Tabla 10-2: Característica de los agregados (elaboración Propia)

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS		
ITEM DESCRIPCION	DATOS	UND
A: Peso del recipiente	150,3	g
B: Volumen del recipiente + muestra húmeda	2345,5	g
C: Peso del recipiente + muestra seca	2341,6	g
D Contenido de humedad $((B-C)/(C-A))$	0,178%	%
PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS		
ITEM DESCRIPCION	DATOS	UND
A: Peso saturado superficialmente seco (sin sumergir)	5000	g
B: Peso saturado y superficialmente seco (sumergido)	3155,7	g
C: Volumen de la masa + volumen de vacíos (A-B)	1844,3	cm ³
D: Peso de material seco al horno	4951,2	g
E: Peso específico de masa (D/C)	2,68459578	g/cm ³
F: Peso específico SSS (base saturada) (A/C)	2,71	g/cm ³
G: Peso específico aparente (base seca) (D/(D-B))	2,75756057	g/cm ³
H: Absorción $((A-D)/D)*100$	0,98561965	%
PROPIEDA	VALOR	UNIDAD
b/b ₀ =	0,990	N/A
PUS=	1500,054	Kg/m ³
PUC =	1624,325	Kg/m ³
Absorción	0,986	%
Gravedad Especifica		N/A
Nivel de Humedad	0,002	%
Peso específico aparente	2,685	g/cm ³
Peso específico aparente (s.s.s)	2,710	g/cm ³
Peso específico nominal	2,758	g/cm ³

2. Se determinó el valor efectivo b/b₀ para determinar la cantidad de agregado para un concreto permeable empleando la tabla 11-3 de referencia, de acuerdo con la ACI 522R-10.

Tabla 10-3: tabla de referencia Valor efectivo b/b_0 (ACI522 R-10)

PORCENTAJE DE AGREGADO FINO %	b/b_0	
	No. 8(3/8")	No. 67(3/4")
0	0,99	0,99
10	0,93	0,93
20	0,85	0,86

3. Dado que en el diseño de mezcla contemplaba un concreto permeable con 0% de agregado fino el valor efectivo fue de $b/b_0 = 0,99$
4. Luego se determinó del peso del agregado grueso (PAG) que de acuerdo con lo recomendado por la Pervious Pavement Organization, ACI 522R-10 está en un rango de 1190 Kg/m^3 a 2115 Kg/m^3 . A partir del peso unitario seco compactado del agregado grueso (PUSC) y el valor efectivo b/b_0 , se obtiene:

Ecuación 10-1: Peso unitario seco compactado (ACI 522 R-10)

$$PUSC = \frac{PUC}{H}$$

y

Ecuación 10-2: relación entre valor efectivo y peso del agregado (ACI 522 R-10)

$$\frac{b}{b_0} = \frac{PAG}{PUSC}$$

Así, se obtiene la ecuación:

Ecuación 10-3: Peso del agregado grueso (ACI 522 R-10)

$$PAG = \frac{b}{b_0} * PUSC = \frac{b}{b_0} * \frac{PUC}{1 + \frac{H}{100}} * 1m^3$$

$$PUSC = 0.99 * \frac{1624.325 \frac{Kg}{m^3}}{1.02} * 1m^3 = 1592.47 \text{ Kg/m}^3$$

Por último, se realiza el ajuste por absorción como sigue:

ECUACIÓN 10-4: PESO DEL AGREGADO SUPERFICIALMENTE SECO (ACI 522 R-10)

$$PAG_{(sss)} = PAG * \left(1 + \frac{H}{100}\right)$$

$$PAG_{(sss)} = 1485.05 * \left(1 + \frac{0,986}{100}\right) = 1499.69 \text{ Kg/m}^3$$

Tabla 10-4 : Resumen valores característicos (elaboración propia)

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
b/bo	0,99	N/A
PUS	1500,054	Kg/m ³
PUC	1624,325	Kg/m ³
PUSC	1592,4740	Kg/m ³
PAG	1485,050	Kg/m ³
PAG (sss)	1499,692	Kg/m ³

5. Se eligió el contenido de vacíos de 18% de acuerdo con lo recomendado en la metodología de diseño seleccionada la ACI 522 R-10 para una resistencia a la compresión esperada de 210 Kg/cm² o 21 MPa. Ver ACI 522 R-10 capítulo 4, figura 4.1, relación de contenido de vacíos y resistencia a la compresión a los 28 días, tal como se ilustra en la gráfica.

Figura 10-7 : Relación entre contenido de vacíos y la resistencia a la compresión a los 28 días para tamaños de agregados N° 67 Y N° 8 (ACI 522 R-10)

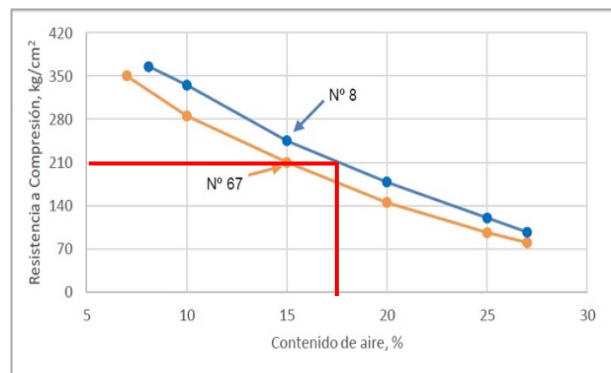
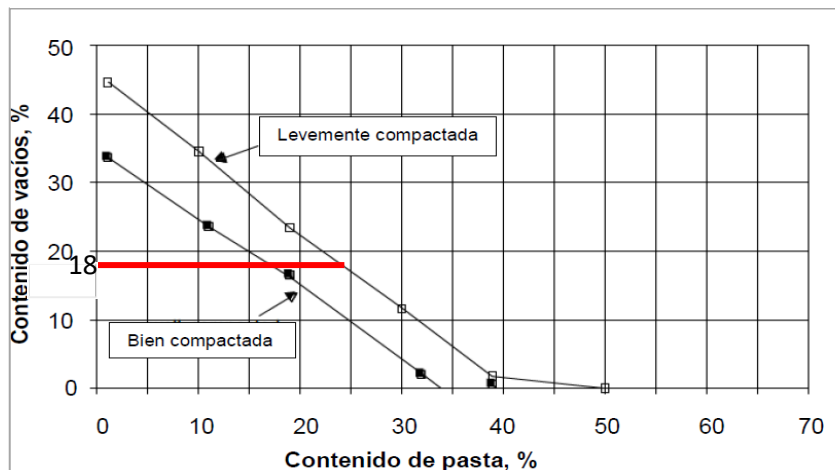


Tabla 10-5: Resistencia a la compresión esperada y % de vacíos. (elaboración propia)

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
$f'c =$	210	Kg/cm ²
% de Vacíos	18	%

Luego se procedió a calcular la cantidad de pasta de cemento para el concreto permeable como lo recomienda la ACI 522 R. Para un porcentaje de vacíos del 18% se utiliza la relación contenida de pasta vs contenido de vacíos para una muestra levemente compactada, tal como se muestra en la gráfica 11-5.

Figura 10-8 : Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregado N° 8. (ACI 522 R-10)**Tabla 10-6:** Características del cemento (elaboración propia)

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Contenido de Pasta	24	%
Cantidad por m ³	0,2367	m ³
P _c	3110	Kg/m ³
a/c	0,35	N/A

Para % de Pasta es 23,667 %, que sería igual a 0,2367 m³, se calculó contenido de agua y cemento para una relación a/c = 0,35 mediante la relación: Volumen de Pasta = Volumen de cemento + Volumen de agua.

Ecuación 10-5: Volumen de pasta de cemento (ACI 522 R-10)

$$VP = \frac{c}{Pe} + \frac{\frac{a}{c} * c}{Pe}$$

$$0,24 = \frac{c}{3110} + \frac{0,35 * c}{3110}, \text{ de donde } c = 552,888 \text{ Kg}$$

Con la cantidad de cemento se calculó la cantidad de agua necesaria a partir de la $a/c = 0,35$, $a = 0,35 * c$, $a = 0,35 * 552,888 = 193,511$ L. Los resultados se presentan en la tabla 10-6

Tabla 10-7: Cantidad de material a utilizar (elaboración propia)

MATERIALES	Peso por m ³ (kg)
Cemento	552,286
Agua	190,850
Agregado grueso	1499,692

A partir de las cantidades obtenidas se procedió a hacer la corrección por humedad y absorción, es decir, a calcular el agua efectiva y realizar el balance de agua para el agregado grueso. Mediante las relaciones siguientes y usando hojas de cálculo de Excel, se han obtenido los valores de diseño de mezcla mostrados en la tabla 10-7.

- Adición de agua = (% de absorción (a) - % de humedad (H)) * Agregado grueso
- Agregado grueso = Peso Seco * % de Humedad (H)
- Agua efectiva = Agua + Adición de agua

Tabla 10-8: Cantidades de material a utilizar ajustadas (elaboración propia)

MATERIAL	PESO POR m ³ (Kg)
Cemento	552,286
Agua efectiva	126,316
A. Grueso	1485,080
TOTAL	2163,282

Por último, a partir del diseño de mezcla mostrado en la tabla 11-9, y luego de sacar las proporciones con los valores calculados y las dimensiones del cilindro, se calcularon las cantidades de material para 5 cilindros de 100mm*200mm.

Tabla 10-9: Cantidad de Materiales para 5 cilindros (elaboración propia)

Materia	Cantidad	Unidad
Cemento	3,245	Kg
Agua de mezclado	0,958	L
Agregado grueso	13,638	Kg
TOTAL	17,841	Kg

El mismo proceso se siguió para calcular las cantidades del concreto permeable con agregados reciclados, para las mismas relaciones agua cemento e iguales tamaños de agregado. Las dosificaciones de cada mezcla, de acuerdo con la calculado se presentan en la Tabla 10-2.

Tabla 10-10: Dosificación de Mezclas (elaboración propia)

Diseño de Mezcla AN: 100%		Diseño de Mezcla 1 AR: 100%	
TMP (mm)	a/c =	TMP (mm)	a/c =
12,5	0,35	12,5	0,35
Material	Cantidad (kg)	Material	Cantidad (kg)
Cemento	3,245	Cemento	2,947
Agregado Grueso	13,638	Agregado Grueso	12,47
Agua	0,958	Agua	1,042
Total		Total	

11. Resultado y Discusión

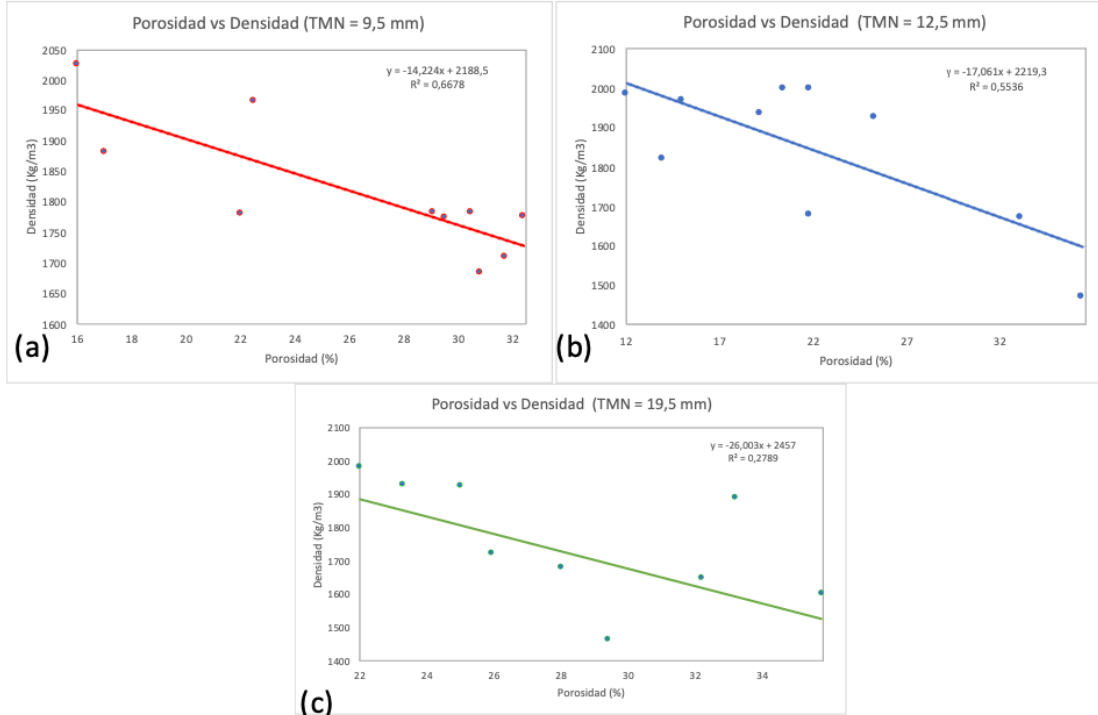
En este capítulo se comentan los resultados obtenidos. De forma general se muestran y se describen las tendencias encontradas en la literatura, así como los valores encontrados en el componente experimental; es decir la resistencia a la compresión correlacionada con la permeabilidad, la densidad correlacionada con densidad, clasificando las figuras por relación agua cemento de la muestra, así como por tamaño máximo de partícula. Se hace un comparativo entre los resultados de permeabilidad y

resistencia a la compresión, con el fin de determinar su relación. Así mismo se muestran y comentan una posible correlación entre la porosidad y la densidad. Todo esto se realiza con la idea de hacer un comparativo de estas variables respuestas y a partir de estos valores y correlaciones hacer inferencias sin hacer afirmaciones definitivas, puesto que faltarían estudios, así como más muestras, pruebas y ensayos más detallados, que llevarán a afirmaciones más concluyentes. Por lo tanto, esto lo valida como un estudio de profundización, y no de investigación.

11.1 Correlación de la Porosidad y la Densidad.

La relación entre la densidad y la porosidad para cilindros y núcleos fabricados con tres relaciones de a/c diferentes (0,35, 0,26 y 0,30), relaciones a/c que se seleccionaron de acuerdo a la tendencia mostrada en literatura consultada (tabla 8-11b), se presenta en la Figura.11-1. No hay duda de que la relación a/c y la porosidad tienen una influencia significativa en la densidad de los materiales a base de cemento.[37] Sin embargo, la porosidad debe ser la porosidad abierta, no la interconectada, porque la influencia de la porosidad en la densidad no depende de si los poros están interconectados o no. Para evaluar cómo la porosidad abierta y la relación a/c influyen en la densidad de los cilindros se ha representado la Figura. 11-1. Se observa que cuando la porosidad abierta aumenta, la densidad del concreto permeable disminuye gradualmente. Por otro lado, la densidad del cubo cambió con la relación a/c de manera que la relación a/c de 0,35 era la óptima y tanto la disminución de la relación a/c como el aumento de la relación a/c provocaban la disminución de la resistencia de los cilindros. A continuación, se aplicó un análisis de regresión lineal. Las curvas de mejor ajuste y las ecuaciones correspondientes se mostraron directamente en la figura 11-1. El valor de R^2 de la relación a/c de 0,35 de 0,9199, lo que indica que la porosidad abierta y la relación a/c desempeñan un papel clave en la densidad del concreto permeable en el caso de la relación de 11-1b, ya que para las otras relaciones el R^2 fue mucho menor; para la mezcla con relación agua cemento de 0,30 el R^2 fue de 0,3665, mientras que para la relación de 0,26 el R^2 fue de 0,142, lo que indica de acuerdo a la literatura consultada (tabla 7-11b) que de las correlación establecida con los datos encontrados la más fuerte es la que tiene una relación agua cemento de 0,35.

Figura 11-1 : Porosidad vs Densidad para diferentes relaciones agua cemento

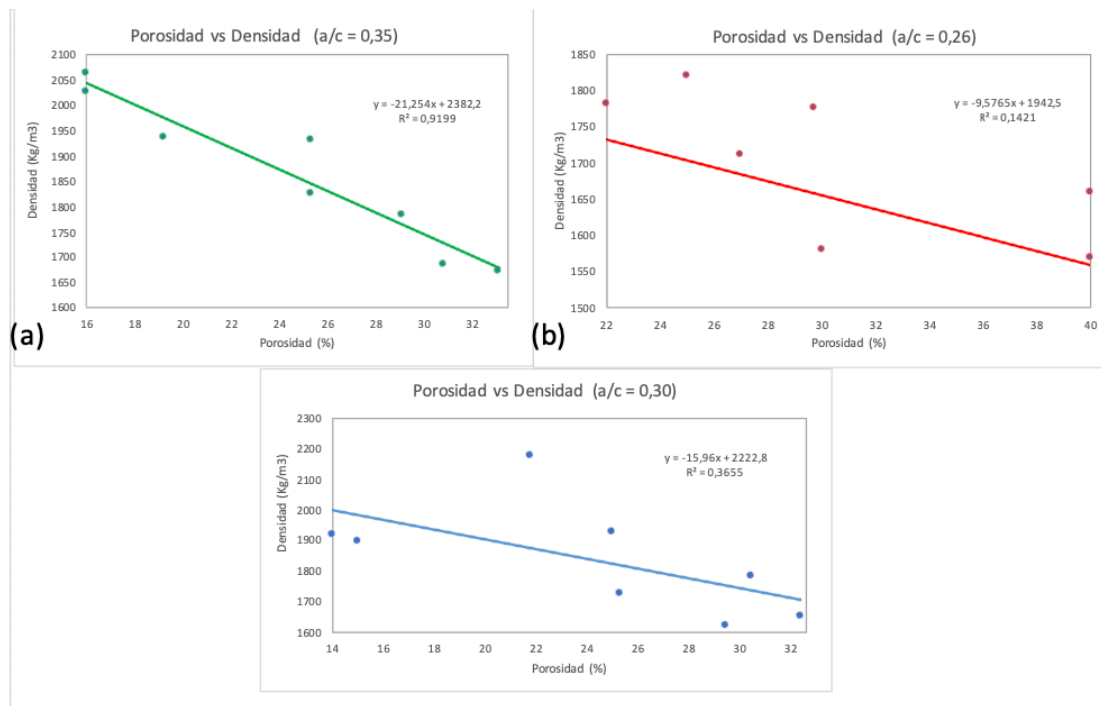


Las figuras 11-2. muestran que la relación entre densidad y la porosidad se vio afectada por el tamaño de árido. Mientras que todas las relaciones tenían una pendiente similar, mientras el intercepto difería. Este hallazgo en la literatura se vio más pronunciado cuando se comparó mediante relación lineal el menor tamaño de árido de la mezcla de 9,5 mm con las dos mezclas de áridos de tamaños 12,5 mm y 19,5 mm. Por el contrario, todas las mezclas tenían una relación similar de densidad frente a la porosidad. Los valores de la porosidad se están entre 22% y 35%, mientras que los de porosidad están entre 1400 kg/m³ y 2000 kg/m³, con una ecuación lineal de pendiente negativa. Estas diferencias están estrechamente relacionadas con una tendencia aparente de disminución de la densidad conforme aumenta la porosidad, por ejemplo, el tamaño de 9.5 mm tiene un R^2 de 0,6678 y una pendiente de -14,224 pendiente que representa la disminución, siendo esta la de relación más fuerte ya que la de 12,5 mm tiene un R^2 de 0,5536 y una pendiente de -17,061, mientras que el R^2 de las muestras de tamaño de 19,5 mm es de 0,2789 siendo este el más bajo con una pendiente de -26,003. Esta tendencia lineal no permite determinar si el tamaño de agregado y la relación a/c tienen un efecto en la relación entre la densidad y la porosidad. Por otra parte, el valor medio de los interceptos entre los ejes de densidades y línea de tendencia, para los tres

tamaños simple superó los 2150 kg/m³. Sin embargo, estos resultados no es significativos para establecer una tendencia marca, según el análisis de varianza cuyo valor para los tres tamaños de agregado fue > 0,05)

A continuación, se aplicó el análisis de regresión. Las curvas de mejor ajuste correspondientes se mostraron directamente en las figuras 11-1 y 11-2. Se obtuvieron valores de R² ya mencionados en los párrafos anteriores, lo que demuestra que la porosidad interconectada juega un papel clave en la densidad al agua del concreto permeable. La razón es que el aumento de la porosidad interconectada disminuye la densidad y facilita la permeabilidad del agua a través del concreto permeable.

Figura 11-2 : Porosidad vs Densidad para diferentes tamaños máximos de partícula



11.2 Correlación de la Permeabilidad y la Resistencia a Compresión

En el caso del concreto permeable, existe la posibilidad de que la disminución del volumen de mortero para aumentar la porosidad mejorar la permeabilidad al agua, pero simultáneamente disminuir la resistencia. Por lo tanto, lograr tanto una alta permeabilidad al agua y una alta resistencia es una tarea difícil.[37] Para revisar la resistencia y la permeabilidad simultáneas de las mezclas de concreto permeable

encontrada en la literatura, se presentan las figuras 12-3 y 12-4 clasificadas por grupos 2 grupos; uno de relaciones agua cemento de 0,26, 0,30 y 0,35 y el otro de tamaños máximos nominal de 9,5 mm, 12,5 mm, 19,5 mm, con el propósito de mirar que correlación tiene mejor repuesta a estas variables de control.

Las Figuras 11-3 y 11-4 muestran la relación entre el coeficiente de permeabilidad y la resistencia a la compresión. La relación lineal muestra que la resistencia disminuye con el aumento de la permeabilidad. La buena regresión entre el coeficiente de permeabilidad y la resistencia a la compresión complementa las discusiones anteriores sobre el efecto de la unión entre el árido y la pasta, donde una unión insuficiente en las mezclas de AR da lugar a mayores redes de poros y menor resistencia.[38].

En primer lugar, se puede comprobar que cada curva tiene un valor que da la máxima resistencia del cilindro. De alguna manera, todos los máximos se producen en una relación a/c de 0,35, apuntando está a ser la relación agua/cemento más estable. Estos valores también pueden tomarse teniendo en cuenta el tamaño máximo nominal y la relación a/c que dan el mejor rendimiento de resistencia-permeabilidad. A continuación, hay que señalar que con un volumen de cemento $\geq 30\%$, no es posible obtener un coeficiente de permeabilidad al agua no sumergido de superior a 1,9 mm/s ni un coeficiente de permeabilidad al agua sumergida superior a 2,7 mm/s. Por el contrario, otro lado, con un volumen de cemento $\leq 20\%$, no es posible obtener una resistencia del cilindro superior a 25 MPa. Para lograr un equilibrio entre la permeabilidad al agua y la resistencia, se recomienda fijar el volumen de cemento en el 25% [10] y la relación a/c de 0,35, lo que daría unos coeficientes de permeabilidad al agua no sumergida de 3,66 mm/s y 5,21 mm/s, y una resistencia al cilindro > 28 MPa.

De acuerdo con la revisión realizada la cual se plasmó en las Figuras 11-3 y 11-4, la resistencia a la compresión del concreto permeable depende principalmente de la porosidad del concreto; la edad, la relación agua/cemento, el tipo de material aglutinante, la forma y el tamaño de los agregados y la muestra de ensayo muestran una influencia marginal en la resistencia del concreto permeable para una porosidad determinada. En el mismo sentido, la reducción del tamaño de los áridos disminuye la porosidad del concreto permeable y, en consecuencia, aumenta su resistencia, como se puede observar en los valores máximos de la resistencia a la compresión de la figura 11-4a y

11-4b de tamaños máximo nominal menores de la correlación entre la resistencia y la permeabilidad del concreto permeable.

Figura 11-3 : Permeabilidad vs resistencia a la compresión para diferentes relaciones agua cemento (a) $a/c = 0,26$, (b) $a/c = 0,30$, (c) $a/c = 0,35$

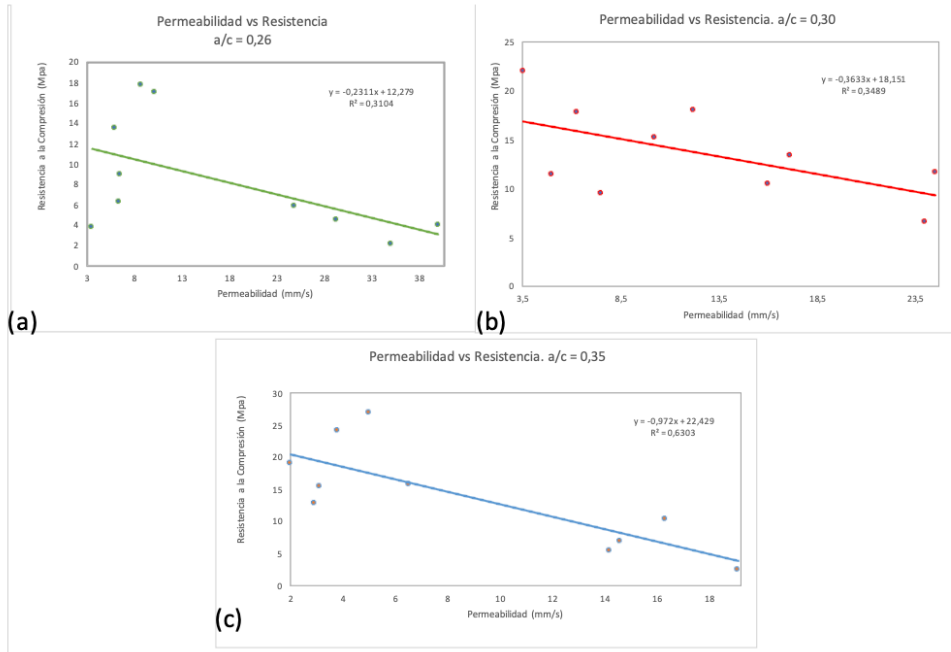
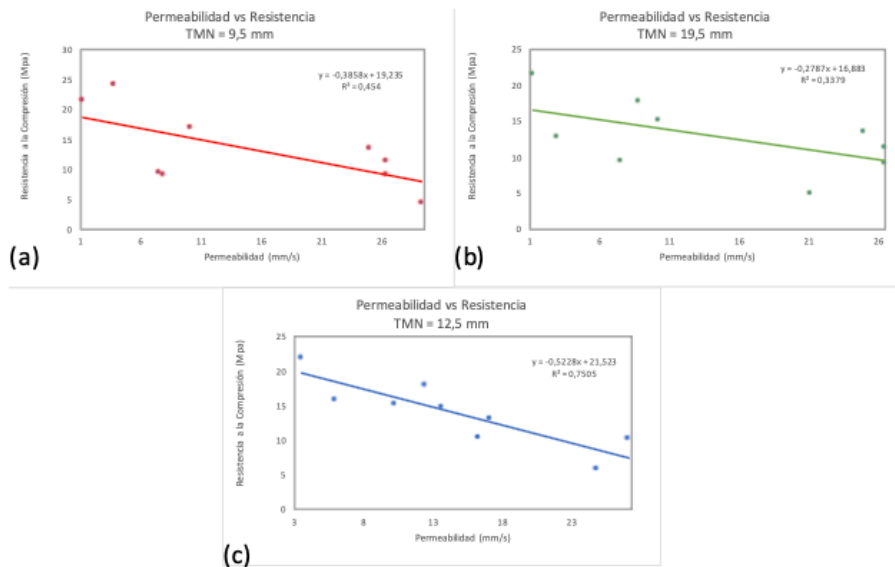


Figura 11-4 : Permeabilidad vs Resistencia a la compresión para diferentes relaciones agua cemento (a) TMN = 9,5 mm, (b) TMN = 12,5 mm, (c) TMN = 19,5 mm.



11.3 Evaluar experimentalmente el comportamiento físico y mecánico de un concreto permeable con áridos reciclados y naturales

Luego de revisar la literatura y correlacionar los valores encontrados de porosidad vs densidad, permeabilidad vs resistencia por grupos de relación agua/cemento y tamaño máximo nominal, se procedió a realizar un ensayo experimental seleccionando los valores más estables y regulares para contrastar los resultados proyectados por las correlaciones. A continuación, se describe y se comentan los resultados obtenidos.

Se utilizó cemento Portland CEM gris de uso general (sus especificaciones se muestran en la tabla 10-1), agregado de piedra natural de $\frac{3}{4}$ de tamaño máximo 12,5 mm (AN) y agregados reciclados de cilindros de concreto reciclado (AR). Se trituraron y tamizaron para obtener partículas de 4,75-12,50 mm para su uso como áridos gruesos reciclados. (su especificaciones y granulometrías se muestran en la tabla 10-2, y Figuras 10-1 y 10-2). Una relación agua/cemento de 0,35, que fue la que tuvo valores más estables en las correlaciones de porosidad vs densidad, y permeabilidad vs resistencia. Las densidades en seco de AN, y el AR se muestran en la figura 10-3, así como las absorciones. La baja densidad, la alta absorción de agua y la alta pérdida por abrasión de la máquina de ángeles del árido reciclado se debieron a la alta porosidad del mortero de cemento adherido sobre el árido reciclado, como indicaron investigadores.[39]

Todos los valores y propiedades iniciales de diseño de la mezcla experimental se muestran en el capítulo 10 sección 10.4 dado que es en este capítulo donde selecciona y describe la metodología de diseño. En este capítulo solo se muestran y se discuten los resultados obtenidos.

Se utilizaron cinco (5) muestras cilíndricas de 100x200 mm (diámetro x altura) para cada prueba y mezcla. Se secaron en una estufa a una temperatura de 110° C hasta que el peso fuera constante y, finalmente, se sumergieron en agua para determinar el volumen de sólidos de la muestra. La densidad y el contenido de vacíos de las muestras se calcularon siguiendo la norma ASTM C1754 (ASTM International, 2012) para calcular la densidad y el contenido de huecos del concreto permeable. Mediante las ecuaciones siguientes:

Ecuación 11-1: Ecuación de Densidad. [7]

$$Densidad = \frac{K * A}{D^2 * L}$$

Ecuación 11-2 Ecuación de Contenido de Vacíos

$$Void\ Content = \left[1 - \left(\frac{K * (A - B)}{\rho_w * D^2 * L} \right) \right] * 100$$

Donde K es igual a 1 273 240 (mm³kg/m³) en unidades SI, A es la masa seca (g), D es el diámetro medio (mm) y L es la longitud media de la muestra (mm), B es la masa sumergida de la muestra (g) y ρ_w es la densidad del agua a la temperatura del baño de agua (kg/m³).

La porosidad del concreto permeable endurecido se determinó utilizando la densidad libre de vacíos (T) y la densidad medida (D) de las mezclas de concreto, utilizando la

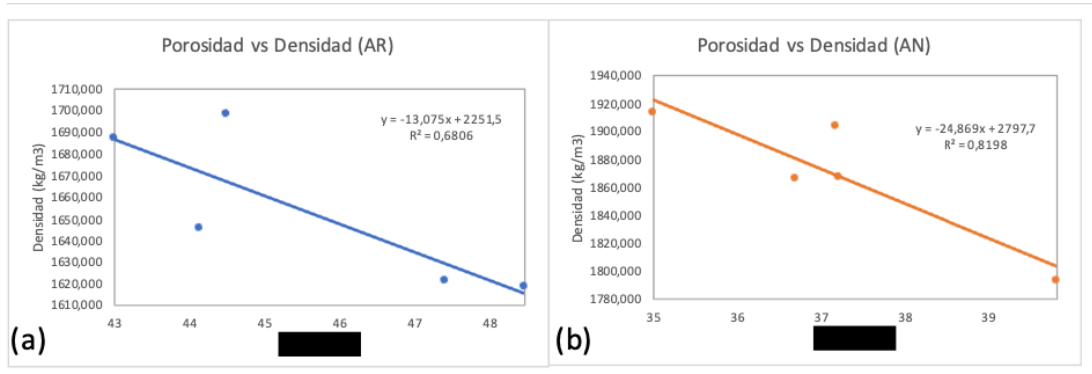
Ecuación 11-3: Ecuación de porosidad.[40]

$$porosidad\ (\%) = 100 \left(\frac{T - D}{T} \right)$$

La porosidad de las mezclas entre 35% y 49%, es mayor que el reportado en la literatura debido a las bajas densidades obtenidas por la ausencia de agregados finos, el uso de sólo un tamaño de agregado, y los bajos valores de la resistencia. Con relaciones a/c similares a las utilizada en este experimento, Sol-minihac et al. (2007) obtuvieron vacíos totales de concreto permeable con árido natural entre el 24% y el 29%, debido a que utilizaron un diseño de mezcla diferente, y a que los áridos utilizados eran de diferentes tamaños, dando una mezcla mejor graduada favoreciendo el llenado de los huecos. Mientras que Wang et al. (2006) tienen resultados entre 25-34%, obteniendo valores menores a los mostrados en la Figura 11-5, aun cuando sus parámetros de diseño de mezcla son comparables.

En cuanto a la correlación mostrada en la gráfica 11-5, se mantiene la tendencia lineal observada en la correlación que se realizó con la información encontrada en la literatura, es decir la disminución de la densidad a medida que aumenta la porosidad. Teniendo.

Figura 11-5 : Porosidad vs permeabilidad; (a) fabricado con agregado natural (AN), (b) fabricado con agregado reciclado (AR)



Ćosić et al. (2015) reportaron densidades de hormigones permeables con agregado natural que varían entre 2075 y 2443 kg/m³. Este concreto presenta mayor densidad debido a que se utilizó un agregado grueso natural, así como los siguientes agregados finos: arena, dolomita y escoria de acero en diferentes proporciones. Güneyisi et al (2016) encontraron densidades del concreto permeable con AR que varían entre 1781 y 1976 kg/m³. Esto se debe a que el material reciclado tiene mayores gravedades específicas que las utilizadas en este estudio. Sriravindrarah, Wang y Ervin (2012) encontraron resultados similares porque utilizaron agregados reciclados con el mismo tamaño que los utilizados en este estudio.

En la gráfica 11-5a y 11-5b se presentan los valores de porosidad vs Densidad de las diferentes mezclas de concreto permeable para un mismo tamaño de partícula y una misma relación agua/cemento (a/c). En general, estas figuras muestran tendencias de densidad y porosidades similares para todas las mezclas de concreto permeable. De acuerdo con los resultados obtenidos, las mezclas fabricadas con agregado natural (AN) con tamaño máximo de partícula 12,5 y a/c = 0,35 muestran un mejor rendimiento levemente, comparado con las muestras fabricadas con agregado reciclado (AR) es decir una menor porosidad y por ende una mayor densidad.

Por otro lado, se pudo observar que cuando la relación a/c aumento a 0,35, en comparación a la literatura, la porosidad disminuía en general. Esto se debe a que una mayor relación a/c hace que el mortero sea más fluido para rellenar los huecos entre las partículas de áridos gruesos, tanto en el concreto permeable fabricado con agregado natural (AN), como con el fabricado con agregado reciclado (AR).

11.4 Resultados Permeabilidad Vs. Resistencia a la compresión simple.

La permeabilidad (K) es la variable más importante en del concreto permeable, dado que esta propiedad la que se busca establecer en un adecuado diseño de mezclas. De acuerdo a la literatura estudiada en diferentes investigaciones y trabajos, los valores teóricos de la permeabilidad están entre 0,20 cm/s y 0,54 cm/s. [41]

Las pruebas de permeabilidad en las 10 mezclas se hicieron utilizando un modelo de permeámetro de carga constante el cual se describió en el capítulo 6, y se ilustra en la Figura 12-6.

La permeabilidad se evaluó con un dispositivo de permeabilidad (ver figuras 11-6). El objetivo de este dispositivo es medir el flujo de cierto volumen de agua a través de una muestra de ensayo de concreto permeable, dentro de un determinado límite de tiempo. La fórmula se basa en la ley propuesta por Darcy, cuya ecuación 5-3, enunciada en el capítulo 5.

El permeámetro construido para esta investigación consta de un tubo de acetato de 585 mm de largo con un diámetro interno de 56 mm, y un diámetro de 101,6 mm donde se ubica el espécimen que fue sometido a prueba; una válvula de 12,7 mm de diámetro conectada bajo el espacio del espécimen lleva a una tubería vertical a través de la cual el agua puede drenarse fuera. La parte superior de este tubo está colocado 10 mm por encima de la parte superior de la muestra de modo que no se produce flujo no saturado durante la prueba.

Figura 11-6 : Permeámetro de cabeza constante (elaboración propia)



En la Tabla 11-1, se observa que el coeficiente de permeabilidad calculado para los dos tipos de mezcla desarrolladas en esta investigación, están en el rango de valores obtenidos en investigaciones similares de acuerdo con la literatura consultada, sin embargo, es necesario aclarar que los valores con los que se comparan este coeficiente dependen de otras variables tales como la relación agua/cemento, el porcentaje de vacíos, la dosificación de materiales o la resistencia de diseño. Por tal motivo, se puede observar una alta variabilidad entre las investigaciones de referencia.

Para la resistencia a la compresión, las muestras se taparon en ambos extremos con un compuesto de tapado de azufre para nivelar la superficie de carga antes de la prueba. La resistencia del concreto permeable es uno de los parámetros más importantes del mismo. El uso de áridos reciclados debería proporcionar al concreto permeable una resistencia suficiente. La incorporación de agregados reciclados dio lugar a la mejora de la resistencia del concreto permeable. El uso de áridos reciclados debería proporcionar al concreto permeable una resistencia suficiente.[40]

Otros factores que influyen en la permeabilidad son la densidad y el contenido en huecos. Mientras que una mayor densidad implica una menor permeabilidad, un mayor contenido en huecos implica una mayor permeabilidad. En consecuencia, las propiedades mecánicas se ven afectadas.

Se puede observar que la permeabilidad característica del concreto permeable fue superior al rango reportado por el ACI (ACI Comité 522, 2010), y se obtuvieron valores superiores a los consultados en la literatura, por lo que podría considerarse como un concreto macroporoso (Barnhouse & Srubar, 2016). La mezcla de concreto permeable con AN y AR tuvieron un mayor coeficiente de permeabilidad, que el reportado en la literatura, que los valores en la literatura son de 0,76 a 1,93 mm/s, mientras que los valores obtenidos fueron entre 1,531 y 2,948 mm/s.

Tabla 11-1: Tabla de valores de las Propiedades obtenidas de los diseños de Mezcla.
(elaboración propia)

Muestra	Densidad (kg/m ³)	Porosidad (%)	Permeabilidad (k) (mm/s)	Resistencia a la Compresión (MPa)
AR1	1618,532	48,682	17,506	5,670
AR2	1686,627	43,211	15,131	6,720
AR3	1697,855	44,708	14,581	6,840
AR4	1620,826	47,614	17,272	6,310
AR5	1645,330	44,341	16,549	5,930
AN1	1866,736	37,409	17,609	5,600
AN2	1792,149	40,022	22,659	6,360
AN3	1912,990	35,207	29,485	3,310
AN4	1865,556	36,891	18,376	5,780
AN5	1903,000	37,380	20,621	4,970

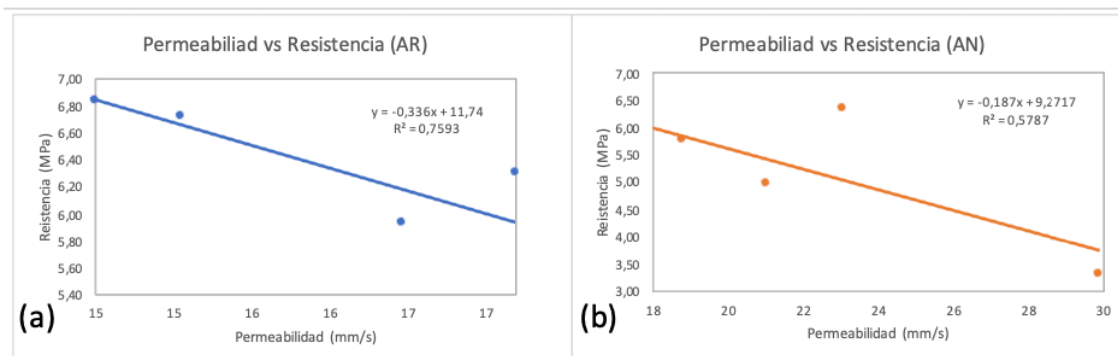
Barnhouse y Srubar (2016) obtuvieron la permeabilidad de un concreto permeable con árido reciclado entre 0,55 y 0,80 cm/s. Sin embargo, la resistencia a la compresión media es de 3,5 MPa, lo que confirma la relación lineal entre permeabilidad y resistencia a la compresión observada en este estudio. Por otra parte, Aamer Rafique Bhutta et al. (2013) obtuvieron una permeabilidad entre 25 y 45 mm/s en un concreto con árido reciclado de concreto triturado. La permeabilidad también debería presentar una relación lineal con el contenido de vacíos. Un mayor contenido de vacíos significaría una mayor permeabilidad. [43]

En las Figuras 11-6a y 11-6b, se puede observar como para los dos tamaños de partícula utilizadas de 12,5 mm, la relación agua cemento mayor de 0,35, presenta una correlación de permeabilidad y la resistencia mecánica consistente con lo encontrado en la literatura, la cual, proporciona una correlación directa entre la resistencia mecánica a la compresión y la permeabilidad para los dos tamaños, con coeficientes de correlación R^2 de 0,7593 para las mezclas fabricadas con agregado natural (AN) y un R^2 igual 0,5787 para el agregado reciclado (AR).

A pesar de que los coeficientes de correlación son bajos se mantiene la tendencia que se encontró en las Figuras 11-3 y 11-4. En el caso del concreto permeable, existiría la posibilidad de que la disminución del volumen de pasta de cemento para aumentar la

porosidad y mejorar la permeabilidad al agua, pero simultáneamente disminuir la resistencia a la compresión. Por lo tanto, lograr tanto una alta permeabilidad al agua y una alta resistencia es una tarea difícil[8]. Para evaluar la resistencia y la permeabilidad simultáneas de las mezclas de concreto permeable ensayadas, se dibujaron las Figuras 11-6(a) y 11-6(b). En estas dos Figuras, cada curva trazada corresponde a una mezcla fabricada con diferente agregado grueso como se había mencionado anteriormente y todas dos tienen un comportamiento lineal similar y con valores de resistencia a la compresión entre 4,970 y 6,840 MPa, para permeabilidades entre 14,581 y 29,485.

Figura 11-7 : Permeabilidad vs resistencia a la compresión; (a) fabricado con agregado reciclado (AR), (b) fabricado con agregado natural (AN)



Por lo tanto, la relación a/c óptima es de 0.35 en la que se produce la mayor resistencia de la muestra. La baja resistencia del cilindro se da en la relación $a/c \leq 0.35$ y esto se debe a la excesiva sequedad de la mezcla de concreto permeable, que hace que el concreto permeable sea muy difícil de moldear y particularmente poroso. La disminución de la resistencia del cilindro cuando la relación a/c es $> 0,35$ es normal, ya que una relación a/c más alta, es decir, $a/c > 0,35$ generalmente produce una menor resistencia del concreto permeable.

El nivel de sustitución del 100% para áridos reciclados redujo la resistencia a la compresión a valores levemente superiores a los del concreto permeable con agregado natural como se puede observar en la tabla 11-1. El aumento de la resistencia a la compresión se debió a un aumento de la adherencia entre las superficies rugosas y porosas de los áridos reciclados y la pasta de cemento en comparación con el árido normal. Como se ha mencionado, la capa de pasta de cemento en el concreto permeable es bastante fina. Además, la interfaz entre la pasta de cemento y el árido es más débil que la resistencia del árido, por lo que el concreto permeable normalmente falla en la

interfaz o en la capa aglutinante entre el árido[38]. La mejora de la unión entre el árido y la pasta de cemento es, por tanto, importante para la mejora de la resistencia del concreto permeable.

Los aumentos de la resistencia a la compresión fueron levemente mayores en las muestras de concreto permeable que contenían AR que en los que contenían AN. Además de la buena unión entre el árido reciclado y la pasta de cemento, el aumento del contenido de pasta debido a la abrasión de la superficie y al aplastamiento de las partículas de AR durante el mezclado redujo el contenido de huecos del concreto. Esto hizo que el concreto fuera más denso y contribuyó al aumento de la resistencia a la compresión del concreto permeable.

12. Análisis de los Resultados obtenidos y sus usos.

En el presente capítulo se presenta unas recomendaciones a partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior y los valores establecidos por la literatura investigada y las normas vigentes de la fabricación y colocación del concreto permeable. También se habla del transporte, el proceso de colocación, consolidación, curado, y protección del concreto permeable.

De acuerdo con [43], los factores que determinan el espesor de diseño de los pavimentos permeables son: las propiedades hidráulicas, como la permeabilidad, el porcentaje de vacíos, y las propiedades mecánicas, como la resistencia y la rigidez. El concreto permeable utilizado en los sistemas de pavimentación debe ser diseñado para soportar la carga de tráfico prevista y contribuir positivamente a la estrategia de gestión de aguas pluviales específica del lugar. El diseñador selecciona las propiedades apropiadas del material, el espesor adecuado del pavimento y otras características necesarias para cumplir con los requisitos hidrológicos y las cargas de tráfico previstas simultáneamente.

Los resultados obtenidos muestran que la resistencia a la compresión del concreto permeable está en el rango de 3,310 – 6,840 MPa que podrían incrementarse hasta unos 21 MPa con el uso de aditivos, el diseño adecuado de la mezcla y otros factores, para llegar a lo establecido por la literatura. Los valores obtenidos en el trabajo no muestran

potencialidad para ser utilizado en estructuras de ingeniería civil, dado que son valores muy bajos para las resistencias que exigen las resistencias de las estructuras. Sin embargo, al ser un producto nuevo, la importancia de la resistencia para el diseño del concreto permeable sigue siendo objeto de investigación de acuerdo con el uso que se le vaya a dar.

Como se expuso en el marco teórico, sus principales aplicaciones se han limitado a las aceras, los carriles bicicletas, los aparcamientos, ya que, en estas aplicaciones, el concreto permeable suele estar sometido a cargas relativamente ligeras y de baja frecuencia, también se ha utilizado para algunas carreteras y andenes de bajo tráfico, no se utiliza ampliamente como material de pavimentación de calles de alto tráfico, ya que estas exigen una resistencia al impacto de hasta 90 MPa y una pérdida por abrasión inferior al del 2% en la prueba de abrasión de ruedas cargadas. En la prueba de abrasión de superficies el concreto permeable muestra su eficacia para ser utilizado en las superficies de los pavimentos. [44]. La resistencia máxima que se obtuvo fue de 4.35 MPa, por lo tanto, por resistencia no cumpliría con las exigencias de los usos para ninguna de las aplicaciones mencionadas anteriormente.

Una de las propiedades clave del concreto permeable es su permeabilidad, esta oscila normalmente entre 0,07cm/s y 1,22 cm/s dependiendo del porcentaje de vacíos de la muestra. [45]

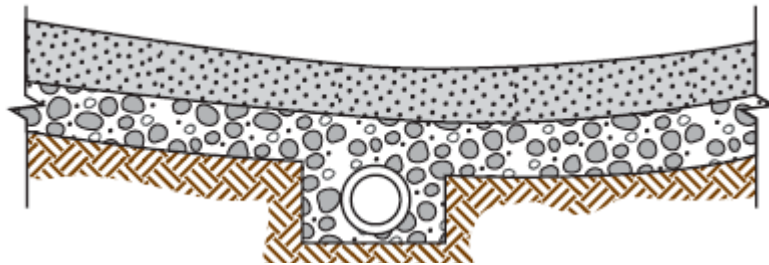
Las mezclas de concreto permeable dieron como resultado valores de la proporción de vacíos entre el 35,8% y el 47,2% y la permeabilidad osciló entre 1,513 cm/s y 2,984 cm/s. Los cuales fueron valores relativamente altos de acuerdo con la literatura investigada. Esta permeabilidad sería lo suficientemente buena para usos de sistemas de drenajes para aguas pluviales para estructuras planas de paso, drenajes para recolección de aguas pluviales, drenaje de infiltración en pavimento de concreto permeable, drenaje de recolección de agua pluvial en estructura de paso de concreto permeable en terreno inclinado, siempre y cuando estas superficies no vayan a ser sometidas a cargas medias o altas, puesto que si bien la permeabilidad es buena su resistencia a la compresión no es muy buena. Pues para este tipo de estructuras el criterio de aceptación no está basado en la resistencia a compresión, sino en la porosidad y permeabilidad, por lo tanto, tiene una perspectiva diferente.[46]

A continuación, algunos de los sistemas de drenajes empleados en la construcción de pavimentos y superficies planas de paso de concreto permeable.

12.1 Sistemas de drenajes para recolección de aguas pluviales

Estos cuentan con un sistema muy sencillo, una carpeta de rodadura o paso de concreto permeable, una base granular, un filtro sintético de tela que previene el paso del suelo fino que pueda obstruir los orificios de la base granular y el concreto permeable, y finalmente un conducto del agua infiltrada por la superficie.[47]

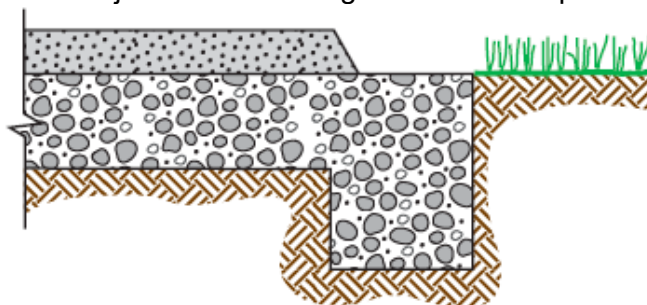
Figura 12-1 : Zanja rellena de roca bajo el pavimento. [43]



12.2 Sistemas de drenajes recolección de aguas pluviales en pavimentos de concreto permeable

Este es un diseño utilizado para estructuras de paso, como lo son los corredores y aceras peatonales, ya sea aceras de carreteras de carpetas de rodadura impermeables o independientes, dejando así el concreto permeable como un filtro primario para retener contaminantes sólidos que la escorrentía pudiera arrastrar. [47]

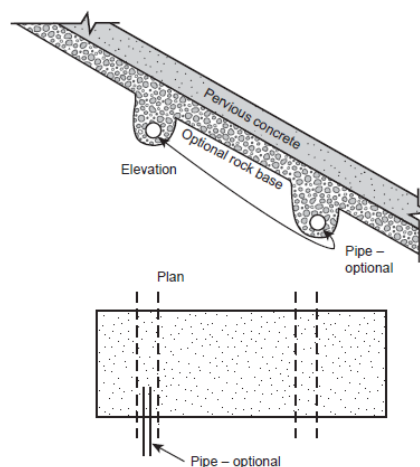
Figura 12-2 : Zanja de roca a lo largo del borde del pavimento. [43]



12.3 Sistemas de drenajes de recolección de agua pluvial en estructura de paso de concreto permeable en terreno inclinado

Este es un diseño utilizado como hombros de carreteras o contornos de parqueaderos para la recolección de todas las aguas pluviales que en su superficie descendán, y así ser transportadas hasta un tanque de almacenamiento donde puede darse un tratamiento para su reutilización en usos potables o usos que no requieran tratamientos posteriores, como lavados o riegos. Es importante resaltar que las tuberías utilizadas son perforadas para permitir la infiltración de las aguas recolectadas.[47].

Figura 12-3 : Elevación y vista en planta de la instalación inclinada [43]



12.4 Procesos de Colocación

Bajo los resultados obtenidos, el proceso de colocación del concreto permeable, es de suma importancia y cuidado dada las características especiales de diseño que presente la mezcla, su alto contenido de poros, su baja relación agua cemento, la alta permeabilidad y baja resistencia. Se debe tener una colocación por parte de los contratistas, como se describe a continuación:

De acuerdo con, [43], la preparación de la subrasante y la subbase son componentes críticos del desempeño del pavimento de concreto permeable, refiérase a "Consideraciones de diseño hidrológico" y "Consideraciones de diseño estructural" en otra parte de este documento para más información. La compactación hasta una densidad mínima del 90% al 95% de la densidad teórica según la AASHTO T 180 se

recomienda a menudo para un soporte consistente de la subrasante; sin embargo, el aumento de la densidad de la subrasante disminuye su permeabilidad.

Así mismo afirma el autor [43] que dado que los pavimentos permeables contienen un mínimo de agua y una alta porosidad, se debe tener cuidado para asegurar que el pavimento no se seque prematuramente. Un contenido limitado de pasta significa que el agua añadida tendrá un impacto más drástico que el experimentado en aplicaciones convencionales de concreto. En el nivel de humedad de los áridos tanto el agua absorbida por el árido, como el exceso de humedad suministrada pueden ser perjudiciales.

Transporte

Debido a que el concreto permeable tiene un bajo contenido de agua, se requiere una atención especial durante el transporte y la colocación. Su bajo contenido en agua puede hacer que la descarga de las hormigoneras sea más lenta que la del concreto convencional.

Figura 12-4 : Transporte y colocación de concreto permeable. [43]



Colocación y compactación

De acuerdo a [43] hay que tener en cuenta que las mezclas de concreto permeable no pueden ser bombeadas, por lo que el acceso a la obra es una consideración importante en la planificación. Antes de la colocación, la preparación de la subbase y los encofrados deben ser revisados. La colocación debe ser continua, y el extendido y el

desprendimiento deben ser rápidos, (Figura 12-5.), donde se utiliza un encofrado convencional. Las reglas mecánicas (vibratorias) y manuales se utilizan habitualmente, aunque las reglas manuales pueden causar desgarros en la superficie si la mezcla es demasiado rígida. También pueden utilizarse otros dispositivos, como las reglas láser. En el caso de los pavimentos, se recomienda eliminar entre 15 y 20 mm por encima de la superficie, es decir por encima de los encofrados, esto con el fin de permitir la compactación. Los bordes cercanos a los encofrados se compactan con un pisón de acero de 300 mm por 300 mm (como los que se utilizan en el concreto estampado decorativo), y un flotador u otro dispositivo similar para evitar que los bordes se raspen.

Figura 12-5 : Colocación y consolidación. [43]



Juntas de Dilatación

La colocación de juntas de control debe realizarse si se quiere evitar el agrietamiento aleatorio del pavimento. El espacio entre las juntas suele ser mayor que el de los pavimentos de concreto convencionales porque los concretos permeables tienden a encogerse mucho menos.[43]

Figura 12-6 : Juntas de dilatación y acabado. [43]



Acabado

De acuerdo a [43], el acabado de los pavimentos de concreto permeable no es el mismo que el de los pavimentos de concreto convencionales. Las operaciones normales de nivelación y alisado tienden a cerrar la superficie superior de los huecos, lo que anula el propósito para la mayoría de las aplicaciones del concreto permeable. Es por eso por lo que hay que tener una adecuada supervisión en la colocación y acabado del concreto permeable. Para la mayoría de los pavimentos permeables, el paso de "acabado" es la compactación. Esto deja una superficie más áspera, pero puede mejorar la tracción.

Curado y Protección

La estructura abierta y la superficie relativamente rugosa del concreto permeable exponen más superficie de la pasta de cemento a la evaporación, lo que hace que el curado sea aún más esencial que en el concreto convencional.

Debido a que los pavimentos de concreto permeable no drenan, pueden tener una alta propensión al agrietamiento por contracción plástica. De hecho, el "curado" de las losas de concreto permeables comienza antes de la colocación del concreto, por lo que la subrasante debe ser humedecida para evitar que absorba la humedad del concreto. Tras la colocación, el procedimiento de curado recomendado es la nebulización seguida de la colocación de láminas de plástico, que deben permanecer en su lugar durante al menos siete días. No se recomienda utilizar arena o tierra para mantener la lámina de plástico en su sitio, ya que se podrían obstruir los huecos si se derrama al retirarla.[43]

Figura 12-7 : Curado y Protección. [43]



13. Conclusiones y Recomendaciones

13.1 Conclusiones

Este trabajo presenta una revisión de la literatura de las propiedades mecánicas la permeabilidad y la evaluación de los usos y colocación del concreto permeable fabricado con áridos gruesos reciclados procedentes de residuos de la construcción. Sobre la base de lo consultado en la literatura y los resultados experimentales, se extraen las siguientes conclusiones:

- Luego de revisar la literatura se concluye que no hay un método estandarizado para concreto permeable, como si lo hay con más certeza para el concreto convencional. Aun cuando este concreto es trabajado a nivel mundial y en la actualidad desde ya varias décadas, especialmente en Estados Unidos, China y en algunos países de Europa, no existen métodos consolidados de dosificación para el tiempo que lleva siendo utilizado. Algunos de los métodos todavía están en estudio, ya que los resultados obtenidos al aplicar algunos de estos métodos son muy variables.
- La relación a/c y el volumen del cemento, como parámetros fundamentales de la mezcla, tienen efectos importantes sobre la porosidad, densidad, permeabilidad al agua no sumergida, permeabilidad al agua sumergida y la resistencia del cilindro.
- De ahí que se pueda afirmar que el concreto permeable es un material muy variable, que no ha sido posible estandarizarlo como el concreto convencional, dado que su desempeño varía mucho cuando se alteran sutilmente factores como: la relación agua cemento, el tipo y forma de agregados, la cantidad de cemento, la adición de aditivos, su compactación, y el contenido de vacíos. Estas propiedades son mucho más sensibles en el concreto permeable que en el concreto convencional, el cual está más estandarizado.
- Las relaciones permeabilidad-resistencia y porosidad-densidad siguen funciones lineales de acuerdo con las figuras de correlación de los de los valores obtenidos de los cilindros fabricados y ensayados. El intervalo de porosidad y el intervalo de densidad son de 43-48% y 1610-1710 kg/m³, respectivamente para concretos fabricados con agregado reciclado (AR) y el intervalo de porosidad y el intervalo de

densidad son de 35-40% y 1780-1940 kg/m³, respectivamente para concretos fabricados con agregado natural (AN) para la ovulación experimental.

- Las relaciones permeabilidad-resistencia y porosidad-densidad siguen funciones lineales de acuerdo con las figuras de correlación de los de los valores obtenidos de la literatura consultada, y clasificados por grupos de relación agua cemento de 0,26, 0,30, 0,35 y tamaño máximo nominal de 9,5 mm, 12,5 mm y 19,5 mm. Lo cual fue contrastado en la experimentación realizada.
- Las correlaciones de los coeficientes de densidad con la porosidad interconectada mediante un análisis de regresión arrojaron valores de R^2 medios, lo que demuestra que la porosidad interconectada es el factor clave que rige la densidad del concreto permeable.
- Se evidenció en la literatura que aun así se está investigando en el tema de la dosificación de concretos permeables, y el que más se acerca a una estandarización, puesto que ha dado valores de resistencia y permeabilidades mayores comparados con los otros métodos de diseño, sin necesidad de incorporar ningún tipo de aditivo, es el método interactivo de la ACI comité 522-10, cuya finalidad es alcanzar una mezcla con equilibrio entre vacíos, resistencia, cantidad de pasta y trabajabilidad. Otros pocos métodos desarrollados se fundamentan en éste, haciéndole modificaciones sutiles o significativas a sus variables, para mejorar los resultados.
- La correlación de la resistencia a compresión del cilindro con la porosidad y la relación a/c fija de 0,35, mediante un análisis de regresión arrojó un valor significativo de R^2 , lo que demuestra que la porosidad y la relación a/c son conjuntamente los factores clave que rigen la resistencia a la compresión del concreto permeable.
- La porosidad accesible al agua está directamente relacionada con la porosidad del agregado reciclado y la relación a/c utilizada, lo que conduce a una microestructura más porosa, que termina en el aumento de la permeabilidad y la disminución de otras propiedades como la resistencia la compresión.

- Una de las propiedades que se pudo destacar de acuerdo con los ensayos realizados, fue la permeabilidad, dado que se obtuvieron valores dentro de los rangos establecidos en investigaciones anteriores. Las características del concreto permeable obtenidas en las muestras de este trabajo tienen propiedades mecánicas y características físicas apropiadas para ser utilizadas en proyectos que no requieran muchas exigencias mecánicas, en cuanto altas cargas, como, por ejemplo: sistemas de drenajes para aguas pluviales para estructuras planas de paso, drenajes para recolección de aguas pluviales, drenaje de infiltración en pavimento de concreto permeable, y drenaje de recolección de agua pluvial en estructura de paso de concreto permeable en terreno inclinado, siempre y cuando estas superficies no vayan a ser sometidas a cargas medias o altas.
- En general, se reconoce que el reciclaje y la reutilización de los residuos de demolición no siempre cumplen con las propiedades mecánicas exigidas por el diseño, ya que, en algunos casos, pueden verse afectados por cuestiones externas como los controles normativos y la planificación. Sin embargo, si el sector de la construcción en su conjunto evaluara la necesidad de áridos y revisara las alternativas caso por caso, sería posible que los resultados pudieran dar beneficios, en sus propiedades mecánicas, así como económicos y medioambientales.
- La resistencia a la compresión del concreto permeable depende principalmente de la porosidad del concreto, la permeabilidad, el tamaño máximo nominal, ya que la forma y el tamaño de la muestra de ensayo mostraron una influencia importante en la resistencia del concreto permeable para una porosidad determinada, ya que los rangos de los valores obtenidos en la experimentación fueron mucho menores que los encontrados en la literatura, dado que en algunas de las investigaciones usaron la adición de puzolanas y otros aditivos para aumentar la resistencia.

La permeabilidad del concreto permeable está influenciada por la porosidad, y el uso de agregados de concreto reciclado no tuvo un efecto significativo en la permeabilidad del concreto permeable.

13.2 Recomendaciones

A partir de la información recopilada durante este trabajo de grado, se plasma el estudio de diferentes diseños de mezclas de concreto usando agregados reciclados, y para reforzar las conclusiones se hacen las siguientes recomendaciones:

1. El punto de partida es que la determinación del contenido en vacíos de los áridos reciclados proporciona un mejor conocimiento del esquema granular, potenciando las tomas de decisiones sobre su combinación con la pasta de cemento para la fabricación de concreto permeable.
2. Por otro lado, el método de diseño de mezclas seleccionado también debe tener en cuenta factores de entrada controlables (relación a/c, porosidad, contenido de árido reciclado y árido fino si se incorporan) que pueden requerirse según aplicaciones específicas de ser necesarios en función de las aplicaciones específicas del dicho concreto permeable fabricado con agregado reciclado.
3. Además, el volumen de pasta de cemento en un concreto permeable con agregado reciclado depende del contenido granular y de la porosidad deseada de la mezcla. De hecho, un metro cúbico de concreto permeable comprende los volúmenes de áridos reciclados, vacíos entre los áridos y pasta. Por tanto, considerando que el volumen de áridos se conoce a través del esquema granular, y que la porosidad es un dato de entrada, es posible determinar el volumen de pasta de cemento.
4. Mientras que otros métodos relacionados en este trabajo comprende porcentajes crecientes de pasta de cemento, el método de diseño de mezclas utilizado ACI522R reduce progresivamente el volumen de pasta de cemento a medida que aumenta la porosidad del concreto permeable.
5. El uso de áridos finos en la composición del concreto permeable con agregado reciclado requiere una adaptación debido a la diferente densidad aparente y cantidad de áridos finos y gruesos en la mezcla granular. En este caso, la determinación del aire considera el peso unitario medio de los áridos.

6. El procedimiento propuesto para diseñar mezclas de concreto permeable con agregado reciclado, tomado del método ACI522R ya descrito en este trabajo, y con algunas modificaciones comprende los siguientes pasos:
 - El primer paso correspondiente del método de diseño de mezclas de concreto permeable con agregado reciclado es determinar el contenido de vacíos de aire de los áridos. Puede obtenerse a través del peso unitario del agregado grueso en condición compactada (densidad aparente). Puesto que ambos agregados forman parte del esqueleto granular en presencia de agregado fino, Así, se determina un contenido medio de vacíos de aire del árido, considerando los correspondientes porcentajes de árido fino y grueso reciclado correspondientes. Luego en función del porcentaje de árido fino deseado, se determina la masa de árido fino incorporada en el peso unitario promedio del agregado en el ensayo en estado compactado. Por último, se determina el peso unitario medio de los áridos.
 - En segundo lugar, se aplicación del factor para determinar el porcentaje de árido Para mezclas de concreto permeable sin árido fino, el porcentaje de árido grueso reciclado. El factor de 0,92 es adecuado para áridos gruesos reciclados y sin áridos finos. En caso contrario, puede determinarse un factor adecuado de acuerdo con la tabla que indica la ACI522R.
 - En tercer lugar, se determina la gravedad específica de la pasta de cemento Independientemente del contenido de árido fino, la gravedad específica de la pasta.
 - En cuarto lugar, Determinamos el volumen teórico de la pasta de cemento.
 - En quinto lugar, Determinamos la masa de pasta de cemento.
 - Por último, Determinamos el consumo de cemento, agua y árido grueso por metro cúbico de concreto permeable.
7. La utilización de algunas metodologías para la producción de concreto permeable, a base de agregados reciclados, con relación de a/c desde 0,23 a 0,40, generan un buen comportamiento de la mezcla.

8. La relación A/C, y el uso de agregados reciclados parcialmente, influyen en el aumento del contenido de vacíos y coeficiente de permeabilidad del concreto, limitando su utilización en pavimentos de bajo tránsito, veredas y ciclovías.
9. Para la elaboración de concretos permeables con agregado reciclado grueso de 3/4", la relación agua/cemento de 0,30 permite el adecuado recubrimiento de la superficie de los agregados logrando así un balance entre la resistencia y permeabilidad del concreto.
10. El incremento de la granulometría del agregado aumenta la porosidad de la mezcla, pero genera disminución en la resistencia del concreto. Para revertir esta situación es recomendable:
 - Emplear el diseño de mezclas con 20% de agregado fino y 500 mL de aditivo Plastificante por bolsa de cemento cuando se requiere una resistencia mínima a compresión de 210 kg/cm².
 - Emplear el diseño mezcla con 15% de agregado fino y sin aditivo para el vaciado de ciclovías y pases peatonales donde se requiere una resistencia mínima a compresión de 175 kg/cm².
 - La densidad en estado endurecido es menor a la obtenida en estado fresco debido a la fisuración de la estructura interna del concreto permeable hecho con agregado reciclado cuando se da el proceso de hidratación; del mismo modo, el contenido de vacíos es mayor en estado endurecido.
11. El concreto permeable con 100% de árido reciclado tiene una baja resistencia a la compresión. Tanto la adición de arena como la sustitución del árido reciclado por árido natural pueden mejorar sustancialmente la resistencia a la compresión, ya que aumenta la densidad aparente, pero disminuyen la permeabilidad al agua. Las mezclas de concreto permeable óptimas con a/c = 0,30 y proporciones de áridos reciclados entre el 40% y el 80% cumplen los requisitos de resistencia >10 MPa y permeabilidad >0,01 cm/s.
12. Se recomienda que para conseguir una relación de vacíos del 20 % y una resistencia mayor a 15 MPa que el contenido de cemento sea de 375 kg/m³, la relación cemento-

agregado (1: 3,97), la relación agua/cemento (a/c) de 0,4 y el tamaño del árido grueso reciclado este entre (4,75 mm - 12 mm).

13. Finalmente, el concreto permeable con o sin adición de agregado reciclado puede incorporarse en proyectos a pequeña y gran escala y en combinación con otros materiales de pavimentación para obtener un rendimiento óptimo.

- **Vías privadas:** Las calles que están sujetas a un tráfico ligero, como las carreteras privadas y algunas carreteras locales de la ciudad, son candidatas para la pavimentación con concreto permeable, ya sea parcial o totalmente. Las carreteras permeables absorberían la escorrentía de las zonas pavimentadas al tiempo que filtrarían el agua percolada que pasará a formar parte del suministro de aguas subterráneas.
- **Aceras y paseos:** Las aceras y pasarelas que rara vez están expuestas a tráfico peatonal pesado son buenas candidatas para aplicaciones de concreto permeable. El concreto permeable tiene una superficie con una textura natural que puede evitar resbalones y caídas, a la vez que sirve como conducto de agua desde la superficie hasta el depósito de aguas subterráneas.
- **Parqueaderos:** En los centros comerciales donde el espacio es un bien escaso, el uso de concreto permeable puede permitir la recuperación de ciertas áreas que podrían ser utilizadas para el estacionamiento adicional. Estas zonas estarían etiquetadas como parqueadero de tráfico restringido. Pues así mismo grandes desarrollos comerciales han añadido parqueaderos perimetrales incorporando concreto permeable en lugares estratégicos de la zona de parqueadero.
- **Invernaderos y jardinería:** Los invernaderos y las zonas ajardinadas requieren más agua que cualquier otra sección de un desarrollo comercial. El uso de concreto permeable como material de pavimentación en los invernaderos permite que el agua de riego sea inmediatamente reabsorbida por el suelo, manteniendo el suelo relativamente seco.
- Cuando los diseños paisajísticos incluyen numerosos árboles y otras plantas de raíces profundas, un pavimento permeable proporciona ventilación y riegos naturales para las raíces, al tiempo que las protege de los daños

superficiales. Esto ayudaría a que los árboles y otras plantas prosperen incluso en zonas muy urbanizadas.

14. Los concretos permeables por si solos se les atribuyen diversos beneficios medioambientales, incluyendo la reducción de la escorrentía y la mejora de la infiltración de aguas pluviales, mejora de la resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento, mejora de la calidad de las aguas subterráneas, reducción del hidroplaneo, el efecto isla de calor y el ruido del tráfico. Estos beneficios pueden mejorar la gestión medioambiental y la seguridad del tráfico de los sistemas de transporte locales o de las comunidades.
15. Algunos organismos gubernamentales de muchos países están promoviendo estrategias de infraestructura verde como un enfoque prometedor para cumplir con las normativas y requisitos en materia de agua y reducción de agentes contaminantes, entre esos los residuos de construcción y demolición. En este contexto, los concreto permeables con agregado reciclado se consideran una herramienta prometedora para entrelazar la simulación de procesos naturales simultáneos en el entorno construido, ya que al diseñar estos concretos con material reciclado estaría contribuyendo de manera eficaz con la reducción de agentes contaminantes apuntando a un a economía circular sostenible.

14. Bibliografía.

- [1] A. K. Chandrappa and K. P. Biligiri, "Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 262–274, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054.
- [2] L. Gu and T. Ozbakkaloglu, "Use of recycled plastics in concrete: A critical review," *Waste Manag.*, vol. 51, pp. 19–42, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.005.
- [3] A. Toghroli *et al.*, "A review on pavement porous concrete using recycled waste materials," *Smart Struct. Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 433–440, 2018, doi: 10.12989/sss.2018.22.4.433.
- [4] H. El-Hassan, P. Kianmehr, and S. Zouaoui, "Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 164–175, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325.
- [5] S. P. Yap, P. Z. C. Chen, Y. Goh, H. A. Ibrahim, K. H. Mo, and C. W. Yuen, "Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates," *J. Clean. Prod.*, vol. 181, pp. 155–165, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.205.
- [6] L. N. De Materiales, "Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad," *Infraestruct. Vial*, vol. 13, no. 24, pp. 40–49, 2011.
- [7] V. A. Ulloa-Mayorga, M. A. Uribe-Garcés, D. P. Paz-Gómez, Y. A. Alvarado, B. Torres, and I. Gasch, "Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates," *Ing. e Investig.*, vol. 38, no. 2, pp. 34–41, 2018, doi: 10.15446/ing.investig.v38n2.67491.
- [8] J. X. Lu, X. Yan, P. He, and C. S. Poon, "Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate," *J. Clean. Prod.*, vol. 234, pp. 1102–1112, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.260.
- [9] T. Divya Bhavana, S. Koushik, K. Uday Mani Kumar, and R. Srinath, *Pervious concrete pavement*, vol. 8, no. 4. 2017.
- [10] American Concrete Institute, *Aci Manual of Concrete Practice Index—2015*, vol. 2015. 2015.
- [11] H. El-Hassan, P. Kianmehr, and S. Zouaoui, "Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 164–175, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325.
- [12] D. E. K. S. F. Braja m. DAS, *Principles of Geotechnical Engineering*, Eighth Edi. 200 First Stamford Place, Suite 400 Stamford, CT 06902 USA Cengage, 2014.
- [13] a. T. Gómez, "la economía circular como alternativa para el reciclaje de concreto (rcd) en una obra civil," 2020.
- [14] Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, "Decreto 0838 de 2005," 45862, no. 0838, p. 17, 2005, [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Normativa/Decretos/dec_0838_230305.pdf.
- [15] DANE, "Encuesta Anual Industrial - Boletín técnico (2018)," 2018, [Online]. Available: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/EAI/2018/bol_EAI_2018.pdf.
- [16] C. Páez Jiménez and C. Pacheco Bustos, *Guía para el manejo integral de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Barranquilla*. 2019.
- [17] C. Bedoya and L. Dzul, "Concrete with recycled aggregates as urban sustainability

- project,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 30, no. 2, pp. 99–108, 2015, doi: 10.4067/s0718-50732015000200002.
- [18] E. P. Soto *et al.*, “Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos Regional Del Área Metropolitana Del Valle De Aburrá,” *Acodal Secc. Noroccidente*, p. 95, 2016.
- [19] R. V. Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 327–339, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.102.
- [20] M. C. Limbachiya, “Performance of recycled aggregate concrete,” pp. 127–136, 2005, doi: 10.1617/2912143640.015.
- [21] EPA, “Advancing Sustainable Materials Management,” no. November, 2020.
- [22] Eurostat, “Record recycling rates and use of recycled materials in the EU,” *Newsrelease*, no. March, 2019, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/9629294/8-04032019-BP-EN.pdf/295c2302-4ed1-45b9-af86-96d1bbb7acb1>.
- [23] C. Galvez, “Visualización de las principales líneas de investigación en salud pública: un análisis basado en mapas bibliométricos aplicados a la Revista Española de Salud Pública (2006-2015),” *Rev. Esp. Salud Publica*, vol. 90, no. 1, pp. e1–e10, 2016.
- [24] M. Scholz and P. Grabowiecki, “Review of permeable pavement systems,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 11, pp. 3830–3836, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.016.
- [25] T. Liu, Z. Wang, D. Zou, A. Zhou, and J. Du, “Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 122, no. August 2018, pp. 72–82, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.05.004.
- [26] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty, and A. M. Fawzy, “Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 193, pp. 105–127, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182.
- [27] B. Berry, M. Suozzo, I. Anderson, and M. Dewoolkar, “Properties of Pervious Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregate,” *TRB Annu. Meet.*, no. 12, p. 3994, 2012.
- [28] E. B. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, “Obras Finalizadas,” *Dirección de Ordenamiento y Desarrollo Físico*, 2017. <https://medellin.unal.edu.co/direccion-de-ordenamiento-y-desarrollo-fisico/obras-finalizadas.html>.
- [29] . Rígidos, e. N. La, and c. D. E. Cajamarca, “evaluación de una losa de concreto permeable vaciada in situ, para su aplicación en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de cajamarca,” 2018.
- [30] H. S. Abdelgader and A. S. El-baden, “Bolomeya model for normal concrete mix design,” no. October 2014, 2012.
- [31] N. T. R. M. C. A. T. (NRMCA), “<http://www.perviouspavement.org/>,” *Pervious Pavement. Disponible*, 2021. .
- [32] D. H. Nguyen, N. Sebaibi, M. Boutouil, L. Leleyter, and F. Baraud, “A modified method for the design of pervious concrete mix,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 271–282, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088.
- [33] K. K. Yahia A, “New approach to proportion pervious concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 62, pp. 38–36, 2014.
- [34] R. P. Jimma BE, “Film-forming ability of flowable cement pastes and its application in mixture proportioning of pervious concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 273–282, 2014.
- [35] ARGOS, “Cemento Gris Uso General,” pp. 1–3, 2019, [Online]. Available:

www.360gradosenconcreto.com.

- [36] L. G. Li, J.-J. Feng, B.-F. Xiao, and S.-H. Chu, "Experimental Study on Porosity, Permeability and Strength of Pervious Concrete," pp. 1–26, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-442398/v1>.
- [37] S. P. Yap, P. Z. C. Chen, Y. Goh, H. A. Ibrahim, K. H. Mo, and C. W. Yuen, "Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates," *J. Clean. Prod.*, vol. 181, pp. 155–165, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.205.
- [38] H. L. Strieder, V. F. P. Dutra, Â. G. Graeff, W. P. Núñez, and F. R. M. Merten, "Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 315, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125384.
- [39] Y. Zaetang, V. Sata, A. Wongsas, and P. Chindaprasirt, "Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 15–21, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060.
- [40] R. Sriravindrarajah, N. D. H. Wang, and L. J. W. Ervin, "Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–246, 2012, doi: 10.1007/s40069-012-0024-x.
- [41] F. W. Játiva, "Desarrollo De Hormigones Permeables Enfocado Al Diseño De Mezclas, Construcción De Obras Y a La Protección Ambiental, Basado En Las Normas Aci, Astm E Inen," 2014.
- [42] F. Cartuxo, J. De Brito, L. Evangelista, J. R. Jiménez, and E. F. Ledesma, "Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates using superplasticizers," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 2, 2016, doi: 10.3390/ma9020098.
- [43] T. D. Paul, L. L. Michael, A. J. David, P. D. Tennis, M. L. Leming, and D. J. Akers, *Pervious Concrete Pavements*, vol. Portland C, no. January 2004. 2004.
- [44] G. M. S. Islam, "Prospects of Porous Concrete in Civil Engineering Applications," no. July, 2017.
- [45] K. Nadgouda, P. Ghadi, M. Gharat, R. Gurav, T. Margaje, and E. Shirke, "The Use Of Pervious Concrete In Rainwater Management," *J. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 21–24, 2014.
- [46] J. González, "Ante los retos del concreto permeable," *Imcyc*, p. 4, 2012.
- [47] j. Cabrera, "estudio y evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto polimérico permeable para su utilización en proyectos con fines ambientales," 2015.