

Metodología de diseño para concretos permeables y sus respectivas correlaciones de permeabilidad

Abstract

This project sought to propose a methodology for the design of pervious hydraulic concrete, based on a study of existing design methodologies in other latitudes, where several points were rescued, while others were identified to improve; With this it was possible to propose a design methodology with which, test mixtures were realized varying the relation water/cement and the applied energy of compaction, since these are elements that directly affect the most important characteristics of this concrete as they are the resistance and the associated permeability.

The permeable concrete mainly consists of the mixture of hydraulic cement, water and coarse aggregate; Although admixture or a small percentage of fine aggregate may also be included to improve certain properties thereof. Due to its lack or low percentage of fine aggregate, this technology of concrete obtains its particular characteristic of allowing the flow of liquids through it, being this in our area of interest, especially important for the management of runoff water.

It was verified that this methodology considered the granulometry of the aggregate, cement characteristics and percentage of voids expected, in addition to the tests that led to find correlations between resistance and permeability.

Keywords: Concrete, Pervious, Porous, Design Methodology.

Resumen

Este proyecto busca proponer una metodología de diseño de concreto hidráulico permeable, basada en un estudio de las metodologías de diseño existentes en otras latitudes, donde se rescataron varios puntos, al mismo tiempo que se buscaba mejorar otros; con esto se logró proponer una metodología de diseño con la cual se realizaron mezclas de prueba variando la relación agua/cemento y la energía de compactación, ya que estos son elementos que afectan directamente las características más importantes de este concreto como lo son la resistencia y la permeabilidad asociada.

El concreto permeable consiste fundamentalmente en la mezcla de cemento hidráulico, agua y agregado grueso; aunque se pueden también incluir aditivos o un pequeño porcentaje de agregado fino para mejorar ciertas características de este. Debido a su falta o bajo porcentaje de agregado fino, esta tipología de concreto obtiene su característica particular de permitir el paso de líquidos a través de él, siendo en esta área de interés, especialmente importante para el manejo de aguas de escorrentía.

Se verificó que dicha metodología tomara en cuenta la granulometría del agregado, características del cemento y porcentaje de vacíos esperado, además, realizar las pruebas que llevaron a encontrar correlaciones entre resistencia y permeabilidad.

Palabras clave: concreto, permeable, poroso, Metodología de diseño.

Metodología de diseño para concretos permeables y sus respectivas correlaciones de permeabilidad

JOSÉ MAURICIO PORRAS MORALES

Proyecto final de graduación para optar al grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Abril del 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo	3
Marco Teórico.....	4
Objetivos.....	10
Alcance y limitaciones	11
Antecedentes.....	12
Resultados.....	28
Análisis de los resultados	41
Conclusiones	48
Recomendaciones	50
Anexos.....	65
Referencias bibliográficas.....	66

Prefacio

La construcción se encuentra en constante evolución, y Costa Rica no puede quedarse atrás en temas de innovación y mejoramiento de métodos, sin dejar de lado el tema de sostenibilidad. Por esto, las empresas en el país deben empezar a dejar la zona de confort, cambiar lo que siempre han hecho y de paso también guiar a sus clientes hacia nuevas opciones más amigables con el ambiente.

Costa Rica se ha quedado atrás en la implementación y aprovechamiento de las tecnologías en materia de concretos permeables, ya sea por falta de información técnica en la aplicación, métodos de diseño, realización de mezclas, métodos de construcción, tipos de pruebas o inclusive por el desconocimiento de dicha tecnología de concreto que tantos beneficios puede brindar.

Actualmente, el tema de la protección y conservación del ambiente se ha convertido en eje transversal del desarrollo de los países, debido a los efectos negativos que se han observado y los estudios realizados, permiten darse cuenta del nivel al que el planeta se ha estado deteriorando por la falta de atención al daño tan elevado y acelerado que se ha provocado en él. Dentro y fuera de sus fronteras, a Costa Rica se le conoce como un *país verde*, en los años 60 y 70 se tomó consciencia de la necesidad de la protección y conservación del ecosistema y la biodiversidad, y hoy un 26 % del territorio costarricense tiene protección estatal. Es uno de los porcentajes más elevados del mundo de áreas protegidas, y para esto existe una legislación importante, sin embargo, esto no garantiza la sostenibilidad en el país.

Se vuelve importante el tema de las fuertes lluvias, ya que el país se ha visto afectado recientemente por inundaciones en varios sectores del Gran Área Metropolitana, de gran importancia por el volumen de personas que los transitan, además, se vieron afectados los comercios, centros de estudio, los sistemas de emergencias colapsaron, entre otros problemas;

todo esto ante la incapacidad de los sistemas de recolección y disposición de las aguas de escorrentía superficial urbana para disminuir los caudales en tormentas típicas y atípicas, dada la dinámica climática del país, y los cambios climáticos asociados a esta.

Un proyecto conjunto del Yale Center for Environmental Law & Policy y Center for International Earth Science Information Network de la Universidad de Columbia, llegó a crear el Índice de Desempeño Ambiental (EPI), en el cual en 2014 Costa Rica obtuvo el lugar número 54 luego de varios años de estar en la posición tres o cinco a nivel mundial. El factor que más afectó el desempeño de Costa Rica fue el de recursos hídricos.

Desde hace varios años se ha venido utilizando el concreto permeable como una alternativa ecológica ante las utilizadas más comúnmente en pavimentos, accesos, aceras, etc. Debido a su propiedad tan particular como lo es su alta capacidad de permeabilidad que brinda para el manejo principalmente del agua de lluvia, cualidad reconocida positivamente por organismos internacionales como la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés).

Esta tecnología de concreto viene a ser una solución a uno de los problemas que enfrentan las urbes hoy en día, como lo es la impermeabilización del suelo, efecto que evita la recarga de los mantos acuíferos, además que el agua en superficies impermeables no solo se desperdicia, sino que llega a acumularse y puede llegar a ser muy destructiva como ya se ha visto de primera mano en Costa Rica.

Alrededor del mundo se ha estado utilizando el concreto permeable principalmente como pavimento en aplicaciones viales de bajo tráfico, áreas de estacionamientos, senderos y caminos para peatones o ciclistas, ya que además al eliminar el agua de la superficie, se vuelve mucho más seguro transitar sobre él. El concreto permeable también ayuda a obtener puntos LEED

(acrónimo de Leadership in Energy & Environmental Design), el cual es un sistema de certificación de edificios sostenibles desarrollado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (US Green Building Council).

La Escuela de Ingeniería en Construcción desde su nacimiento ha facilitado la formación de ingenieros con una sólida formación académica, conscientes del papel que juega la ingeniería en el desarrollo de un país y comprometidos con la construcción sostenible, en la misma descripción de la carrera, se menciona que Costa Rica requiere de profesionales con especialidad en el campo de la construcción que tengan los conocimientos y dominen las herramientas tecnológicas necesarias para ejercer una eficaz dirección técnica y administrativa. Todo lo anterior con la idea de que los diferentes procesos que involucran el diseño y ejecución de proyectos de ingeniería civil se ejecuten en el país dentro de un marco de seguridad, economía, ética y de protección al ambiente. Así que la tecnología de concretos permeables llega a ser una alternativa que armoniza perfectamente con esta visión de ingenieros en construcción, buscando no solo soluciones funcionales, sino también buscando el menor impacto negativo al ambiente.

El procedimiento de diseño del concreto permeable toma en cuenta aspectos extra en relación con el concreto convencional, ya que este último se basa mayormente en la relación agua/cemento o la resistencia del concreto, en cambio en el concreto permeable, se vuelve importante el porcentaje de vacíos y el volumen de pasta, pues el porcentaje de vacíos determinará la velocidad de infiltración, en consecuencia la permeabilidad del elemento, mientras que el volumen de pasta asegura la adherencia entre las partículas del agregado.

La presente es una propuesta de trabajo clara y concisa para dar partida a una investigación que tiene como objetivo fundamental proponer una metodología de diseño adecuada a las condiciones específicas como país, al realizar la tropicalización de las normas existentes, tomándola como base para definir los procesos que se realizarán. Los resultados obtenidos en el laboratorio una vez validados, se procederá a reproducirlos en campo mediante la construcción de una loseta de prueba para definir el método constructivo y, fuera el caso, observar las diferencias que se pudieran dar y corregirlas.

Por esto, el objetivo del proyecto es desarrollar una metodología de diseño de concreto permeable que considere su resistencia a la compresión, tensión diametral y módulo de ruptura; sin dejar de lado su porcentaje de vacíos y la permeabilidad asociada; todo esto siendo aplicado al caso país de Costa Rica, en términos de materiales y condiciones de construcción.

Quiero agradecer primero a Dios por darme sabiduría necesaria y guiarme en todo este proceso. Gracias a mis padres Ileana Morales Chacón y Claudio Porras Sandí por su amor incondicional, por siempre creer en mí y por su apoyo en todos estos años de estudio. Un agradecimiento especial a la Escuela de Ingeniería en Construcción por la formación y por hacerme crecer, en especial al ingeniero Rommel Cuevas por darme la oportunidad de demostrar lo que podía hacer, por la confianza depositada en mí, su tiempo y dedicación cuando más lo necesité. Además, agradecer a las empresas Holcim y AMCO por la invaluable ayuda, en especial al ingeniero Francesco Rossi que siempre me extendió la mano para que el proyecto fuera una realidad.

Resumen ejecutivo

Este proyecto de investigación se llevó a cabo como parte integral del programa de estudios de Ingeniería en Construcción para optar al grado de Licenciatura en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

La finalidad de este proyecto fue la de proponer una metodología de diseño para concreto permeable que tomara en cuenta las características tanto del cemento, como de los agregados a utilizar, con un porcentaje de vacíos como dato de entrada de lo que se busca para el producto final, para esto fue necesario realizar un estudio de metodologías existentes y hacer mejoras a estas para que fueran aplicables a la realidad costarricense.

Se estudiaron metodologías de diseño para concreto permeable para utilizarlas como base de la propuesta de metodología a realizar, específicamente las metodologías recomendadas por la NRMCA (National Ready Mixed Concrete Association) y el ACI (American Concrete Institute), de estas se lograron rescatar varios puntos importantes, sin embargo, también se divisaron otros que necesitaban mejoras.

Todas las mezclas y pruebas fueron realizadas en los laboratorios de concreto del CIVCO, siempre cumpliendo con las normas ASTM para cada tarea, los materiales utilizados en todas las iteraciones fueron cemento industrial MP/A-28 fabricado y distribuido por HOLCIM y agregado de tajo de la zona de Guápiles con un tamaño máximo nominal de 12,5 mm y con una forma angular.

Por esto, para esta tipología de concreto, se debe dejar de pensar solamente en la resistencia de este, sino también tener en cuenta la permeabilidad como dato fundamental al hablar del concreto permeable, ya que ambas son las características principales que definen el material. Además, en el proyecto se logró demostrar que estas características son inversamente proporcionales, por lo cual se debe buscar un equilibrio entre estas dos a la hora de diseñar la mezcla.

Se realizaron dos diseños principales; para el diseño A se utilizó la metodología propuesta por el NRMCA y para el diseño B la propuesta realizada para efectos de este proyecto. En el diseño A, se utilizó un índice de compactación de cinco que recomienda la metodología, se buscaba un porcentaje de vacíos del 15,0 % a la hora de realizar el diseño; sin embargo, al realizar las pruebas se encontró que los datos oscilaban entre un 13,0 % y un 15,4 %, con densidades desde los 1975 kg/m³ hasta los 2031 kg/m³. Dado esto, para el diseño B se procedió a definir índices de compactación propios, probando varios índices con diferentes energías de compactación; dichos índices fueron los utilizados para el diseño B, donde se buscó un porcentaje de vacíos de 17, % y al realizar las pruebas se obtuvieron valores de entre 16,8 % y 17,2 %, con densidades desde los 1926 kg/m³ hasta los 1945 kg/m³; una mejora importante en la precisión a la hora de diseñar con respecto a la del método A.

Respecto a las resistencias a la compresión uniaxial, el diseño A obtuvo valores a 28 días desde 14,50 MPa hasta 19,45 MPa, mientras el diseño B estuvo en un rango de 12,99 MPa hasta 13,70 MPa; y en tensión diametral a 28 días en el diseño A se obtuvieron valores desde 1,39 MPa hasta 1,57 MPa, y para el diseño B entre 1,27 MPa y 1,36 MPa. En términos de permeabilidad, para el diseño A se obtuvieron valores de entre 91,86 mm/min hasta 103,09 mm/min, mientras que para el diseño B iban desde los 108,44 mm/min hasta los 114,87 mm/min.

Con el diseño B A/C2 C1, el cual en el momento se definió como óptimo para realizar más pruebas, se obtuvo un módulo de ruptura en vigas a 28 días de 2,69 MPa, además, se realizó la construcción de una loseta de prueba de 2x2 m según lo recomienda el ACI 522.1-13 para paños de prueba en campo, donde basado en la norma ASTM C1701 se llevó a cabo la prueba de infiltración, con lo cual se obtuvo una tasa de infiltración promedio de 2 440 188,46 mm/h.

Marco Teórico

Cemento hidráulico portland

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. (Portland Cement Association, 2004, p. 25)

American Concrete Institute (ACI)

El ACI fundado en 1904 y con sede en Farmington Hills, Michigan, Estados Unidos, es una autoridad y recurso líder a nivel mundial para el desarrollo y distribución de estándares consensuados, recursos técnicos, programas educativos y de capacitación, programas de certificación y experiencia comprobada para individuos y organizaciones involucradas en el diseño del concreto, la construcción y los materiales, que comparten el compromiso de perseguir el mejor uso de este. ACI tiene más de 95 capítulos, 110 capítulos de estudiantes, y cerca de 20.000 miembros que abarcan más de 120 países.

El comité 522 es el encargado de desarrollar e informar sobre temas de concreto permeable; dentro de sus catálogos son los responsables del documento de 40 páginas ACI 522R-10 publicado en el año 2010, el cual proporciona información técnica sobre la aplicación de concreto permeable, métodos de diseño, materiales, propiedades, proporción de la mezcla, métodos de construcción, pruebas e inspección.

National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)

La NRMCA fue fundada en 1930, su misión es proporcionar un valor excepcional para

sus miembros mediante la representación responsable y sirviendo a toda la industria del concreto mezclado a través del liderazgo, la promoción, la educación y la asociación para garantizar el concreto mezclado como el material de construcción de elección. Esta asociación se encuentra conformada por varios comités donde los miembros y el personal profesional trabajan en conjunto para cumplir con un objetivo, uno de los cuales toca el tema de los concretos permeables.

Concreto hidráulico permeable

Según el ACI 522R-10 típicamente describe un concreto con un asentamiento cercano o igual a cero, de estructura abierta que consiste de cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua. La combinación de estos ingredientes produce un material endurecido con poros interconectados, cuyo tamaño varía de 2 a 8 mm, lo que permite el paso de agua. El contenido de vacíos puede variar de un 15 a un 35 %, con resistencias a compresión típicas de 2,8 a 28 MPa. Su velocidad de drenaje depende del tamaño del agregado y de la densidad de la mezcla, pero generalmente se encuentra en el rango de 81 a 730 L/min/m² (American Concrete Institute, 2013).

La ausencia o disminución de material fino le proporciona a este concreto su característica de permeabilidad, sin embargo, al mismo tiempo se castigan las resistencias obtenidas, siendo estas menores que las de los concretos hidráulicos convencionales. Se hace la salvedad que, para efectos de este proyecto, en adelante se hablará del concreto hidráulico permeable solamente como concreto permeable.

Permeabilidad versus infiltración

Al hablarse de concretos permeables, se tiende a cometer el error de intercambiar los

términos *permeabilidad* e *infiltración* indistintamente; ya que la conductividad hidráulica (permeabilidad) es determinada en el laboratorio con un espécimen de volumen conocido donde la Ley de Darcy es aplicable. Montes y Haselbach han demostrado que se puede asumir un flujo laminar para concretos permeables normales (de hasta 32,0 % de porcentaje de vacíos) y que con la permeabilidad se puede utilizar la relación Carman-Kozeny (Montes & Haselbach, 2006). Como aún no existe una norma que indique cómo realizar esta prueba, muchos investigadores utilizan la recomendación presentada por el ACI 522R-10, método que inclusive se usa en competencias estudiantiles de concretos permeables.

Por otro lado, determinar la permeabilidad en el campo es logísticamente difícil; deben realizarse algunas modificaciones en el pavimento para buscar un espécimen de volumen conocido, y grandes cantidades de agua. Para aliviar estos problemas, se utiliza la prueba de infiltración como sustituto de la permeabilidad. La infiltración sólo informa la cantidad de agua que pasa por la superficie. El flujo es insaturado y se extiende lateralmente a través del pavimento, de manera que el volumen del pavimento húmedo, es mucho mayor que el volumen del pavimento directamente debajo del área de la prueba. Debido a este aumento de volumen, los valores de infiltración pueden ser mucho mayores que los de permeabilidad en el laboratorio. Posiblemente la mayor diferencia entre la permeabilidad y la infiltración es que la permeabilidad es un flujo saturado y la infiltración es un flujo no saturado (Kevern, 2015).

Forma del agregado

Las características superficiales y externas de los agregados son muy importantes desde el punto de vista de la influencia que podrían tener en la resistencia final del concreto y en la trabajabilidad de la mezcla. Una clasificación bastante amplia es la que se presenta en el siguiente cuadro:

- **Redondeada:** Completamente desgastada por el agua o totalmente formadas por fricción.

- **Irregular:** Irregulares por naturaleza, parcialmente formadas por fricción o con bordes redondeados
- **Escamosa:** Materiales cuyo espesor es pequeño en comparación con sus otras dos dimensiones.
- **Angular:** Con bordes bien definidos, formados en las intersecciones de caras aproximadamente planas.
- **Alargada:** Material que suele ser angular, pero cuya longitud es bastante mayor que las otras dos dimensiones
- **Escamosa y alargada:** Material cuya longitud es bastante mayor que el ancho y el ancho bastante mayor que el espesor.

Relaciones volumétricas del agregado

Las formulaciones que siguen a continuación, establecen el punto de partida teórico para el reconocimiento de las características físicas más importantes de los agregados. Cada partícula de agregado está constituida tanto por una parte sólida como por espacios vacíos llamados poros.

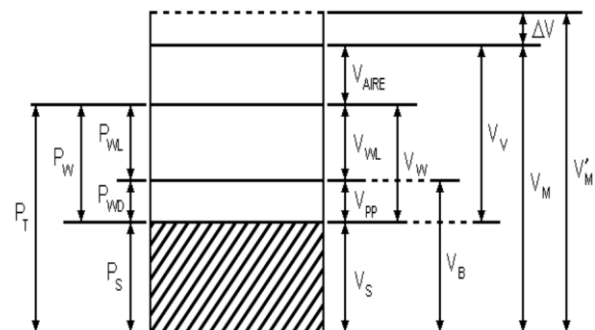


Figura 1. Diagrama de pesos y volúmenes de agregados.
Fuente: Presentación del curso de Concreto CO3403.

Volúmenes

- Volumen sólido (V_S): es el volumen que ocupa la masa sólida de material.

$$V_S = V_{masa}$$

- Volumen de poros permeables (VPP): corresponde al volumen que puede ocupar el agua dentro de las partículas. El volumen máximo de poros permeables equivale al volumen de agua que puede ser absorbida por el material hasta el punto de superficie saturada seca.

$$V_{PP} = V_{WD}$$

- Volumen bruto (VB): es el volumen que ocupa la masa sólida más el volumen de poros permeables.

$$V_B = V_S + V_{PP}$$

- Volumen de agua (VW): contempla la cantidad de agua que puede ser absorbida por las partículas como también el agua interparticular que pueda darse una vez que se pasó la condición de absorción máxima.

$$V_W = V_{PP} + V_{WL}$$

Donde $V_{PP} = V_{WD}$ y representan el volumen de agua absorbida y V_{WL} es el volumen de agua libre.

- Volumen de vacíos (V_V): está compuesto por todos aquellos espacios que pueden ser ocupados por agua o aire.

$$V_V = V_{PP} + V_{WL} + V_{aire}$$

Donde V_{aire} es el volumen de aire interparticular que existe aun cuando todos los espacios vacíos estén ocupados por agua y que se eliminan solo con algún tipo de proceso específico, como por ejemplo, una bomba de vacío o por medio de ebullición.

- Volumen masivo o total ($V_M = V_T$): es el volumen que se obtiene al sumar el volumen sólido del material y el volumen de vacíos. Se relaciona estrechamente con la granulometría de los agregados y también con el grado de compactación, distinguiéndose en el último caso entre el volumen masivo suelto y el volumen masivo envarillado. El volumen total es equivalente al volumen masivo en la piedra o al volumen masivo hinchado en la arena.

$$V_M = V_S + V_V$$

Pesos

- Peso seco (P_S): es el peso del material en estado seco.

$$P_S = P_{masa}$$

- Peso saturado superficie seca (PSS): se refiere al peso del sólido más el peso del agua contenida en los poros permeables del agregado.

$$P_{SS} = P_S + P_{WD}$$

Donde P_{WD} es el peso de agua absorbida.

- **Peso del agua (P_W):** como los poros permeables y los espacios interparticulares pueden ser ocupados por agua, se define el peso de agua como:

$$P_W = P_{WD} + P_{WL}$$

Donde P_W es el peso del agua y P_{WL} el del agua libre.

- **Peso total (P_T):** está constituido por el peso del sólido más el equivalente en peso del agua contenida en los poros permeables y los espacios interparticulares.

$$P_T = P_S + P_W$$

Relaciones complementarias del agregado

En un agregado pueden darse diferentes condiciones de humedad, que de una u otra manera fueron consideradas en las relaciones de peso y volumen antes definidas.

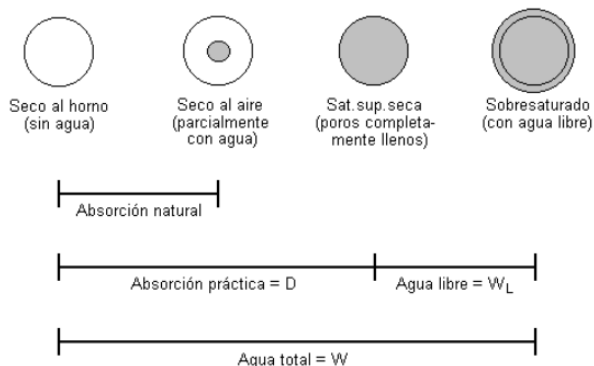


Figura 2. Posibles estados del agregado según el contenido de agua. Fuente: Presentación del curso de Concreto CO3403.

- **Seco al horno:** el agregado está completamente seco y no contiene humedad, por lo que su capacidad de absorción es total.
- **Seco al aire:** las partículas no están saturadas, poseen algún grado de humedad internamente, pero la superficie permanece seca. En este caso la capacidad de absorción es parcial y se denomina absorción efectiva.
- **Saturado superficie seca:** este es el estado neutro de la humedad de los agregados, ya que no puede absorber ni aportar agua a la mezcla. En este estado el agregado se encuentra en condición de absorción máxima (D_{max}).
- **Sobresaturado:** se da cuando el agregado está muy húmedo o mojado, y contiene un exceso de humedad o agua libre superficial que se sumará al agua de mezcla.

Cuando el agregado se combina con el cemento y el agua de mezcla, dependiendo de la saturación que presente, puede acarrear consigo cantidades variables de agua. Debido a la permanente variación de la humedad de los agregados causada por las condiciones ambientales, los pesos de los materiales en las batidas deben ajustarse a la condición de humedad de los agregados (Cuevas, 2015).

Gravedades específicas

La gravedad específica también conocida como densidad relativa, se define como la relación entre el peso unitario de una sustancia y el peso unitario del agua. Es una medida de la densidad del agregado y es de suma utilidad para clasificarlos, como también para el diseño de mezclas.

- Gravedad específica absoluta (G_a): relaciona el peso unitario de un agregado pulverizado y sin aire interparticular, con el peso unitario del agua destilada y sin aire, a temperatura normalizada.

$$G_a = \gamma_a / \gamma_w$$

- Gravedad específica aparente (G_S): es el peso unitario de un agregado seco entre el peso unitario del agua a temperatura normalizada.

$$G_S = \gamma_s / \gamma_w = P_s / (V_s \cdot \gamma_w)$$

- Gravedad específica bruta seca (G_{BS}): relaciona el peso en aire de un volumen de agregado que incluye los poros permeables, con respecto al peso en aire de un volumen igual de agua destilada, ambas condiciones tomadas a temperatura normalizada. Es un indicador de la conveniencia de uso de un agregado; por ejemplo, un G_{BS} bajo indica alta porosidad, alta absorción y debilidad del agregado. Es, además, de gran utilidad en el diseño de mezcla para el cálculo de cantidades.

$$G_{BS} = P_s / (V_B \cdot \gamma_w)$$

Se puede expresar en función de la gravedad específica aparente y la absorción:

$$G_{BS} = G_S$$

$$[1 - (D \cdot G_{BS})]$$

- Gravedad específica saturada superficie seca (G_{BSS}): es la relación del peso unitario saturado, superficie seca y el peso unitario del agua a temperatura normalizada. Considera los poros permeables y la cantidad de agua contenida en ellos.

$$G_{BSS} = P_{SS} / (V_B \cdot \gamma_w)$$

Se relaciona también con la gravedad específica bruta seca y la absorción:

$$G_{BSS} = G_{BS} \cdot (1 + D)$$

Resistencia del concreto

La resistencia mecánica del concreto endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulta más obvia en cuanto a las características para uso estructural se refiere. Por eso mismo es que siempre se debe indicar la magnitud de la resistencia especificada, así como las pruebas de laboratorio a realizar.

La resistencia del concreto puede ser medida a la compresión, a la tracción directa, flexo-tracción y tracción indirecta. Quizás el primero es el ensayo más común, sin embargo, en ocasiones, la prueba a flexo-tracción es la más adecuada debido a que refleja con mayor certeza la situación real de carga.

Por otra parte, si se revisa el *Reglamento de Concreto Estructural ACI 318S 05* se encuentra una definición muy clara de la resistencia a la compresión del concreto, la cual indica que es la resistencia especificada en el diseño, expresada en mega pascales (MPa) y evaluada a los 28 días por medio de ensayos con cilindros estándar de concreto hechos ya sea en sitio o en el laboratorio. El tipo de espécimen utilizado para la prueba de resistencia a la compresión es el cilindro de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Normalmente, la resistencia a la hora de la falla aumenta con la velocidad de carga de la prensa y con la edad del concreto.

Todas las pruebas realizadas en este proyecto se realizaron basadas en las normas publicadas por el American Society for Testing and Materials (ASTM), excepto en los casos donde se indica que no existía alguna en el lapso en que se llevó a cabo dicho proyecto.

ASTM C29

Este método de ensayo cubre la determinación de densidad (peso unitario) del agregado en un material en condición compactada o suelta, y vacíos calculados entre las partículas en agregado fino, grueso o mezclado basado en la misma determinación. Este método de ensayo es aplicable a los agregados que no excedan de 125 mm en el tamaño máximo nominal.

ASTM C31

Esta práctica abarca los procedimientos para hacer y curar ejemplares de cilindro y vigas de muestras representativas de concreto fresco para un proyecto de construcción.

ASTM C39

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de cilindros y núcleos perforados de concreto. Se limita al concreto que tiene una densidad superior a 800 kg/m³.

ASTM C78

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la flexión del hormigón mediante el uso de una viga simple con tres puntos de carga.

ASTM C496

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la tensión diametral de los especímenes de concreto y de núcleos perforados.

ASTM C670

La forma y estilo para las Normas ASTM requiere que todos los métodos de prueba

contengan declaraciones sobre precisión y sesgo. Además, la declaración de precisión se requiere para declaración de precisión de un solo operador (repetibilidad) y declaración sobre precisión multi-laboratorial (reproducibilidad). Esta práctica proporciona una guía para la preparación de precisión y sesgo, declaraciones que cumplan con estos requisitos. Discusión del propósito y el significado de las declaraciones de precisión y parcialidad para los usuarios de los métodos de prueba.

ASTM C1688

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad del concreto permeable en estado fresco bajo condiciones estandarizadas y da fórmulas para calcular el contenido de vacíos del concreto. Los resultados de las pruebas no pretenden representar la densidad y contenido de vacíos *in-situ*.

ASTM C1710

Este método de ensayo cubre la determinación en campo de la tasa de infiltración de agua del concreto permeable.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una propuesta metodológica de diseño de concretos hidráulicos permeables y sus respectivas correlaciones de permeabilidad.

Objetivos Específicos

1. Investigar las metodologías de diseño de concreto permeable existentes.
2. Proponer una metodología de diseño basada en las estudiadas previamente.
3. Verificar la efectividad de la metodología al realizar diseños de prueba.
4. Obtener gráficos de relaciones de características del concreto para encontrar un diseño óptimo.
5. Comprobar la metodología al llevarla al campo con la construcción de losetas de prueba.

Alcance y limitaciones

Esta investigación busca proponer una metodología de diseño para concretos permeable, obtener datos de resistencia y permeabilidad, buscar correlaciones entre estos datos y llevar lo obtenido en el laboratorio al campo.

Basado en el tiempo brindado para llevar a cabo este proyecto de investigación, se decidió realizar dos diseños de mezcla, y en estos variar las relaciones A/C, energía de compactación y porcentaje de vacíos, ya que estos son los puntos más importantes que afectan la mezcla del concreto permeable. La cantidad de especímenes de concreto construidos fueron realizados según lo indicaba la norma para cada prueba en específico, adicionalmente, se seleccionó un diseño óptimo para realizar pruebas más a fondo, esto debido a limitaciones de tiempo y materiales con los que se contaba para cada una de las iteraciones.

No se incursionó en temas de durabilidad y mantenimiento de pavimentos de concreto permeable, ni en el uso de aditivos en las mezclas realizadas, se prefirió encontrar un diseño óptimo del concreto en estado virgen, utilizando solamente los materiales básicos como lo son el cemento, el agregado grueso y agua; al obtener los datos de estas mezclas, cualquier tipo de aditivo que se utilice será para mejoramiento de las características de las mismas. Tampoco se profundizó en temas de costos de los materiales ni de construcción con esta tipología de concreto.

Antecedentes

A pesar de que en otros países se ha estado empleando desde hace ya bastante tiempo, Costa Rica se ha quedado atrás en la implementación y aprovechamiento de las tecnologías en materia de concretos permeables, ya sea por falta de información técnica en la aplicación, métodos de diseño, realización de mezclas, métodos de construcción, tipos de pruebas o inclusive por el desconocimiento total de dicha tecnología de concreto.

En el país no existe una normativa que se refiera al tema de concretos permeables, y las investigaciones han sido pocas. En el caso de los Estados Unidos, el comité 522 del ACI publicó en 2006 un informe que proporciona información técnica sobre la aplicación, métodos de diseño, materiales, propiedades, dosificación, métodos de construcción, pruebas e inspección de concreto permeable. El ACI 522R-13 es la versión de este documento que rige en el momento, y fue publicada en 2013, adicionalmente, existe un capítulo referente únicamente a pavimentos permeables, el ACI 522.1-13.

A pesar de que la normativa ACI sirve como un buen punto de partida en el tema, queda claro que no necesariamente se aplica del todo a la situación país, debido a factores como el clima y materiales distintos a los que se tienen en Estados Unidos.

El diseño de los pavimentos permeables requiere la consideración de ambos componentes estructurales e hidrológicos. El diseño estructural del pavimento es realizado para determinar el espesor de los diversos componentes del pavimento que son necesarios para apoyar el tráfico de diseño previsto, mientras que se protege la subrasante de una deformación permanente.

El diseño hidrológico determina los elementos clave de diseño necesarios para infiltrar el agua de lluvia y de escorrentía superficial en el pavimento o detener y filtrar el agua para lograr los objetivos de la gestión de las aguas pluviales. Un diseño óptimo de pavimento es uno que es lo

suficientemente fuerte como para acomodar el tráfico de diseño y que tiene las características hidrológicas mínimas para proporcionar la cantidad de agua y de gestión de la calidad (Hein & Schaus, 2013).

Debido a su bajo contenido de mortero y su poco (o nada) contenido de agregado fino, se produce una mezcla con muy bajo revenimiento, y con una consistencia más rígida que las mezclas de concreto convencionales. A pesar del alto contenido de vacíos, pavimentos de concreto permeable colocados adecuadamente pueden lograr resistencias a la compresión de 20,5 MPa, y resistencia a la tensión de más de 3,5 MPa. Esta fuerza es más que suficiente para la mayoría de aplicaciones de pavimentos de bajo volumen de tránsito, incluidas cargas altas por eje de vehículos como camiones de basura y de emergencia, tales como camiones de bomberos. Aplicaciones más exigentes requieren diseños especiales de mezcla, estructurales y técnicas de colocación (Tennis, Leming, & Akers, 2004).

Aunque el diseño de la mezcla es uno de los principales factores que contribuyen a las propiedades del concreto, las características de los agregados, las técnicas de energía de compactación y colocación son también factores importantes para determinar las propiedades y el rendimiento de material concreto permeable. Como se concluyó en un estudio de la Universidad Estatal de Iowa (Suleiman, Kevern, Schaefer, & Wang, 2006), la compactación afecta las propiedades del concreto directamente, reduciendo porcentaje de vacíos y permeabilidad, al mismo tiempo que se incrementa el peso unitario, y la resistencia a la compresión y a la tensión.

Para el diseño de pavimentos, es de suma importancia el buen diseño de la sub base que se vaya colocar, ya que esta puede llegar a limitar la permeabilidad del pavimento.

Según Tennis como regla general suelos con tasas de infiltración de 12 mm/h son

adecuados para este tipo de pavimentos. Las aplicaciones más comunes para el concreto permeable son los estacionamientos, aceras, carreteras de bajo volumen de tránsito, etc. El concreto permeable por lo general no se utiliza únicamente para pavimentos de concreto de alto tráfico y de cargas pesadas (Obla, 2007).

Reseña histórica

En un estudio realizado por Mulligan en 2005 menciona que el concreto permeable tuvo sus comienzos en Europa. En el siglo 19 el concreto permeable era utilizado en una variedad de aplicaciones tales como paredes de soporte de carga, paneles prefabricados, y pavimentos. En el Reino Unido en 1852, dos casas fueron construidas utilizando grava, cemento y agua.

No fue sino hasta 1923, cuando el concreto permeable resurgió como un material de construcción viable. Esta vez se limitó a la construcción de viviendas de dos pisos en zonas como Escocia, Liverpool, Londres y Manchester. El uso de concreto permeable en Europa aumentó de manera constante, sobre todo en la era posterior a la Segunda Guerra Mundial, debido a que el concreto permeable utiliza menos cemento que el concreto convencional, y el cemento era escaso en el momento, parecía que el concreto permeable era el mejor material para ese período. Una vez más la construcción de viviendas fue su uso principal. El concreto permeable continuó ganando popularidad y su uso se extendió a áreas tales como Venezuela, África Occidental, Australia, Rusia y el Medio Este.

Ya que Estados Unidos no sufrió el mismo tipo de carencias materiales que Europa después de la Segunda Guerra Mundial, el concreto permeable no tuvo una presencia significativa en dicha región sino hasta la década de 1970, su uso no inició por ser un sustituto más barato que los concretos convencionales, aunque eso era una ventaja, pero fue más bien por sus características de permeabilidad (Ghafoori & Dutta, 1995). El problema que surgió en los Estados Unidos tuvo que ver con el crecimiento poblacional y su consiguiente desarrollo de infraestructura que generó problemas por el exceso de escorrentía superficial.

La existencia de mayor cantidad de áreas impermeables incrementó los volúmenes de

escorrentía generando inundaciones, provocando así un impacto negativo en el ambiente, ya que se aumenta la erosión, y reduciendo la calidad del recurso hídrico. El concreto permeable comenzó a utilizarse en los estados de Florida, Utah y Nuevo México, pero se ha extendido rápidamente por todo los Estados Unidos para tales estados como California, Illinois, Oklahoma y Wisconsin.

A pesar de que tuvo un comienzo lento, el uso de concreto permeable como sustituto del concreto convencional se ha convertido en una herramienta multi-funcional en la industria de la construcción.

Propiedades del concreto permeable

Las diversas propiedades del concreto permeable dependen principalmente de su porosidad (porcentaje de vacíos), que a su vez depende del contenido de cemento, relación agua cemento, el nivel de compactación, y la gradación del agregado y su calidad. El tamaño de los poros en el material también afecta las propiedades de resistencia. Aunque el concreto permeable se ha utilizado para la pavimentación por más de 20 años en los Estados Unidos, sólo unas pocas investigaciones se han realizado para determinar su rendimiento (Ghafoori & Dutta, 1995).

Se vuelve de suma importancia la cantidad de agua en la mezcla, ya que es uno de los puntos críticos y más delicados a la hora de realizar las mezclas; se debe tener vigilada la mezcla y saber cuándo se necesita más agua o, por el contrario, cuándo se añadió mucha. Para saber esto se puede realizar una simple prueba donde se toma una pequeña cantidad de concreto y se forma en una pelota, esta debería prácticamente mantener su forma como se ejemplifica en las siguientes imágenes:



Figura 3. Ejemplos de concretos permeables con diferentes contenidos de agua, formados en una pelota: (a) muy poca agua, (b) cantidad de agua adecuada, (c) Mucha agua.
Fuente: Pervious Concrete Pavements (Paul D. Tennis).

Aplicaciones

Como se ha comentado esta tecnología no es nueva, sin embargo, recientemente ha ido

ganando un interés renovado debido en parte a las legislaciones sobre el recurso hídrico. Entre sus usos más habituales se encuentran estos:

- Pavimentos de bajo volumen de tránsito
- Caminos residenciales, callejones y entradas para vehículos
- Parquesos
- Ciclovías
- Pasos bajos de agua
- Canchas de tenis
- Sub base para pavimentos de concreto convencional
- Patios
- Arrecifes artificiales
- Estabilización de taludes
- Revestimiento
- Alcorques
- Bases/pisos para invernaderos, criaderos de peces, parques acuáticos y zoológicos
- Estructuras hidráulicas
- Cubiertas de piscinas
- Drenajes en bordes del pavimento
- Espigones y rompeolas
- Barreras de ruido
- Muros (inclusive estructurales)

(Tennis, Leming, & Akers, 2004)

Impacto ambiental

Actualmente, el tema de la protección y conservación del ambiente se ha convertido en eje transversal del desarrollo de los países, debido a los efectos negativos que se han observado y los estudios realizados, ha permitido darse cuenta del nivel al que el planeta se ha estado deteriorando por la falta de atención al daño tan elevado y acelerado que se ha provocado en él. Dentro y

fuera de sus fronteras, a Costa Rica se le conoce como un *país verde*, en los años 60 y 70 se tomó conciencia de la necesidad de la protección y conservación del ecosistema y la biodiversidad, y hoy un 26 % del territorio costarricense tiene protección estatal. Es uno de los porcentajes más elevados del mundo de áreas protegidas, y para esto existe una legislación importante, sin embargo, esto no garantiza la sostenibilidad en el país.

Cabe mencionar que Costa Rica es miembro de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático y como integrante activo, es responsable de presentar informes periódicos denominados Comunicaciones Nacionales, los cuales describen las acciones desarrolladas por el país en el tema del cambio climático (Instituto Meteorológico Nacional, 2017, Pagina Web).

Desde hace varios años se ha venido utilizando el concreto permeable como una alternativa ecológica ante las utilizadas más comúnmente como los pavimentos, accesos, aceras etc., debido a sus propiedades únicas como lo es la alta capacidad de permeabilidad que esta tecnología brinda para el manejo del agua de lluvia, cualidad reconocida positivamente por organismos internacionales como la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés).

Muchas plantas tienen dificultades para crecer en áreas cubiertas por los pavimentos impermeables, aceras y áreas verdes, ya que el aire y el agua tienen dificultades para llegar a las raíces. El concreto permeable permite a los árboles adyacentes recibir más aire y agua, permitiendo al mismo tiempo la plena utilización de la acera (Lee, Huang, Chang, & Pao, 2011). El concreto permeable ofrece una solución para los paisajistas y arquitectos que deseen utilizar vegetación en los estacionamientos y áreas urbanas pavimentadas (Tennis, Leming, & Akers, 2004), EPA le atribuye las siguientes ventajas al pavimento de concreto permeable (Yang & Jiang, 2003):

1. Tratamiento de agua mediante eliminación de contaminantes.
2. Menor necesidad de bordillos y alcantarillas.
3. Mejora de la seguridad vial debido a una mejor resistencia al deslizamiento.
4. Recarga de acuíferos locales.

Entre otras ventajas también se le agrega el uso de este concreto como superficies de riego, ya que el color más claro al igual que con los pavimentos de concreto convencional absorbe menos calor de la radiación solar que los pavimentos oscuros, y la estructura de poros relativamente abiertos de concreto permeable almacena menos calor, ayudando a reducir el efecto de isla de calor en las zonas urbanas. Adicionalmente, investigaciones han demostrado que los pavimentos permeables son un método eficaz para reducir la escorrentía de aguas pluviales y los contaminantes de las áreas urbanizadas, que además, pueden funcionar bien con un mantenimiento mínimo.

En un estudio ejecutado en Rezé, Francia donde se realizó una comparación de la carga contaminante de las aguas de escorrentía recolectada, ya sea en la salida de un pavimento permeable con una estructura de depósito o proveniente de una cuenca cercana drenada por un sistema convencional de alcantarillado separado para determinar el impacto en la calidad agua de escorrentía y del suelo, los datos recolectados incluyeron aproximadamente 40 eventos de lluvia durante un estudio de la calidad del agua de cuatro años en el sitio experimental (Legret & Colandini, 1999). Se determinó durante este estudio que la calidad del agua se mejoró significativamente por el paso a través del pavimento poroso con una reducción significativa en las cargas de contaminación.

Método de diseño

El procedimiento de diseño del concreto permeable difiere en varios aspectos en relación con el concreto convencional, ya que este se basa en la relación agua/cemento o la resistencia del concreto, en cambio en el concreto permeable lo más importante es el porcentaje de vacíos y el volumen de pasta, pues el porcentaje de vacíos determinará la velocidad de infiltración, en consecuencia la permeabilidad del elemento, mientras que el volumen de pasta asegura la adherencia entre las partículas del agregado.

En el año 2013 el comité 522 del ACI publica el informe 522R-10, el cual incluye una recomendación para el diseño de este tipo de concreto. A continuación, se resume dicho método:

1. Determinar el peso del agregado.
2. Ajustar peso a superficie saturada seca.
3. Determinar volumen de la pasta.
4. Determinar contenido de cemento.
5. Determinar volumen sólido.
6. Verificar contenido de vacíos.
7. Iterar mezcla de prueba:
 - a. Ensayo de propiedades requeridas.
 - b. Ajustar proporciones de la mezcla hasta obtener el rendimiento requerido.

Por otra parte, la NRMCA propone otra metodología de diseño con los siguientes pasos:

1. Determinar el peso unitario seco envarillado del agregado y calcular su porcentaje de vacíos, esto según la norma ASTM C-29.
2. Estimar un aproximado del porcentaje de pasta necesaria.
3. Calcular el volumen de pasta.
4. Seleccionar la relación agua cemento de la pasta.
5. Calcular el volumen absoluto de cemento.
6. Calcular el volumen de agua.
7. Calcular el volumen de agregado superficie saturada seca.
8. Convertir los volúmenes a pesos de los materiales por metro cúbico.

Para el diseño de pavimento permeable, como se mencionó antes, se analizan por separado dos factores, el hidrológico y el estructural, el mayor espesor de estos dos regirá el diseño. Según Tennis, en general la limitación en la permeabilidad del concreto no es un criterio crítico de diseño, lo que el diseñador debe

asegurar es que la permeabilidad sea suficiente para dar cabida a toda la lluvia que cae sobre la superficie del concreto, usualmente la tasa de flujo a través de la sub base puede ser más restrictiva y por ende, es un factor más práctico de control en el diseño.

Construcción

Al igual que con cualquier otra clase de pavimento, es de suma importancia preparar la estructura de soporte sobre la que se colocará el concreto permeable, se debe tener una sub base uniforme sin ningún tipo de irregularidades y bien compactada para poder iniciar la colocación.

Debido a que el concreto permeable contiene una mínima cantidad de agua y alta porosidad, se debe tener un cuidado especial durante su transporte y colocación, además, el proceso de curado se vuelve un tema delicado, ya que se debe mantener la humedad de la mejor forma posible, cubriendo el pavimento inmediatamente después que este haya sido colocado y no debe utilizarse hasta luego de siete días de su construcción.

Para evitar el agrietamiento al azar del concreto, se deben colocar juntas de control, el ACI 522R-10 recomienda que estas juntas tengan una profundidad de 1/3 a 1/4 del espesor del pavimento y que se realicen preferiblemente en el concreto fresco con equipo especial, sin embargo, también se pueden realizar juntas con sierra en el concreto endurecido.

El espaciamiento de las juntas usualmente es mayor que para concretos convencionales, ya que los concretos permeables tienden a encogerse mucho menos (Tennis, Leming, & Akers, 2004). Se han sugerido espacios entre juntas (Georgia Concrete and Products Association, 2004) de 6 m, aunque algunas instalaciones han tenido espaciamientos de hasta 13,5 m o más sin agrietamiento incontrolado (Paine, 1992).

Para la colocación de este concreto, se puede realizar una descarga directamente desde la mezcladora, se acomoda con un rastrillo y se compacta con un rodillo, el cual le da su acabado final.

Cuadro 1. Resultados obtenidos en otras investigaciones

Vacíos (%)	Peso unitario (kg/m ³)	Permeabilidad (mm/min)	Resistencia a la compresión a 28 días (kg/cm ²)	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)	Referencia
15 a 25	1600 a 2000	122 a 320	56 a 210	10 a 39	Tennis et al. 2004
15 a 35	NA	NA	NA	25 a 40	Olek & Weiss 2003
19	NA	NA	3771	45	Beeldens et al. 2003
20 a 30	1890 a 2080	NA	180 a 327	39 a 58	Beeldens 2001
11 a 15	NA	15 a 107	NA	42 a 76	Kajio et al. 2003
NA	NA	NA	194	NA	Tamai and Yoshida 2003
18 a 31	NA	NA	112 a 255	NA	Park & Tia 2004
NA	1167 a 2089	762 a 1062	34 a 182	NA	Roberto Fernández Arrieta 2008
19 a 30	1866 a 2034	96 a 162	131 a 276	29 a 56	Ming-Gin et al. 2011

Fuente: Elaboración propia, 2017

Metodología

Diseño de matriz experimental

Inicialmente, para efectos de este proyecto se realiza un diseño experimental de moldeo de cilindros en el cual se contemplan dos distintos porcentajes de vacíos, donde cada uno de estas se divide en tres relaciones agua cemento distintas y dos métodos de compactación que a su vez se subdividen en dos distintas energías por método; para dichas mezclas no se variaron los agregados ni el cemento. Para el diseño óptimo también se plantea el moldeo de vigas de concreto para obtener el módulo de ruptura y una loseta, esta última para llevar lo obtenido en el laboratorio, al campo; todo esto finalmente para realizar la construcción de un parqueo de pavimento permeable en la Escuela de Ingeniería Agrícola.

Cada diseño se identificó por metodología A o B, relación agua cemento y compactación utilizada de la forma $X A/C \times CX-X$. Para cada uno de estos diseños se moldearon tres cilindros de 15x30 cm por edad como lo recomienda el ACI 318-14 en su apartado 26.12.1.1 (a), esto tanto para las pruebas de compresión uniaxial como para la de tensión diametral, para un total de 18 cilindros más un cilindro de 101,6mm de diámetro por 116,4mm de altura para la prueba de permeabilidad. Además, se realizaron seis vigas de 15x15x60 cm para fallar dos por edad como lo recomienda la norma ASTM C31 y las losetas de 2x2x0,15 m, medidas recomendadas en el ACI 522R para paños de prueba en sitio.

Todos los diseños de mezcla realizados en el proyecto se tratan de concreto permeable *virgen*, en otras palabras, no se utilizó ningún tipo de aditivo. La matriz experimental de moldeo de cilindros se puede observar en el Apéndice 1.

Metodologías de diseño

Como base para proponer la metodología de diseño, se tomaron las metodologías recomendadas tanto por el ACI 522R-10 como por

la NRMCA, ambas fueron estudiadas a fondo y se observó que ninguna de las dos satisfacía por completo lo que se buscaba. Como se indicó antes, se utilizaron dos metodologías en el proyecto, etiquetadas como A y B; para la metodología A se utilizó el método de la NRMCA mientras que para el método B se hizo la propuesta de un método rescatando puntos tanto de la metodología A como de la recomendada por el ACI.

Para realizar la propuesta de metodología, específicamente se rescató la ecuación para el cálculo de los volúmenes e índices de compactación de la NRMCA, y el resto se mantiene como el ACI; esto sumado claro a que los índices de compactación fueron calculados, ya que ninguna de las dos metodologías era lo suficientemente específica en el tema de la compactación del material.

Cada mezcla se asocia con un código, siendo la primera letra el diseño (A o B) lo siguiente se refiere a la relación agua cemento, (A/C); de las cuales se utilizaron tres diferentes, siendo la uno 0,25 la dos 0,27 y la tres 0,3; y la última sección indica la energía de compactación utilizada; uno para 15 golpes por capa en tres capas y dos para 15 golpes por capa en cuatro capas.

Metodología de diseño propuesta

La metodología propuesta es la siguiente:

1. Determinar el peso unitario seco envarillado del agregado y calcular su porcentaje de vacíos, esto según la norma ASTM C-29.
2. Estimar un aproximado del porcentaje de pasta necesaria.
3. Proponer una relación A/C.

4. Determinar volumen de la pasta.
5. Determinar contenido de cemento.
6. Determinar el contenido de agua.
7. Determinar volumen sólido.
8. Verificar contenido de vacíos.

4. Agregar el agua y mezclar durante tres minutos.
5. Reposar la mezcla durante un minuto.
6. Mezclar durante dos minutos, agregar los aditivos en caso de utilizarse.

Materiales utilizados

En todos los diseños realizados se mantuvieron los mismos materiales constantes, se utilizó cemento industrial Holcim (MP/A-28) y agregados de tajo provenientes de la zona de Guápiles con un TMN de 12,5 mm. El cemento Holcim industrial es obtenido por la molienda conjunta y uniforme de Clinker tipo Portland y Puzolana, esta última en proporciones que van del 6 % al 20 % en peso del cemento

Mezcla y moldeo

Los cilindros y vigas se realizaron en el laboratorio de concreto del CIVCO, basándose en la norma ASTM C31 para moldeo y curado de estos elementos, los cuales 24 horas después de ser moldeados eran liberados y llevados a la cámara húmeda del laboratorio, la cual se mantiene a una temperatura de 20,5°C, presión de 862,8 hPa y una humedad de 110 %; mientras que para el caso de la loseta, la mezcla se realizó al costado del laboratorio y el concreto se trasladó a la zona de construcción mediante carretillos; se completó el volumen en dos tandas realizadas inmediatamente una después de la otra.

En todas las mezclas realizadas, el proceso fue el siguiente (Recomendado por la NRMCA):

1. Introducir la totalidad del agregado grueso en la mezcladora.
2. Añadir un máximo del 5 % del cemento y batir por un minuto.
3. Añadir el resto del cemento y mezclar unos segundos hasta que el agregado se encuentre bien cubierto.



Figura 4. Proceso de mezcla del concreto permeable.

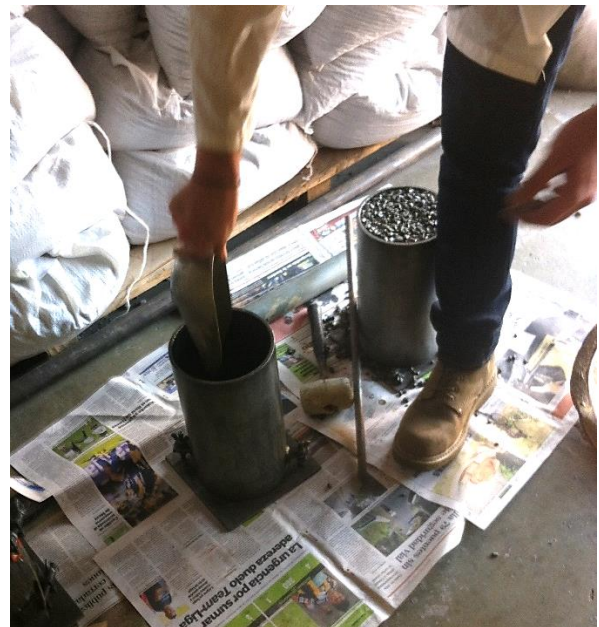


Figura 5. Proceso de moldeo de cilindros.

Compactación

Debido a las características especiales de esta tipología de concreto, se debe realizar un

proceso de compactación adecuado para obtener la densidad y resistencia mínimas esperadas; para el caso del moldeo de los cilindros y vigas en el laboratorio se utilizó un mazo de Proctor modificado (D1557-12) con un peso de 44,48 N a una altura de 457,2 mm. La energía aplicada se calcula con la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{n * N * P * H}{V}$$

Ecuación 1. Energía aplicada por el mazo Proctor.

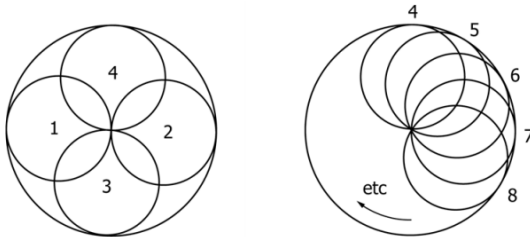


Figura 6. Proceso de compactación para cilindros de 101,6 mm.

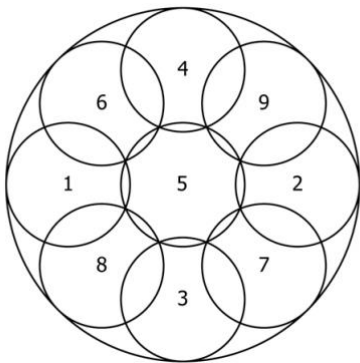


Figura 7. Proceso de compactación para cilindros de 152,4 mm.

Para las vigas, se realizaron dos capas en las cuales los golpes del mazo se distribuían en tres líneas a lo largo del molde lo más uniformemente que fuera posible, finalmente se enrasaba con la varilla a lo largo del molde.

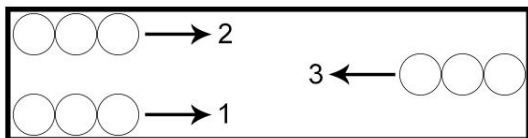


Figura 8. Proceso de compactación para las vigas de 0,15 x 0,15 x 0,6 m.



Figura 9. Compactación de primera capa de las vigas.

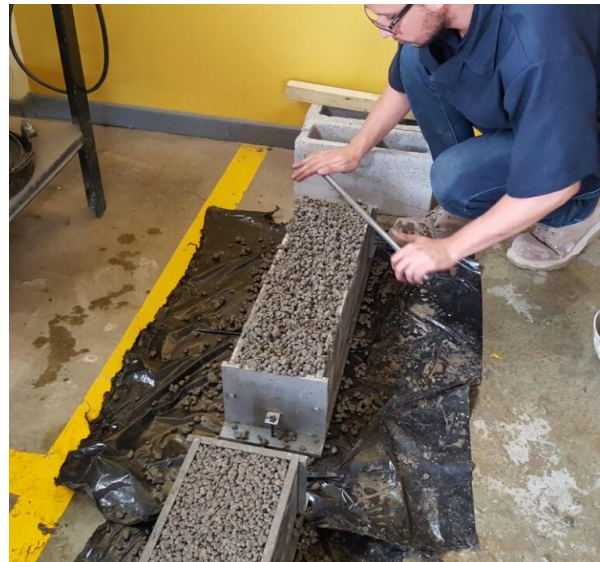


Figura 10. Proceso de envarillado de vigas.

En el caso de la loseta fue necesario utilizar equipo de compactación; específicamente se contó con una plancha compactadora Wacker Neuson WP1550A de 86 kg. La compactación se realizó de los extremos hacia adentro en una sola pasada, para una energía de aplicada de aproximadamente 171 kN-m/m³.

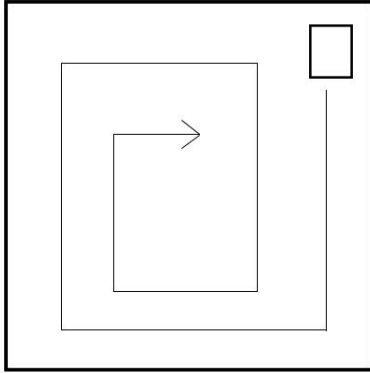


Figura 11. Proceso de compactación loseta.



Figura 12. Compactación con plancha de la loseta.

El valor de IC puede variar en función de la consolidación prevista que se utilizará en el campo. Para un mayor esfuerzo de consolidación un valor del índice de compactación del 1 al 2% puede ser más razonable. Para un nivel de consolidación más ligero se puede utilizar un valor del 7 al 8%. El NRMCA utilizó un valor del 5% para obtener valores similares entre el contenido de vacíos del concreto fresco permeable medido (ASTM C1688) y el contenido de huecos de diseño. El uso de un valor menor para IC (%) reducirá el volumen de la pasta.

Para efectos de la metodología de diseño propuesta se rescata este punto, se procedió a definir índices propios relacionando cada uno de estos con una energía de compactación aproximada. Esto se consiguió modificando la energía de compactación e índices de varios diseños y realizando la prueba ASTM C1688 para determinar el contenido de vacíos de cada uno de estos diseños de prueba.

Dosificaciones

En el Cuadro 2 se muestran los materiales por metro cúbico utilizados en cada mezcla, así como su índice de compactación y energía aplicada.

Índices de compactación

Como se mencionó antes, para la metodología de diseño recomendada por la NRMCA se utilizan lo que ellos llaman el índice de compactación, y que en su página web definen como:

Cuadro 2. Dosificaciones

Código de la mezcla	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado (kg)	Porcentaje de vacíos teórico (%)	Índice de compactación	Energía aplicada (kN-m/m ³)	Relación A/C
A A/C1 C1-1	96,97	387,88	1382,06	15,0	5	172,62	0,25
A A/C1 C1-2	96,97	387,88	1382,06	15,0	5	230,16	0,25
A A/C2 C1-1	101,29	375,16	1382,06	15,0	5	172,62	0,27
A A/C2 C1-2	101,29	375,16	1382,06	15,0	5	230,16	0,27
A A/C3 C1-1	107,27	357,58	1382,06	15,0	5	172,62	0,30
A A/C3 C1-2	107,27	357,58	1382,06	15,0	5	230,16	0,30
B A/C1 C1-1	92,73	370,93	1478,86	17,0	1	172,62	0,25
B A/C1 C1-2	88,5	353,99	1503,06	17,0	0	230,16	0,25
B A/C2 C1-1	96,87	358,77	1478,86	17,0	1	172,62	0,27
B A/C2 C1-2	92,44	342,38	1503,06	17,0	0	230,16	0,27
B A/C3 C1-1	102,59	341,96	1478,86	17,0	1	172,62	0,30
B A/C3 C1-2	97,9	326,34	1503,06	17,0	0	230,16	0,30

Pruebas realizadas

Antes de iniciar con el proceso de confección de los cilindros, se realizaron varias pruebas al agregado como lo fue la de porcentaje de vacíos según la norma ASTM C29 y las de gravedad específica y absorción según la ASTM C127.

Para cada mezcla se efectuaron pruebas al concreto fresco basándose en la norma ASTM C1688, para determinar la densidad y el porcentaje de vacíos con el equipo observado en la Figura 13.



Figura 13. Equipo utilizado para prueba ASTM C1688.

Para cada uno de los 18 cilindros realizados por diseño, se utilizaron nueve para realizar la prueba de compresión uniaxial basada en la norma ASTM C39 y otros nueve para la de tensión diametral basada en la ASTM C496 como

se puede ver en la Figura 14; dichas pruebas realizadas a 7, 14 y a 28 días utilizando tres cilindros por edad, por prueba.



Figura 14. Prueba de tensión diametral.

$$T = \frac{2 * P}{\pi * l * d}$$

Ecuación 2. Tensión diametral.

Para efecto de las vigas, se llevaron a cabo las pruebas de flexión a dos especímenes por edad a 7, 14 y 28 días según como se indica en la norma ASTM C78 (ver Figura 16). Dichas vigas se marcan como se indica en la Figura 15, dividiéndolas en tres partes según las medidas proporcionadas por la norma; ya que con las líneas de guía que dividen estos tercios se analiza la falla y se calcula el módulo de ruptura diferente para cada caso.

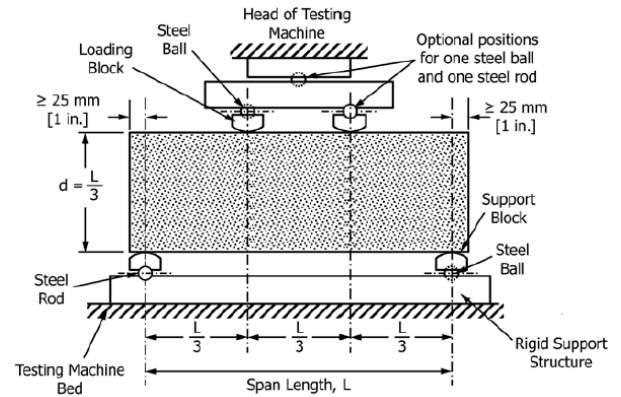


Figura 15. Diagrama de prueba ASTM C78

Según la norma, si la falla se encuentra dentro del tercio medio, el módulo se calcula según la Ecuación 3; por otro lado, si la falla se sale del tercio medio, pero no más de un 5 % del largo de este, el módulo se calcula según la Ecuación 4.

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Ecuación 3. Cálculo del módulo de ruptura para falla en tercio medio.

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Ecuación 4. Cálculo del módulo de ruptura para falla fuera tercio medio, dentro del 5 % del largo.



Figura 16. Prueba de flexión de viga según norma ASTM C78.

Permeabilidad

Para llevar a cabo las pruebas de permeabilidad, por tанда se realizó un 19no cilindro de 101,6mm de diámetro por 116,4mm de altura; se decidió utilizar un tamaño menor de cilindro porque es suficiente para el dato que se quiere obtener, realizar dichas pruebas en cilindros de 30 por 15 cm ya que probablemente sea proporcional por tener características de densidad y compactación similares; además, se ajusta a la recomendación del ACI. Antes de iniciar la prueba, los cilindros fueron envueltos en plástico para que encajaran de mejor manera en el permeámetro, además de evitar que durante la prueba el agua se moviera entre el tubo y el espécimen.



Figura 17. Cilindros preparados para pruebas de permeabilidad.

El parámetro se construyó tomando como base la recomendación dada en el ACI 522R-10, donde se habla de un permeámetro de carga variable utilizado en una investigación realizada por Neithalath et al. en 2006.

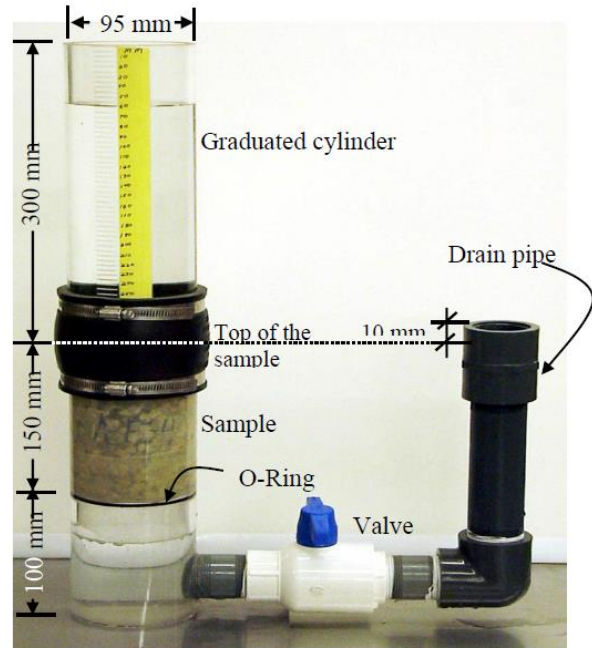


Figura 18. Permeámetro de carga variable recomendado por el ACI 522R-10.

El permeámetro construido para esta investigación consta de un tubo acrílico de 500 mm de largo con un diámetro interno de 56 mm, y un diámetro de 101,6 mm donde se ubica el espécimen que será 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 19. Permeámetro construido para la investigación.

Para el cálculo de la permeabilidad de los especímenes se utilizó la siguiente ecuación:

$$k = \frac{a}{t} \quad \text{donde} \quad a = 2,303 \left(\frac{A_E}{A_M} \right) (L) \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

Ecuación 5. Permeabilidad en permeámetro de carga variable.

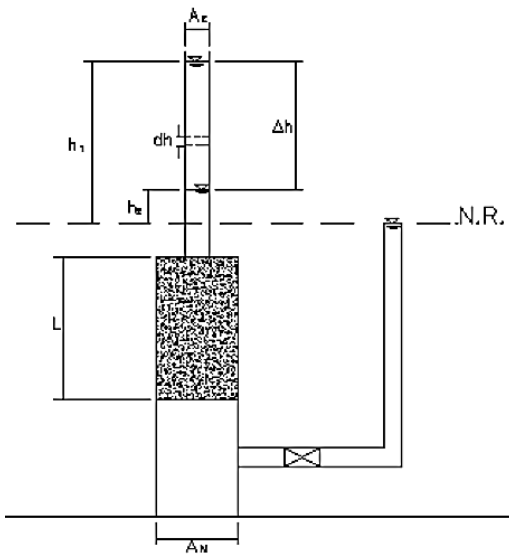


Figura 20. Diagrama permeámetro de carga variable.

Loseta

La construcción de la loseta se realizó con el diseño de mezcla B A/C1 C1, y con un área de 2 x 2 m, esto según la recomendación dada en el ACI 522.1-13 para paños de prueba en campo, y con un espesor de 10 cm.



Figura 21. Proceso de construcción de la loseta

Infiltración

La prueba de infiltración se realiza en la loseta como homóloga de la de permeabilidad en el laboratorio. Para llevar a cabo esta prueba se utilizó la norma ASTM C1701; donde se indica que para áreas de hasta 2 500 m² se debe realizar la prueba en tres lugares distintos. Se debe utilizar un aro como el que se ve en la Figura 22 con marcas a los 10 mm y 15 mm donde se mantendrá el nivel de agua durante la prueba. Finalmente, obtenidos los datos, se procede a realizar el cálculo de la infiltración con la Ecuación 6

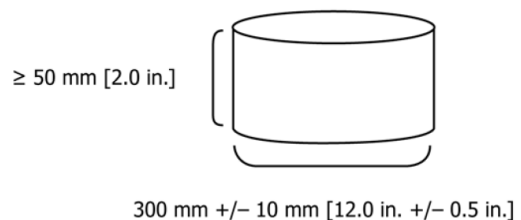


Figura 22. Dimensiones del aro de infiltración.



Figura 23. Aro de 70 mm de altura por 29,5 mm de diámetro utilizado en pruebas de infiltración.

$$I = \frac{K * M}{(D^2 * t)}$$

Ecuación 6. Tasa de infiltración.

Parqueo de pavimento permeable

En el transcurso de tiempo que se estaba realizando el proyecto, surgió la posibilidad de construir un área de parqueo con esta tipología de concreto; esto se dio gracias a una cooperación de la oficina de Administración de Mantenimiento del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) que se comunicó con la Escuela de Ingeniería Forestal, donde ya tenían planeado construir uno y el director de la carrera se mostró muy interesado en la idea.

Inicialmente, se realizó un levantamiento de la zona donde se pensaba construir el parqueo, esto se llevó a cabo con una estación total y un prisma facilitados por la Escuela de Ingeniería Agrícola; se tomaron en total 15 puntos en coordenadas X, Y y Z.



Figura 24. Levantamiento de área de parqueo a construirse al costado de la Escuela de Ingeniería Agrícola.

Una vez tomados los puntos, se procedió a realizar un esquema con ayuda de *software* CAD e inclusive luego un 3D en SketchUp para visualizar cómo quedaría este ya construido.

Para el diseño estructural, debido a que esto estaba fuera del alcance del proyecto, se eligió un espesor basado en la literatura y con ayuda de un *software* de diseño de losas; además, se diseñaron perfiles para el manejo del agua que pasará por esta losa, ya que se solicitó que el agua fuera reutilizada, llevándola a un tanque a un costado del área de parqueo.

Precisión y validación de datos

Al realizarse la mayoría de las pruebas según las normas ASTM, estas incluyen un apartado de precisión y tendencia de los datos obtenidos en cada una de ellas; esto junto a la ya mencionada ASTM C670 da los parámetros de aceptación de los resultados utilizando el Cuadro 3.

Cuadro 3. Rango máximo aceptable de resultados de prueba*.

Number of Test Results	Multiplier of Standard Deviation or Coefficient of Variation ^B
2	2.8
3	3.3
4	3.6
5	3.9
6	4.0
7	4.2
8	4.3
9	4.4
10	4.5

*Un resultado de prueba puede ser una determinación única o el promedio de dos o más determinaciones como se define en el método de ensayo.

Para el caso de los datos a compresión uniaxial, según la norma ASTM C39 da un coeficiente de variación de 2,4 %; ya que se realizaron tres pruebas, el multiplicador para este caso sería de 3,3 lo que daría un total de aceptación del 7,8% (esta norma en particular da este último dato de una vez).

Para las pruebas a tensión diametral, la norma, en su apartado de precisión, menciona que “El método de ensayo no tiene sesgo porque la

resistencia a la rotura por fraccionamiento sólo puede definirse en términos de esta prueba método” (American Society for Testing and Materials, 2011); sin embargo, de igual manera habla de un coeficiente de variación del 5 %, de nuevo para efectos de este proyecto se realizaron tres pruebas por edad con lo cual el multiplicador sería de nuevo de 3,3 lo que resulta en un valor de aceptación del 16,5 %.

Para el caso de las vigas, como ya se comentó se realizaron dos por edad como lo indica la norma; e indica que el coeficiente es de 5,7 % y según el Cuadro 3 el multiplicador sería de 2,8, con lo cual se obtiene un 15,95 % de aceptación para el coeficiente de variación.

Para las pruebas de infiltración en la norma se comenta algo muy similar a lo mencionado para las pruebas de tensión diametral, pero de igual manera hablan de que se

ha encontrado que el coeficiente de variación para esta prueba en un mismo lugar es del 4,7 %; como se realizaron tres pruebas el multiplicador sería de 3,3, lo cual da un resultado de 15,51 %.

Finalmente, para el caso de las pruebas de permeabilidad, como se ha mencionado no existe aún una norma que hable sobre esta práctica, simplemente para poder tener estos datos se utilizó la recomendación del ACI para tener una mejor idea del material y sus comportamientos.

Todos los datos de coeficiente de variación mencionados acá fueron corroborados para la aceptación de los resultados de las pruebas, y se adjuntan a los datos presentados más adelante.

Resultados

Cuadro 4. Características del agregado importantes obtenidas en el laboratorio para el diseño

Peso unitario	1547 kg/m ³
Gravedad específica SSS	2,42
Gravedad específica aparente	2,49
Absorción	2,03 %
Porcentaje de vacíos	37,89 %

Cuadro 5. Datos de cada mezcla en estado fresco

Código de mezcla	Porcentaje de vacíos	Peso unitario (kg/m ³)
A A/C1 C1	14,3 %	2001
A A/C1 C2	13,0 %	2031
A A/C2 C1	15,0 %	1975
A A/C2 C2	13,6 %	2008
A A/C3 C1	15,4 %	1954
A A/C3 C2	13,8 %	1990
B A/C1 C1	17,20 %	1926
B A/C1 C2	17,0 %	1926
B A/C2 C1	17,1 %	1939
B A/C2 C2	16,8 %	1945
B A/C3 C1	16,9 %	1933
B A/C3 C2	17,1 %	1942

Fallas de cilindros

Cuadro 6. Resistencia promedio a la compresión uniaxial y tensión diametral del diseño A A/C1

Compactación	Días	Compresión (MPa)	Tensión diametral (MPa)
C1	8*	12,53	1,19
	14	15,11	1,36
	28	18,16	1,51
C2	7	14,24	1,28
	14	16,88	1,40
	28	19,45	1,57

*Prueba no se pudo realizar a 7 días.

Cuadro 7. Resistencia promedio a la compresión uniaxial y tensión diametral del diseño A A/C2

Compactación	Días	Compresión (MPa)	Tensión diametral (MPa)
C1	7	10,68	1,10
	14	13,17	1,23
	28	14,50	1,41
C2	7	11,71	1,24
	14	14,02	1,32
	28	15,91	1,39

Cuadro 8. Resistencia promedio a la compresión uniaxial y tensión diametral del diseño A A/C3

Compactación	Días	Compresión (MPa)	Tensión diametral (MPa)
C1	7	11,64	1,18
	14	13,70	1,28
	28	16,02	1,43
C2	8*	12,16	1,17
	14	13,73	1,33
	28	16,99	1,47

*Prueba no se pudo realizar a 7 días.

Gráfico 1. Curvas de resistencia a la compresión uniaxial de cilindros del diseño A

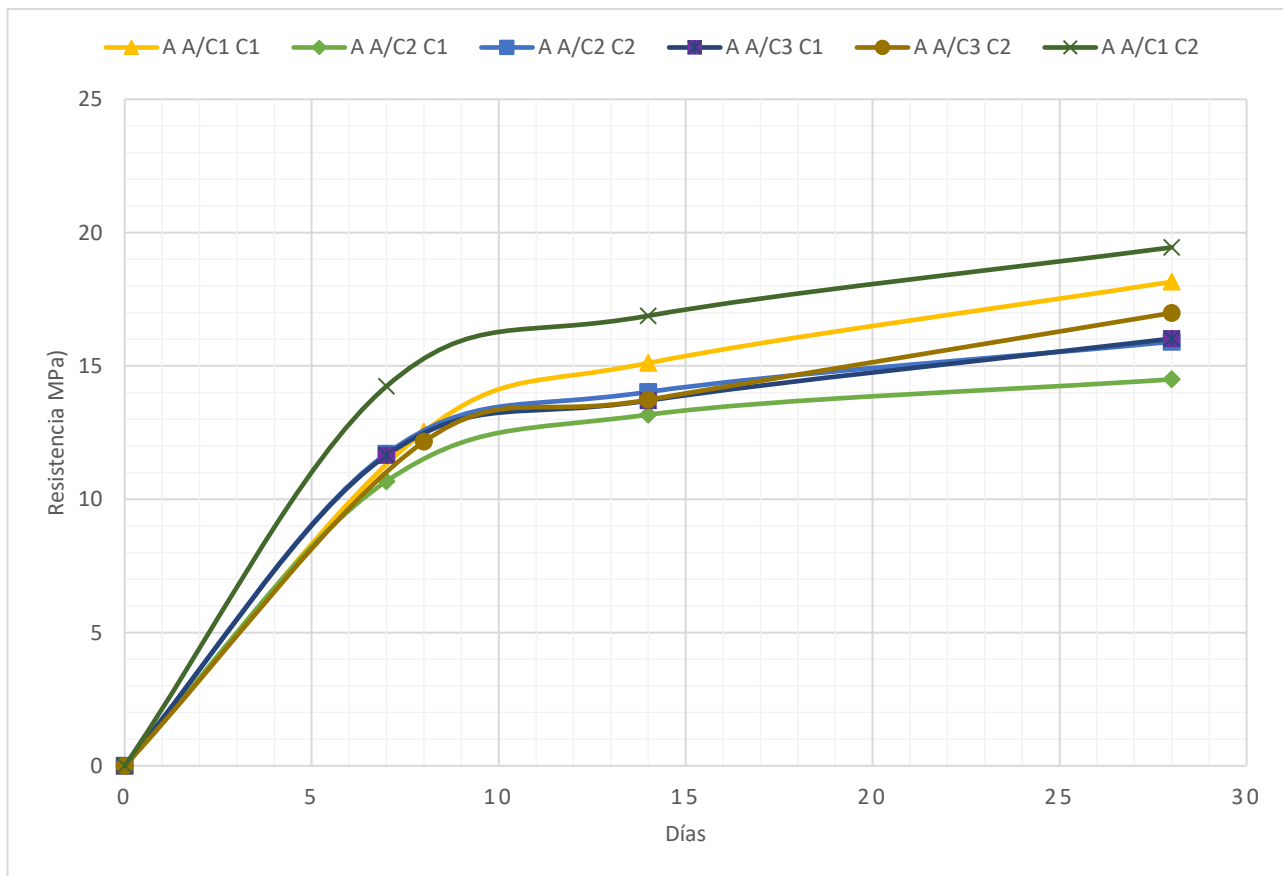
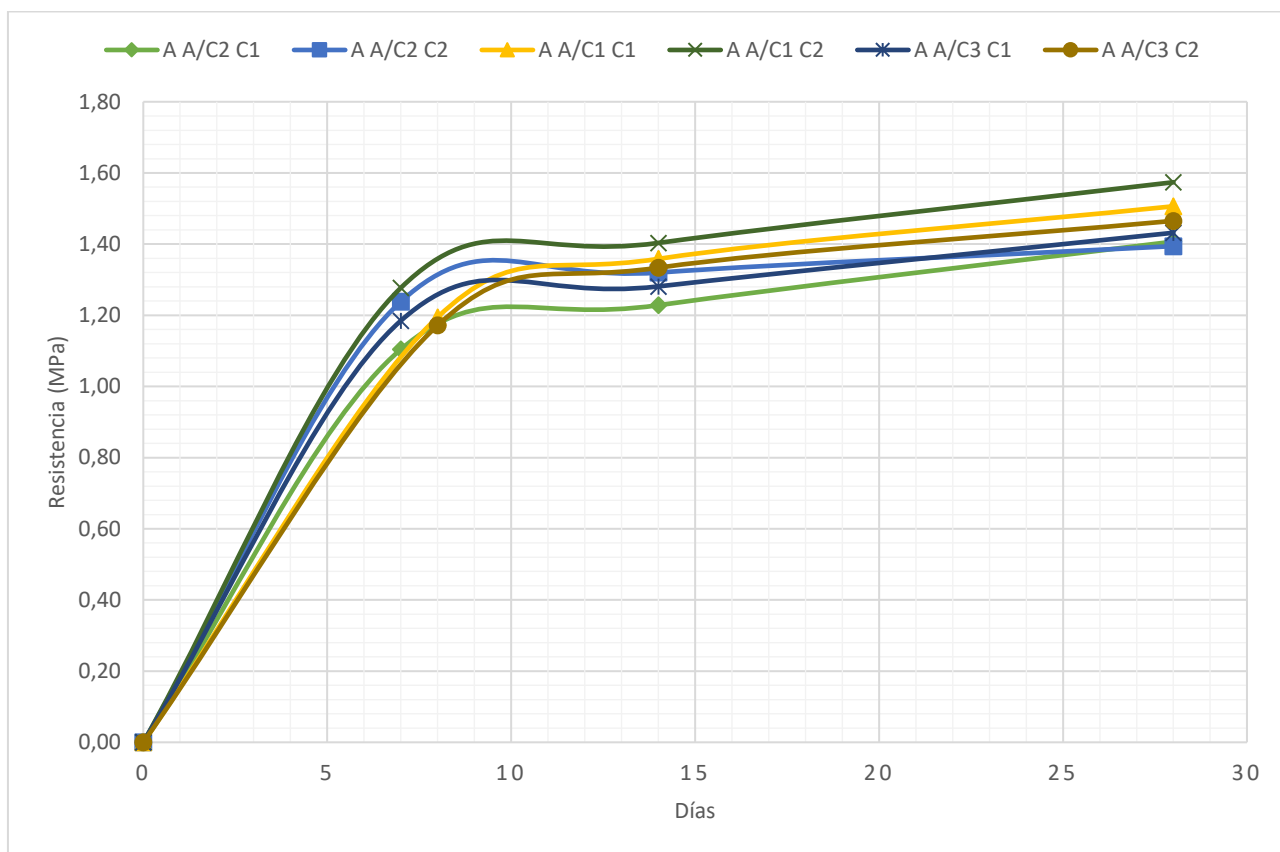


Gráfico 2. Curvas de resistencia a la tensión diametral de cilindros del diseño A



Cuadro 9. Resistencia promedio a la compresión uniaxial y tensión diametral del diseño B A/C1

Compactación	Días	Compresión (MPa)	Tensión diametral (MPa)
C1	7	10,02	1,01
	15*	11,70	1,20
	28	13,20	1,27
C2	7	10,45	1,03
	15*	12,20	1,17
	28	13,70	1,35

*Prueba no se pudo realizar a 14 días.

Cuadro 10. Resistencia promedio a la compresión uniaxial y tensión diametral de cilindros del diseño B A/C2

Compactación	Días	Compresión (MPa)	Tensión diametral (MPa)
C1	7	10,41	1,01
	14	12,40	1,19
	28	13,37	1,36
C2	7	10,32	1,07
	14	12,44	1,21
	28	13,31	1,33

Cuadro 11 Resistencia promedio a la compresión uniaxial y tensión diametral de cilindros del diseño B A/C3

Compactación	Días	Compresión (MPa)	Tensión diametral (MPa)
C1	7	10,50	1,08
	14	11,78	1,22
	28	12,99	1,29
C2	7	9,99	1,10
	14	11,74	1,25
	28	13,13	1,34

Gráfico 3. Curvas de resistencia a la compresión uniaxial de cilindros del diseño B

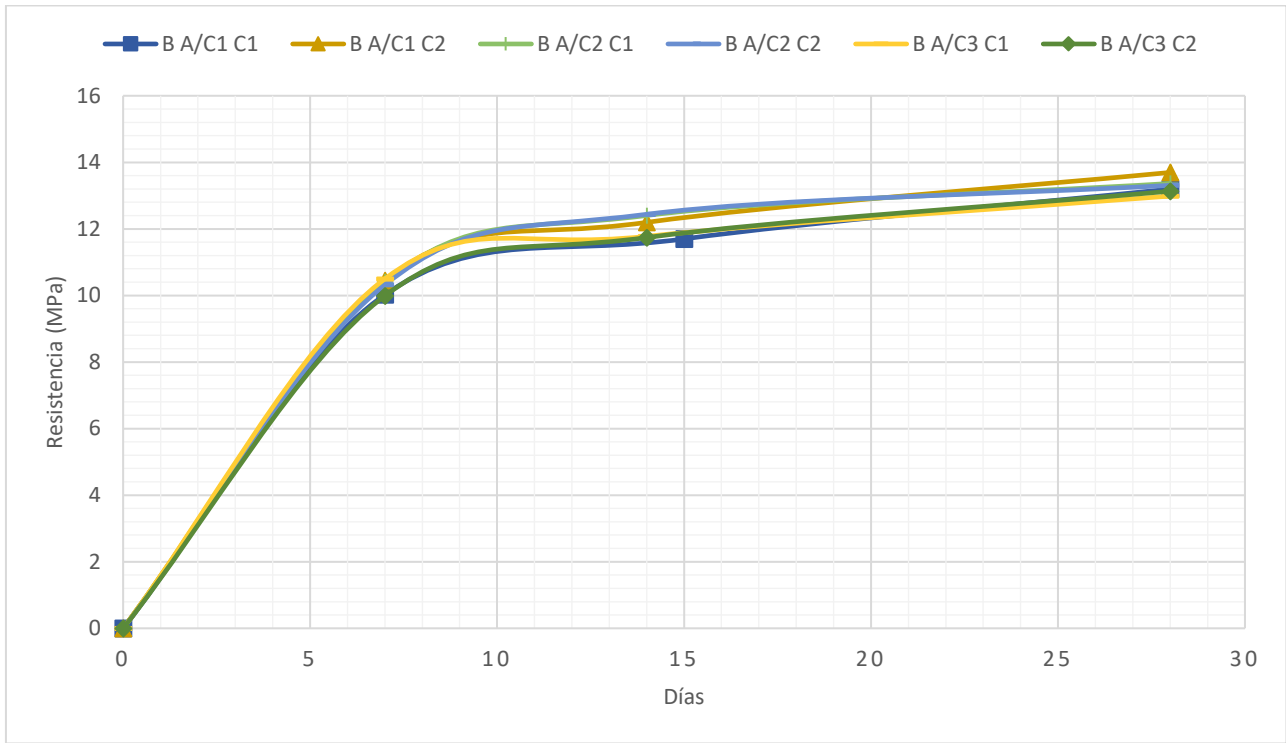
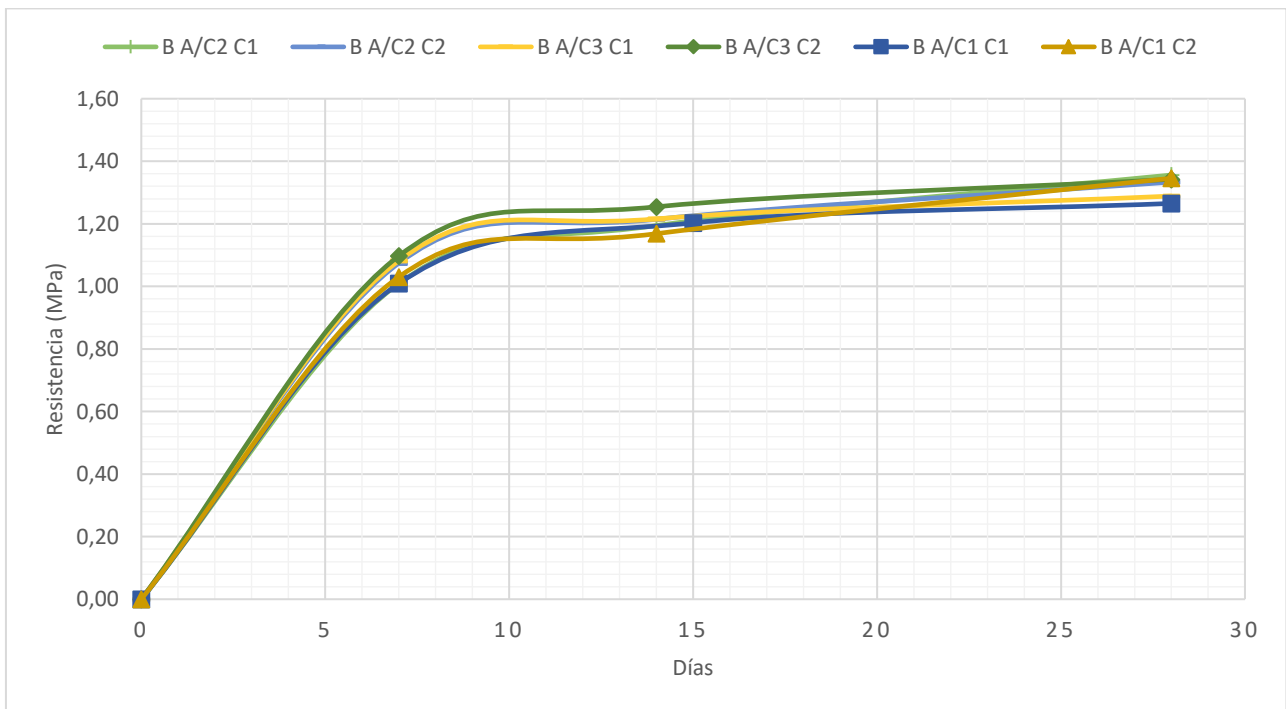


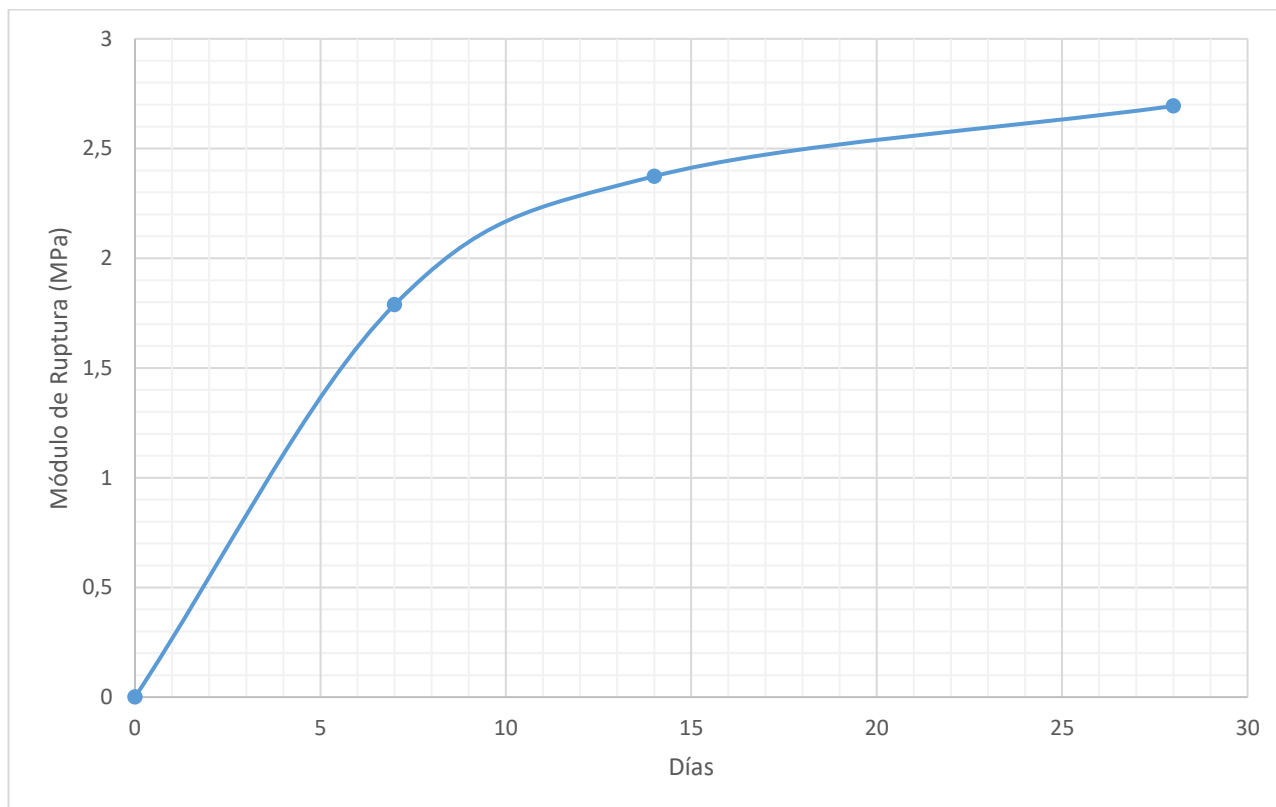
Gráfico 4. Curvas de resistencia a la tensión diametral de cilindros del diseño B



Cuadro 12. Módulo de ruptura promedio del diseño B A/C2 C1

Días	Módulo de ruptura (MPa)	Coefficiente de variación
7	1,79	6,70 %
14	2,37	11,94 %
28	2,69	1,92 %

Gráfico 5. Módulo de ruptura de vigas del diseño B A/C2 C1



Cuadro 13. Datos de permeabilidad promedio

Código	k (mm/min)	Q (ml/s)
A A/C1 C1	103,09	78939,27
A A/C1 C2	98,62	75513,60
A A/C2 C1	98,80	75656,35
A A/C2 C2	91,86	70337,80
A A/C3 C1	100,71	77114,08
A A/C3 C2	93,67	71724,39
B A/C1 C1	114,87	87960,90
B A/C1 C2	115,89	88741,04
B A/C2 C1	113,38	86816,07
B A/C2 C2	111,68	85517,54
B A/C3 C1	112,89	86441,05
B A/C3 C2	107,77	82520,02

Cuadro 14. Datos de infiltración promedio

Número de prueba	1	2	3
Pre-humedecido (s)	9	10,2	9,4
Duración de prueba (s)	37,8	41,1	38,6
I (mm/h) =	2525218,77	2322463,98	2472882,63
Promedio =	2 440 188,46 mm/h		
Coefficiente de variación	6,40 %		

Correlaciones

Gráfico 6. Resistencia a la tensión diametral versus resistencia a la compresión uniaxial de cilindros

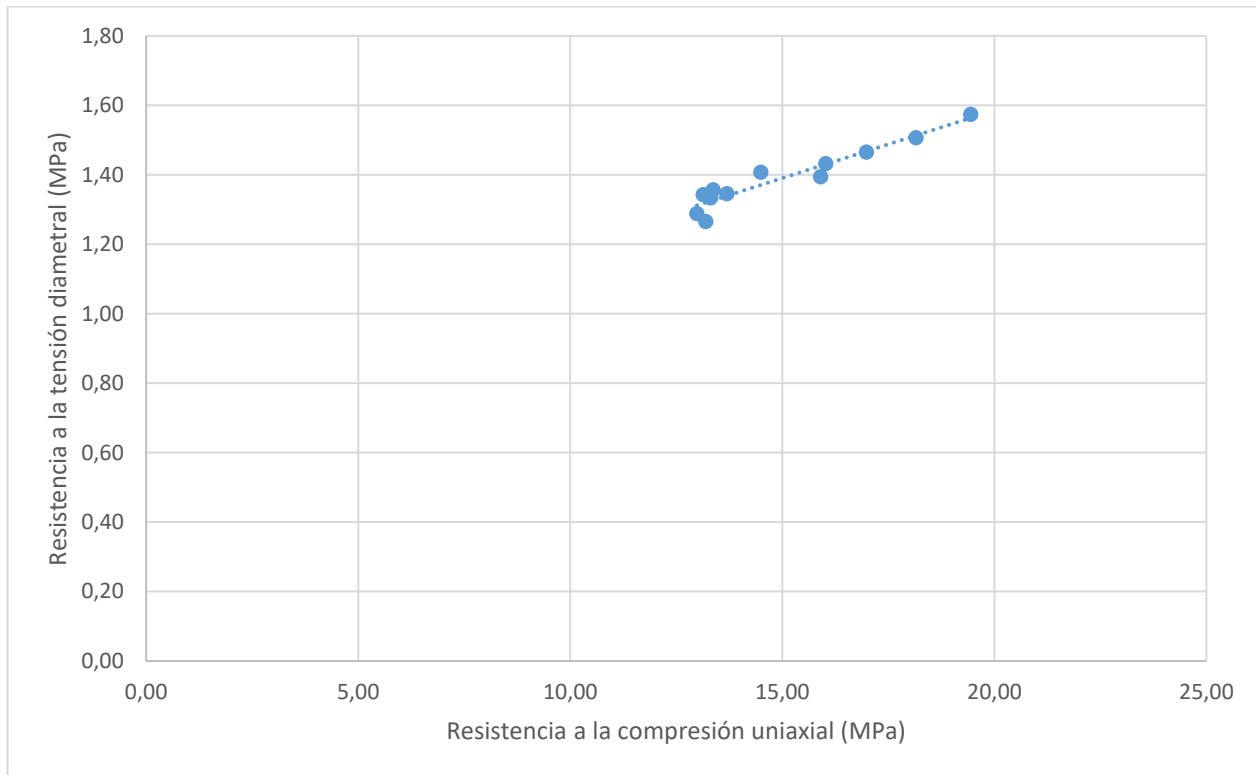


Gráfico 7. Resistencia a la compresión uniaxial de cilindros a 28 días versus porcentaje de vacíos

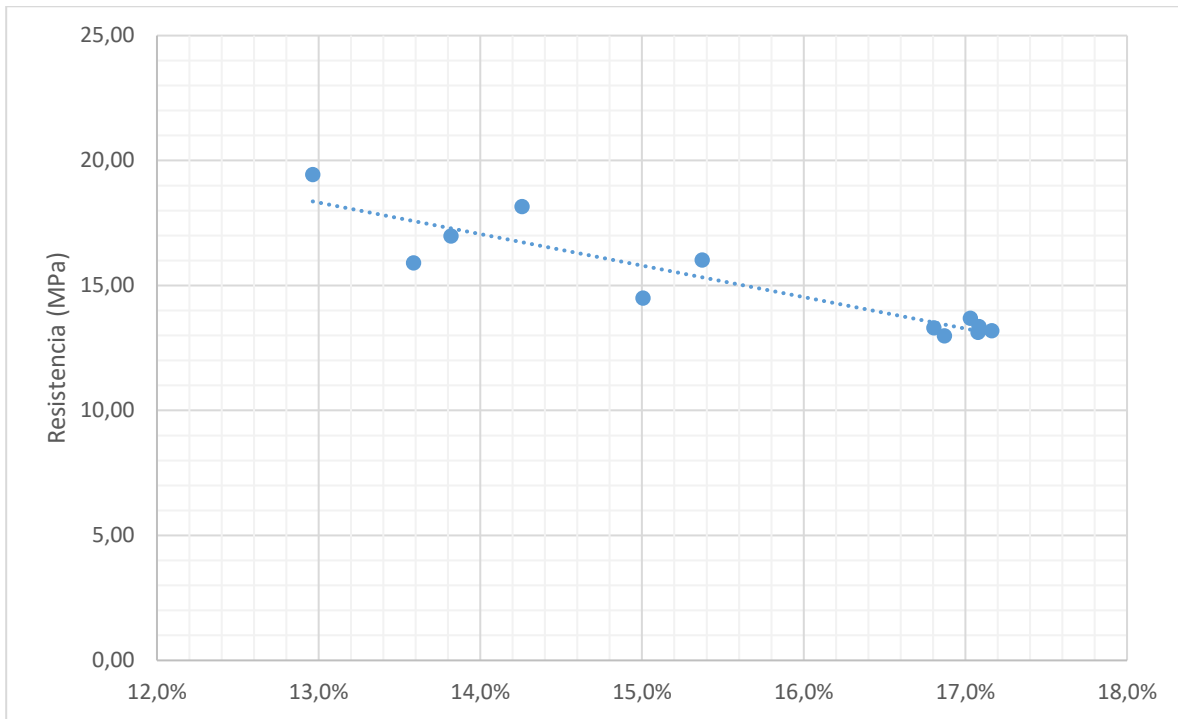


Gráfico 8. Resistencia a la compresión uniaxial de cilindros a 28 días versus permeabilidad

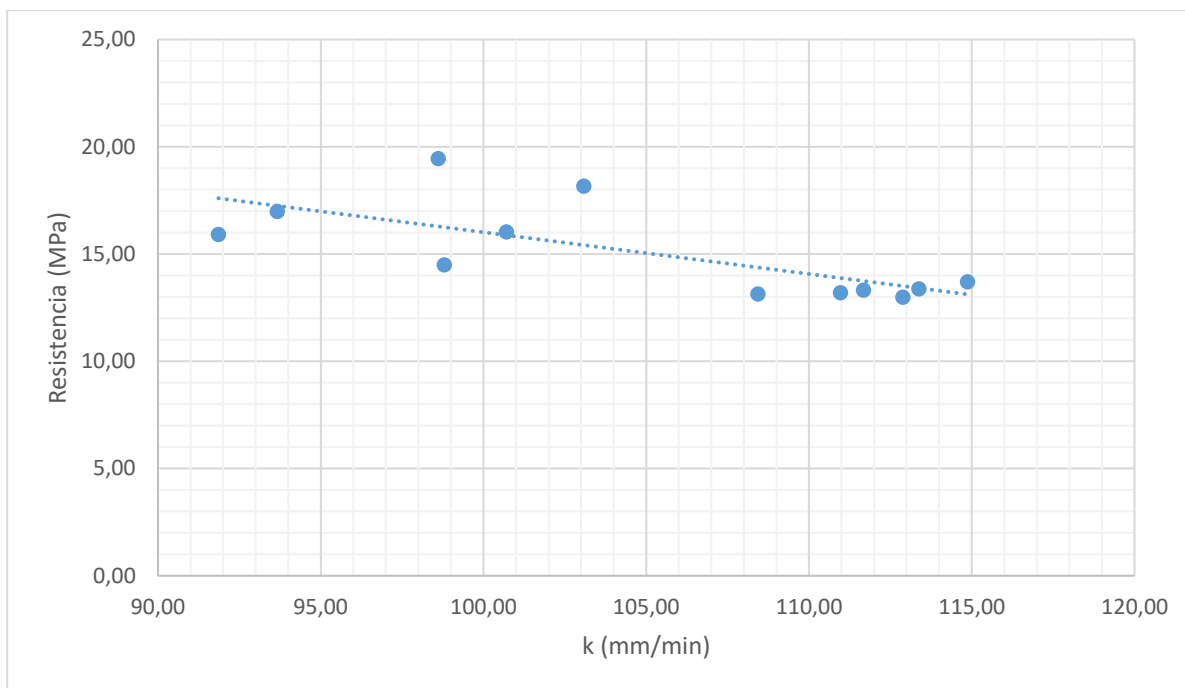


Gráfico 9. Resistencia a la tensión diametral de cilindros versus porcentajes de vacíos

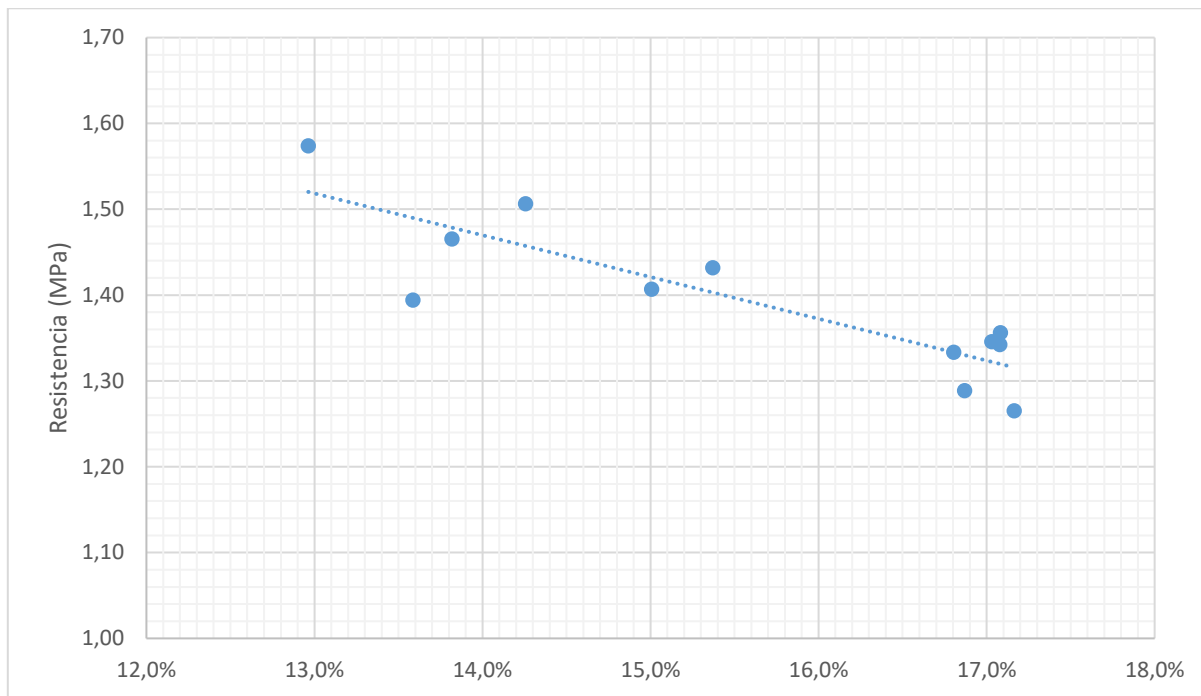


Gráfico 10. Resistencia a la tensión diametral de cilindros versus permeabilidad

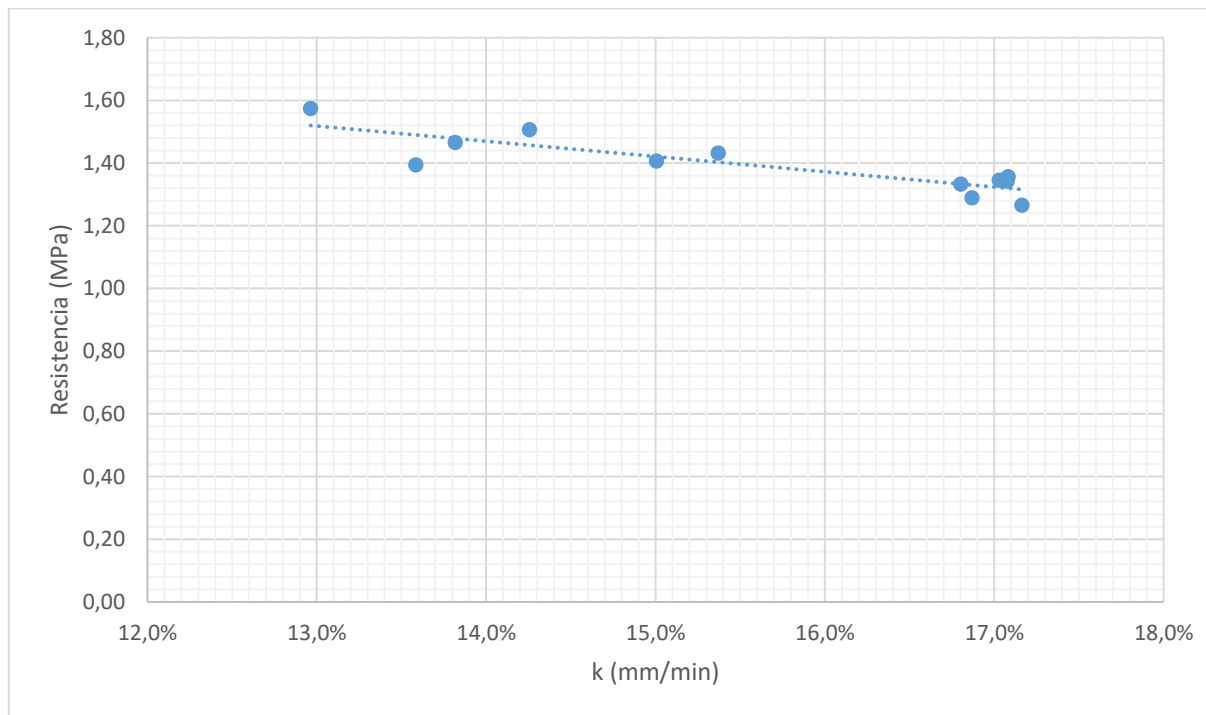


Gráfico 11. Permeabilidad versus porcentaje de vacíos

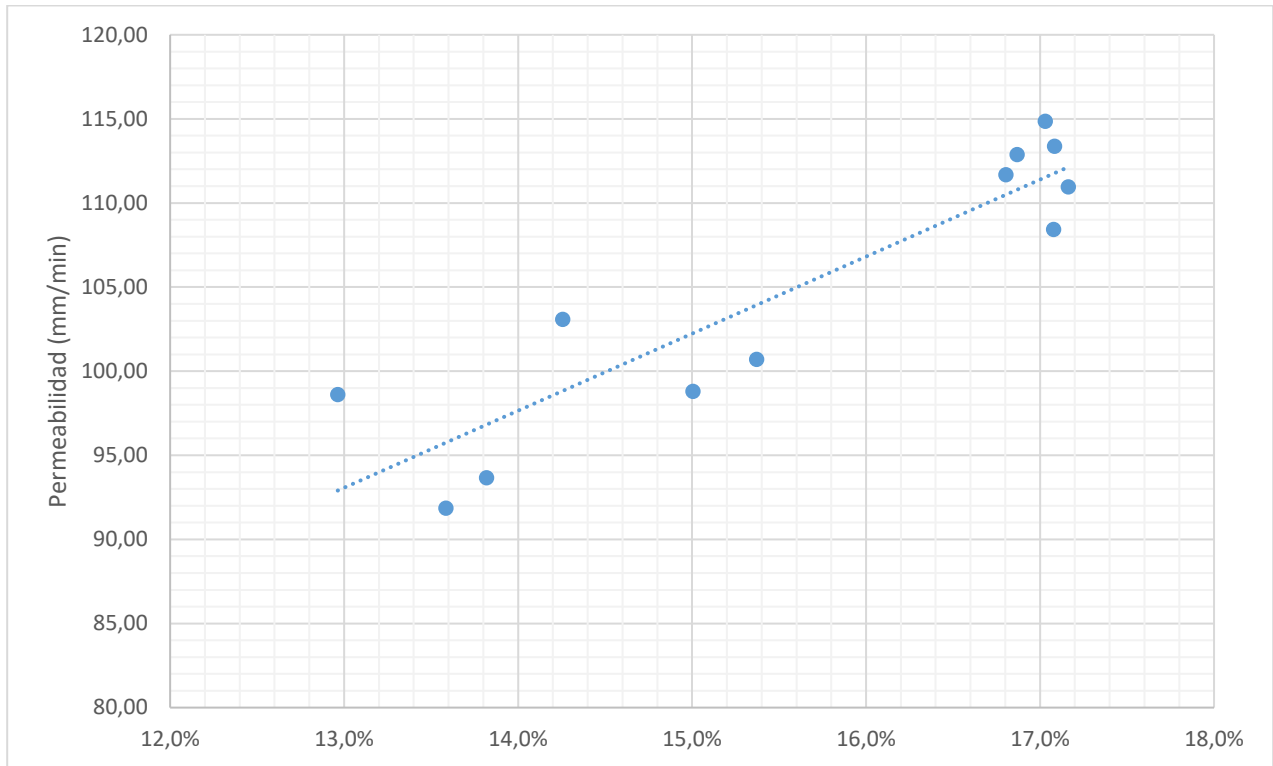


Gráfico 12. Resistencia a la compresión uniaxial de cilindros versus peso unitario

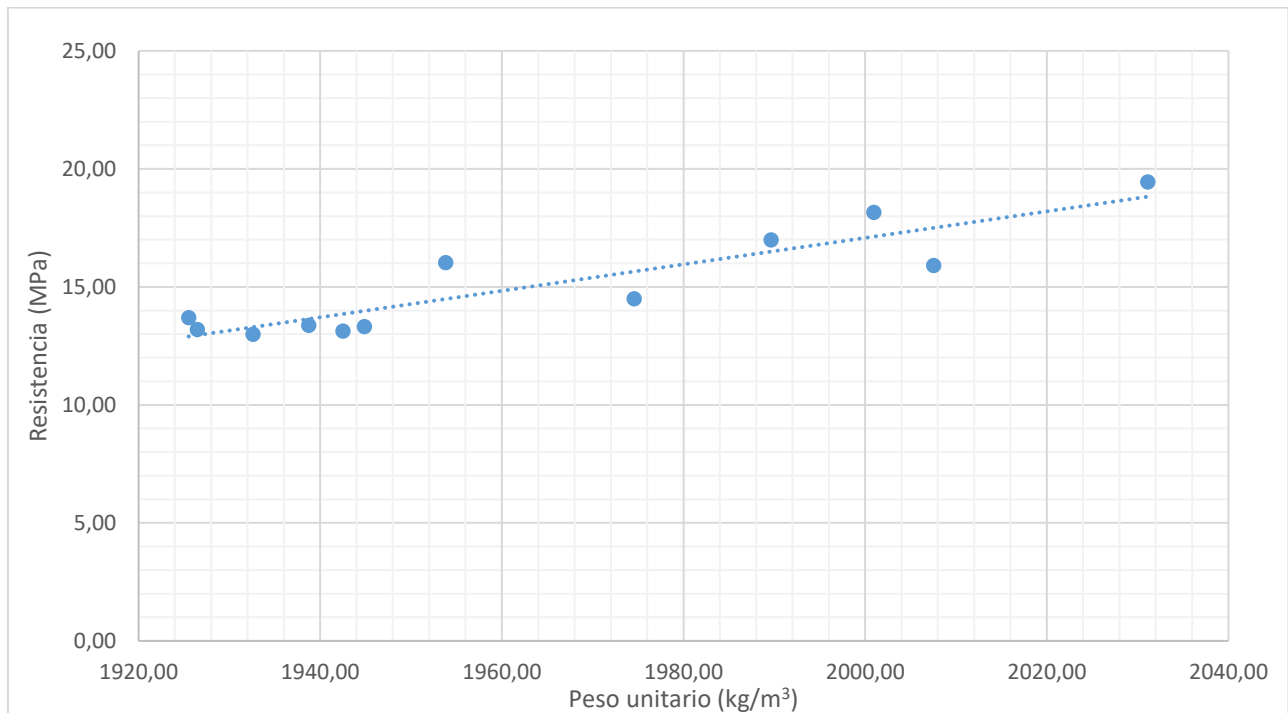
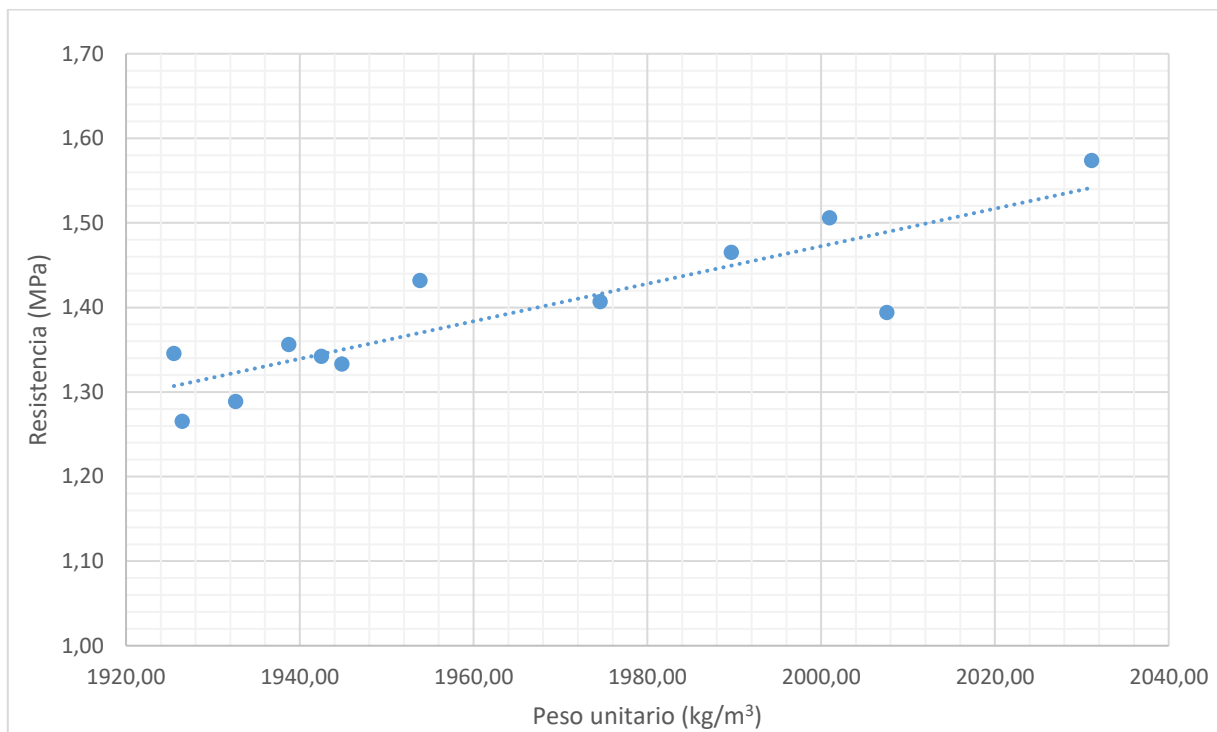


Gráfico 13. Resistencia a la tensión diametral versus peso unitario



Análisis de los resultados

Metodologías de diseño

Como se mencionó ya, se trabajó en el proyecto con dos metodologías de diseño inicialmente, estas eran recomendaciones hechas una por la NRMCA y la otra por el comité 522 del ACI; con esta última se había tenido ya cierta experiencia diseñando y elaborando especímenes, además en el lapso que se estaban esperando los materiales del proyecto como tal, se llevaron a cabo más pruebas no contempladas para ir familiarizándose más con el trabajo y realizando correcciones, sin embargo, en ambos casos se notaron problemas desde el momento de realizar el diseño hasta los resultados muy variados en el material final y en las pruebas. Por lo anterior, para el diseño A se decidió de inmediato iniciar con la metodología de diseño propuesta por la NRMCA; de esta se obtiene la ecuación para el cálculo de volumen de pasta utilizando el porcentaje de vacíos del agregado (Calculado según norma ASTM C29), índice de compactación y el porcentaje de vacíos esperado en el producto final.

$$V_p = V_a + IC - V$$

Ecuación 7. Cálculo del volumen de pasta de la metodología NRMCA

Los problemas encontrados específicamente fueron los siguientes, para el caso de la metodología ACI desde el paso uno donde se presenta una tabla (ver Cuadro 15) para obtener un volumen seco envarillado del agregado grueso en una unidad de volumen de concreto, tabla en la que solo presenta dos tamaños de agregado y tres porcentajes de agregado fino, aparte de esto no profundiza más en el tema.

Cuadro 15. Valores efectivos de b/b_0

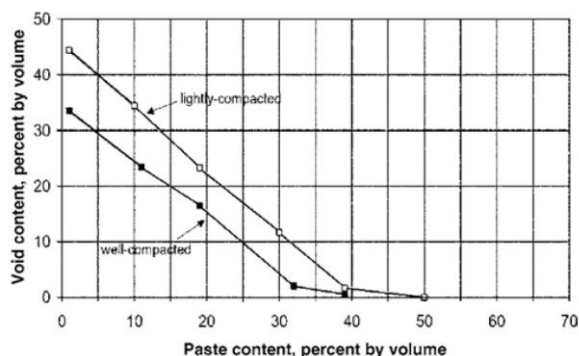
Percent fine aggregates	b/b_0	
	ASTM C33/C33M Size No. 8	ASTM C33/C33M Size No. 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Fuente: ACI 522R-10.

La tabla anterior define el porcentaje, el cual será ocupado por el agregado grueso en la mezcla, desde el cual se obtiene el peso del agregado para luego llegar al Gráfico 14, el cual según el porcentaje de vacíos de diseño en el eje y se busca en una de las dos curvas que representan la energía de compactación, la intersección con el eje x del que se obtiene el porcentaje de pasta a utilizar.

Como se puede observar esta tabla solamente es válida para un solo tamaño de agregado y dos energías de compactación, definidas como compactación ligera y bien compactado, de igual manera sin entrar en más detalle ni definiendo un aproximado de la energía que representa cada una de estas.

Gráfico 14. Relación entre el contenido de pasta y de vacíos para agregado de tamaño No. 8.



Fuente: ACI 522R-10.

Al iniciarse con las mezclas para el diseño A, y realizar las pruebas de porcentaje de vacíos y peso unitario, se empezó a encontrar inconsistencias con lo que se buscaba a la hora de diseñar, como se comentará en el siguiente apartado con más detalle; debido a esto y a los demás problemas mencionados anteriormente, se inició con una propuesta, la cual tomaba la ecuación de la NRMCA, y el resto se calculaba como lo recomendaba el ACI, esto sin antes proponer unos índices de compactación propios, ya que no se encontraban bien definidos.

El problema que se encontró con la metodología de la NRMCA fue semejante a los de la metodología ACI; esta inicia con la Ecuación 7 para el cálculo del volumen de pasta, ecuación en la cual se incluye el índice de compactación, sin embargo, como se comentó antes, simplemente recomienda un índice de siete u ocho para una compactación ligera y de uno para un material bien compactado, además que si no se está seguro de cuál utilizar debe diseñar con un índice de cinco.

Como se observa en ambos métodos se deja muy de lado el tema de la compactación, se vuelve un tema más bien subjetivo al hablar sencillamente de una compactación ligera o bien compactado; esto realmente convierte el proceso de diseño de la mezcla en una tarea casi imposible de iniciar por falta de este dato de entrada. Se convierte en una necesidad cuantificar estos datos, hablar de energías de compactación específicas para cada caso y no solamente de dos opciones abiertas a criterio de cada persona.

Dicho lo anterior, para el diseño B se decide entonces realizar una nueva metodología

proponiendo nuevos índices de compactación con los materiales utilizados en el proyecto de investigación, esto realizando pruebas pequeñas de varios diseños con diferentes energías de compactación conocidas y realizando la prueba ASTM C1688 para determinar si la densidad y porcentaje de vacíos eran los correctos. Una vez se consiguió una constancia en los resultados obtenidos y con las características con las que se diseñaron estos, se obtuvo el valor de uno para la energía de compactación de 172,62 kN-m/m³ y de cero para la de 230,16 kN-m/m³. Este valor de cero en el índice de compactación indicaría que teóricamente una energía mayor a esta sería vana, ya que con esta energía se está logrando compactar el material lo máximo posible sin llegar a triturar el agregado.

En el Cuadro 4 se pueden observar las características del agregado obtenidas en el laboratorio, necesarias para realizar los diseños de mezcla; el dato de porcentaje de vacíos del agregado fue de suma importancia, ya que este es el primer dato de entrada en la ecuación para, junto al índice de compactación y porcentaje de vacíos buscado, definir la relación de volúmenes desde donde se obtiene la cantidad de pasta a utilizarse en la mezcla.

Características del concreto en estado fresco

A la hora de realizar las mezclas de concreto permeable, la cantidad de agua se vuelve un tema muy delicado, son mezclas con relaciones A/C muy bajas, desde 0,25 hasta 0,27 para el caso específico de este proyecto, esto provoca que el material en estado fresco sea sumamente seco como se puede observar en la Figura 25 y que, además, pierden humedad muy rápidamente al ser colocados en campo sin protección. El material debe tener una apariencia con un pequeño brillo, pero que se sigue viendo seco, como se ejemplificó en la Figura 3 (b). Por esta misma razón, este concreto presenta una menor trabajabilidad y un asentamiento prácticamente nulo, por lo que se vuelve innecesaria la prueba de revenimiento del concreto, y se vuelve de suma importancia aplicar una energía de compactación mínima, de otra manera el material básicamente se mantendrá justo como se colocó, donde

inclusive no se obtendrá una adhesión satisfactoria entre las partículas.



Figura 25. Concreto del diseño B A/C2 C1 en estado fresco

En el Cuadro 5 se enlistan los datos de porcentaje de vacíos y densidad de las mezclas de concreto en estado fresco, esto según la norma ASTM C1688; se puede observar que para las mezclas del diseño A donde se utilizó la recomendación de índice de compactación de cinco dada por la NRMCA para casos donde no se tiene certeza del tipo de compactación, sin embargo, no se logró en la mayoría de los casos acercarse al 15,0 % de vacíos esperado. Se osciló en un rango de entre 13,0 % y 15,4 % entre las distintas mezclas, a pesar de que se aplicaban las mismas dos energías de compactación.

Por otra parte, en este mismo cuadro, se observa que para el diseño B donde se buscaba un porcentaje de vacíos de 17,0 %, sí se obtuvieron datos más cercanos, de entre 16,8 % y 17,2 %; esto ya que para dichos diseños se utilizaron los índices de compactación calculados para cada energía, de uno para la compactación de 172,62 kN-m/m³ y de cero para la de 230,16 kN-m/m³.

Dicho lo anterior, se denota que al proponer nuevos índices de compactación como se hizo para efectos de esta investigación, se logró mejorar los resultados esperados a la hora de diseñar. Cabe destacar que no solo se observa una mayor precisión con respecto a los porcentajes de vacíos, en los pesos unitarios también se tiene un rango menor en el diseño B, desde los 1926 kg/m³ hasta los 1944 kg/m³, mientras que para el diseño A los datos estuvieron entre los 1954 kg/m³ hasta los 2031 kg/m³; esto representa una diferencia de más de 77 kg/m³ mientras que para el diseño B es apenas un

poco mayor a 19 kg/m³. Dicho esto, la metodología de diseño propuesta en realidad llega a aportar también una idea mejor del comportamiento y características esperadas en el material.

Se observa también que al utilizar una mayor energía de compactación los porcentajes de vacíos se reducen al mismo tiempo que el peso unitario aumentó, esto tiene lógica, ya que en el caso de este proyecto en específico, al realizar más golpes con el mazo se acomoda mejor el material, se empaqueta en el molde y se fuerza a que se introduzca más por metro cúbico, por supuesto, cerrando vacíos en el proceso que deberían en teoría también reducir la permeabilidad de este.

Comportamiento mecánico

Los concretos permeables, como se ha comentado, obtienen su característica especial de permeabilidad al ser un material de estructura abierta, debido a su bajo porcentaje o ausencia total de agregado fino; sin embargo, esto también conlleva a reducciones en la resistencia por ser un material menos denso y con puntos relativamente pequeños y delgados de contacto conformado por la pasta que se encuentra entre el agregado

En el Cuadro 6, Cuadro 7 y Cuadro 8, se muestran los resultados promedio para los cilindros del diseño A, tanto de las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial como a la tensión diametral a 7, 14 y 28 días; y en el Gráfico 1 y Gráfico 2 se presentan las curvas de comportamiento de estas mismas pruebas, se puede observar que son curvas típicas de falla de cilindros de concreto, en general se obtuvo un poco más del 70 % de la resistencia a los 7 días y de alrededor del 90 % a los 14.

Los datos promedio de resistencia a la compresión uniaxial se encuentran en un amplio rango desde los 14,50 MPa hasta los 19,45 MPa, como era de esperarse este dato máximo se obtuvo en la mezcla con la menor relación A/C y la mayor energía de compactación, sin embargo, los datos más bajos no fueron los correspondientes a la mayor relación A/C, ya que para efectos de este diseño no se había propuesto la nueva metodología, donde se incluía cada índice de compactación basado en la energía a utilizar. Los diseños con la misma relación A/C eran básicamente los mismos, la diferencia está en la energía de compactación aplicada, por esta razón

se observa una mayor resistencia en los especímenes con mayor energía de compactación.

Por otra parte, en el Cuadro 9, Cuadro 10 y Cuadro 11 se presentan los datos promedio para la resistencia a la compresión uniaxial y resistencia a la tensión diametral de cilindros para el diseño B a 7, 14 y 28 días; y sus curvas de comportamiento en el Gráfico 3 y Gráfico 4; de igual manera para este diseño se obtuvo alrededor del 75 % de la resistencia a los 7 días y de 90 % a los 14 días, prácticamente igual que para el diseño A, lo cual tiene sentido, ya que se utiliza el mismo cemento.

Los datos de resistencia a la compresión para este diseño estuvieron entre los 12,99 MPa hasta los 13,70 MPa, un rango de menos de un Mega Pascal, a diferencia del diseño A donde los datos extremos se encontraban a una diferencia de más de tres; no obstante, se obtuvieron mayores datos de resistencia a menor relación A/C. Los valores de resistencia del diseño B fueron en promedio un 26 % menor a los del diseño A, se debe tener en cuenta también, que se diseñó con una diferencia en el porcentaje de vacíos de 2 %. Se puede apreciar que los datos son más constantes para este diseño, esto debido a las correcciones realizadas al hacer la propuesta de esta metodología utilizada para el diseño B.

La decisión de utilizar el diseño B A/C2 C1 como diseño óptimo se basó primero que todo en el hecho de que el B fue el diseño propuesto y mejorado del A; luego en la decisión para la relación A/C se decidió utilizar la segunda, ya que la primera tiene poca trabajabilidad por una disminución no tan importante de la resistencia, mientras que obtiene mejores resultados que la relación tres; finalmente, respecto a la compactación la decisión se vuelve más simple, ya que como se ha comentado esta energía ya se encuentra reflejada en la mezcla a la hora de realizar el diseño, por lo que se vuelve prácticamente irrelevante usar una energía u otra, entonces se decidió utilizar la primera opción de compactación, lo que se vuelve logísticamente más sencillo, en especial al pensar en la construcción a mayor escala fuera del laboratorio.

La prueba de flexión de vigas es importante, ya que este concreto se utiliza principalmente para superficies de ruedo, el dato de módulo de ruptura es el que se utiliza para la aceptación de pavimentos, así que no se podía dejar por fuera en esta investigación.

En el Cuadro 12 se pueden observar los datos promedio para el módulo de ruptura de las vigas realizadas para el diseño B A/C2 C1, y en el Gráfico 5 su curva de comportamiento; en total se realizan seis vigas, dos por edad como lo indica la norma ASTM C 78. En todas las pruebas realizadas a dichas vigas se dieron las fallas en el tercio medio como se puede observar en la Figura 26, esto según las medidas dadas en la norma; con lo cual se validan los datos obtenidos para módulo de ruptura.

Se obtuvo un 66 % de la resistencia a 7 días y de 88 % a 14 días, los valores fueron en promedio un 20 % del valor de resistencia a la compresión uniaxial de cilindros.

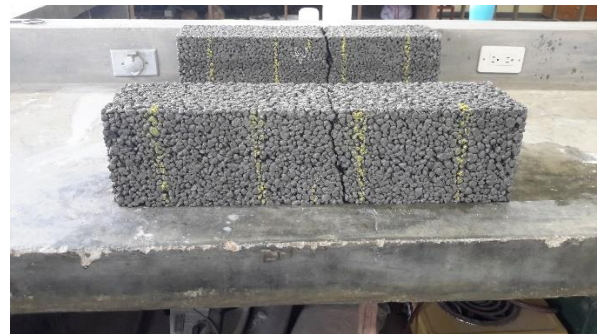


Figura 26. Falla en tercio medio en prueba de vigas a 14 días.

Comportamiento hidráulico

Cuando se habla de concretos se tiene ya la costumbre de hablar casi exclusivamente de sus características mecánicas, sin embargo, para esta tipología de concreto se debe inculcar un cambio en el pensamiento de las personas a la hora de realizar un proyecto y en especial al solicitar el material según las necesidades a satisfacer.

Durante la realización de este proyecto se tuvo la oportunidad de hablar con varias personas del área de la construcción, muchas de las cuales ni siquiera habían escuchado sobre el concreto permeable, la gran mayoría de estas en las conversaciones sobre el concreto, la primera y única pregunta que hacían era sobre la resistencia a la compresión de este. Debe tenerse en cuenta que esta alternativa de concreto se utiliza para aprovechar su característica de permeabilidad, por ende, se debe hablar de resistencia y permeabilidad al mismo tiempo.

Los resultados de permeabilidad promedio para cada uno de los diseños realizados se

presentan en el Cuadro 13, estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio con un permeámetro de carga variable construido basado en la recomendación que hace el ACI; de primera entrada se observa que los valores para el diseño A van desde 91,86 mm/min hasta 103,09 mm/min, siendo en general menores a los obtenidos por el diseño B, que están entre el rango de 108,44 hasta 114,87; esto tiene sentido, ya que para el diseño B se buscaba un porcentaje de vacíos de 17,0 % mientras que para el A de 15,0 %, y como se observó antes fueron inclusive menores en la práctica.

De la misma manera que con los datos de resistencia, para el diseño B los datos fueron más precisos, mientras el diseño A osciló en un rango mayor de datos. En promedio se obtuvo un incremento del 13,0 % en la permeabilidad en el diseño B con respecto al A, esto en un aumento en el diseño (ya los diseños prácticos fueron presentados, donde para el diseño A hubo varios fuera de lo esperado) de solo un 2 % en el porcentaje de vacíos.

En el Cuadro 14 se presentan los resultados promedio de las tres pruebas de infiltración realizadas en la loseta, a pesar de que la norma ASTM C1701 indica que se deben realizar dos pruebas en áreas de hasta 2 500 m², esto debido a que la prueba es relativamente fácil y rápida de hacer, además, el área es de solamente 4 m² y por ser un trabajo de investigación y no un proyecto de construcción *per se*, se volvía más provechoso obtener más datos del paño.

En promedio la tasa de infiltración fue de 43 227 mm/s, una tasa mucho mayor a la de permeabilidad en el laboratorio para este mismo diseño, la cual fue de 114,87 mm/min; sin embargo, este comportamiento era de esperarse, esto sucede debido a que la infiltración sólo informa la cantidad de agua que pasa por la superficie, el flujo es insaturado y se extiende lateralmente a través del pavimento, de manera que el volumen del pavimento húmedo, es mucho mayor que el volumen del pavimento directamente debajo del área de la prueba, mientras que en los cilindros estando en condiciones de laboratorio el flujo es saturado y este viaja solamente por el volumen ya conocido del espécimen.

Correlaciones

Como objetivo de este proyecto de investigación, se quería incluir correlaciones entre las características del material, ya que como se ha indicado en repetidas ocasiones, no se debe pensar solo en la resistencia del material, pues esta se ve afectada directamente por las demás características presentes en el concreto.

En el Gráfico 6 observamos la relación lineal entre la tensión diametral y la compresión uniaxial de cilindros, en general la resistencia a la tensión diametral es alrededor de un 8 % a un 10 % de la resistencia a la compresión para el caso específico de este proyecto, la teoría para concretos convencionales habla de un rango desde el 10 % hasta el 15 %.

Para el caso del Gráfico 7 tenemos la relación entre la compresión uniaxial a 28 días y el porcentaje de vacíos, mientras en el Gráfico 9 tenemos los datos de resistencia a la tensión diametral contra el porcentaje de vacíos; como se puede observar en la línea de tendencia cuando las resistencias aumentan los porcentajes de vacíos se reducen, este comportamiento de proporcionalidad inversa era de esperarse, ya que al aumentar el contenido de vacíos significa menos material por metro cubico aportando a la resistencia y más posibles planos de falla. Por otra parte, en el Gráfico 8 tenemos estos mismos resultados de resistencia a la compresión a 28 días, y de tensión diametral en el Gráfico 10 contra los datos de permeabilidad en milímetros por minuto; similar a lo comentado anteriormente era de esperarse que, al aumentar la permeabilidad de los especímenes se redujera la resistencia de estos.

En el Gráfico 11 tenemos los datos de permeabilidad contra los resultados de porcentaje de vacíos, de igual manera como era de esperarse para este caso son características proporcionales entre ellas, aumentar el porcentaje de vacíos se verá reflejado en un aumento en la permeabilidad del material debido a que el agua va a tener más espacios interconectados para fluir de un punto a otro.

De la misma manera en el Gráfico 12 se presentan las resistencias a la compresión uniaxial a 28 días contra el peso unitario, y en el Gráfico 13 de resistencia la tensión diametral a 28 días contra el peso unitario; podemos observar y siguiendo inclusive con la misma lógica de los párrafos

anteriores, que al aumentar el peso unitario del material aumentaremos la resistencia de este, estos gráficos son homólogos al 7 y 8 debido a que justamente el peso unitario depende del porcentaje de vacíos, más vacíos conlleva a menor densidad del material y esto a reducción en las resistencias.

En la Figura 27 se muestra una representación visual de lo hablado anteriormente, en esta se observan secciones de concretos permeables realizados en la investigación de Kevern con un filtro monocromático para una mejor visualización de las partes; se puede observar la gran cantidad de vacíos interconectados en la Figura b donde se obtendría una mayor permeabilidad que por ejemplo, la Figura c donde sería difícil para el agua cruzar, sin embargo, este último tendría una mayor resistencia que el primero gracias a su densidad.

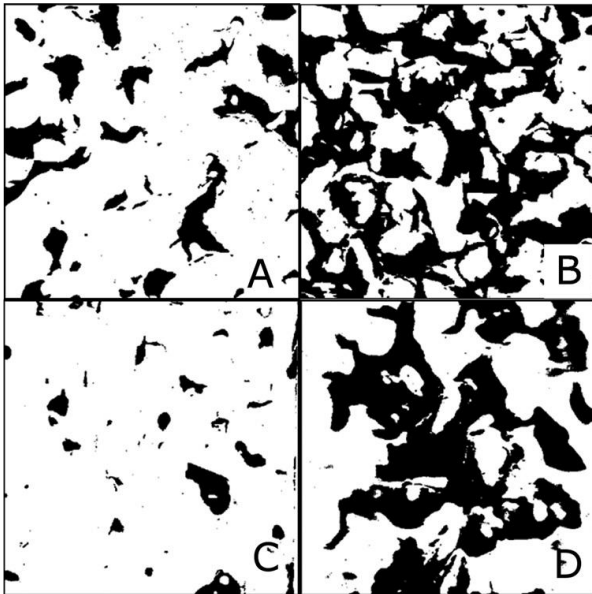


Figura 27. Comparación de porosidad interna y externa: (a) alta porosidad interna 19,7 %; (b) alta porosidad externa 47,5 %; (c) baja porosidad interna 6,8 %; (d) baja porosidad externa 40,5 %. Fuente: (Kevern, 2015)

Diseño óptimo de mezcla

Al hablar de diseño de mezcla óptima, se vuelve fundamental el apartado de correlaciones presentado anteriormente; ya que lo que se busca es el equilibrio entre la resistencia mecánica del concreto y su permeabilidad que satisfaga las

necesidades específicas. Por esta razón, el diseño óptimo puede variar de proyecto en proyecto, quizás en una zona menos lluviosa se puede aprovechar para aumentar la resistencia del concreto para cargas mayores, mientras que en una zona con fuertes precipitaciones y que quizás el pavimento sea de uso peatonal solamente, se puede incrementar mucho la capacidad permeable de este castigando la resistencia y cumplir con lo esperado.

Parqueo de pavimento permeable

Ya con toda la información presentada anteriormente, lo importante es encontrar el diseño óptimo que se va a utilizar en cierto proyecto de construcción; se debe tener en cuenta que de la misma manera como ocurre en cualquier nuevo proyecto, es un escenario nuevo y por ende, hay que trabajarlo de manera diferente. Así como no se puede hablar de un pavimento asfáltico óptimo para aplicar en todos los proyectos carreteros a realizar, no se puede definir un diseño óptimo de concreto permeable para utilizar en todas las losas a construirse, ya se ha hablado que para diseñar el concreto permeable se debe tener en cuenta dos puntos principales, el estructural y el hidráulico.

Para el diseño hidráulico, como se ha mostrado en este proyecto, se realiza desde el diseño de la mezcla de concreto como tal, al definir un porcentaje de vacíos que debería definirse basado en la permeabilidad mínima buscada, ya se puede tener una idea con los gráficos presentados anteriormente.

Por otro lado, para el diseño estructural se deben realizar las pruebas mencionadas en este proyecto para poder definir un espesor de losa suficiente para las cargas a aplicarse durante su vida útil; la teoría menciona que el espesor mínimo en losas de concreto permeable es de seis pulgadas, sin embargo, es imperativo realizar el estudio correspondiente, y usualmente basta con ir aumentando el espesor de la losa para conseguir la resistencia buscada.

Como parte del proyecto se planificó aplicar la metodología de diseño a un caso de construcción real, para lo cual se realizaron varias reuniones con el departamento de administración y mantenimiento del TEC, donde se comentó sobre los planes de la Escuela de Ingeniería

Agrícola de construir un parqueo a un costado de sus instalaciones en el campus central.

Se procedió a realizarle la propuesta de un parqueo de pavimento permeable al director de carrera, el cual le dio visto bueno al proyecto; además, se incluyó a representantes de la empresa AMCO en las conversaciones, esto para que ellos pudieran realizar el trabajo de construcción de la losa de parqueo como tal.

Debido a temas de tiempo y recursos por parte de la institución, fue imposible hacer la construcción de este parqueo, sin embargo, se adjunta todo el trabajo previo realizado para que se promueva implementarlo en un futuro.



Figura 29. Propuesta de parqueo de pavimento permeable para la escuela de Ingeniería Agrícola del TEC.

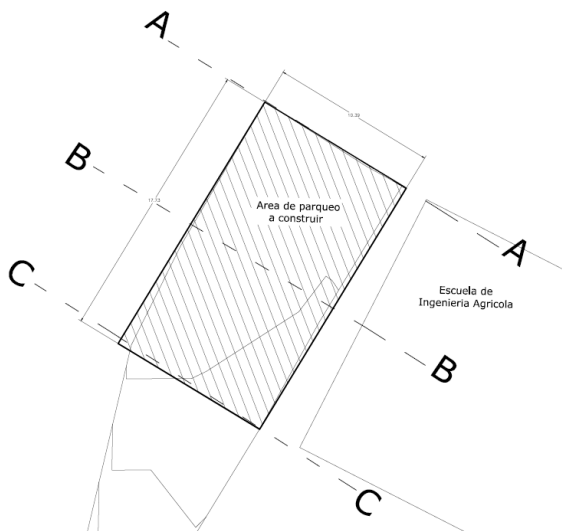


Figura 28. Vista en planta de parqueo propuesto.

Conclusiones

- Se formuló realizar una propuesta de metodología de diseño de concreto permeable que toma en cuenta las características de forma del agregado, cemento a utilizar, relación A/C y energía de compactación a aplicarse; sumado a esto se propusieron índices de compactación propios asociados a energías de compactación específicas.
- Se observó al trabajar con las mezclas en estado fresco que para la relación A/C de 0,25 la trabajabilidad era muy baja con lo cual se hacía difícil el manejo de esta, para la relación de 0,27 a pesar de ser un aumento pequeño la diferencia en la trabajabilidad es apreciable debido a lo que se ha mencionado respecto a lo delicado que llega a ser el tema del agua; de la misma manera y como era de esperarse para la relación de 0,30 la trabajabilidad mejora aún más.
- Las mezclas de concretos permeables alcanzan resistencias menores que las de los concretos convencionales utilizando el mismo cemento, esto sucede debido a su configuración de estructura abierta que produce vacíos en el material, los cuales son ocupados por la combinación de agregado fino y cemento en los concretos convencionales.
- Se obtuvieron resistencias a la compresión uniaxial a 28 días para el diseño A desde los 14,50 MPa hasta los 19,45 MPa; mientras para el diseño B en el rango de los 12,99 MPa hasta los 13,70 MPa.
- Los resultados de resistencia a la tensión diametral a 28 días para el diseño A estuvo entre 1,39 MPa a 1,57 MPa; para el caso del diseño B estos datos variaron desde 1,27 MPa a 1,36 MPa.
- Los datos de permeabilidad para el diseño A fueron desde los 91,86 mm/min hasta los 103,09 mm/min; para el diseño B desde 108,44 mm/min hasta los 114,87 mm/min.
- De la misma manera que con los concretos convencionales, el concreto permeable obtiene alrededor del 70 % de la resistencia a los 7 días y de un aproximado del 90 % a los 14 días; esto era de esperarse, ya que este comportamiento es más bien el reflejo de la influencia del cemento utilizado.
- En general para la metodología de diseño propuesta se obtuvieron datos más precisos en las pruebas tanto de resistencia a la compresión y tensión como en las de permeabilidad y porcentaje de vacíos, esto según lo que se buscaba al diseñar. Esto principalmente por realizar pruebas con energías de compactación conocidas y posteriormente, asociarlas a un índice de compactación para utilizar en la ecuación de diseño.
- Se comprobó que los datos de resistencia del concreto siguen una tendencia de aumentar al disminuir la permeabilidad, esto sucede porque la cantidad de vacíos que proporcionan los espacios para que el agua fluya, al mismo tiempo producen más planos de fallas y al disminuir su densidad el material será indudablemente menos resistente.
- Se demostró que la prueba de infiltración en campo proporciona datos mucho mayores que los de permeabilidad en laboratorio, a pesar de ser pruebas homólogas, los datos son muy diferentes para un mismo diseño. Esto debido a que en laboratorio se tiene un volumen de concreto conocido con un flujo de agua saturado, mientras para la infiltración es un flujo no saturado y se mide más bien el

agua que es absorbida por la superficie estudiada.

- Se muestra al concreto permeable como una solución amigable con el ambiente para el manejo de aguas de escorrentía, no impermeabilización de los suelos e inclusive ayuda en la puntuación de certificación LEED.

- Se propuso una zona de parqueo de pavimento permeable para seis vehículos, para su construcción al costado de la Escuela de Ingeniería Forestal; sin embargo, este no pudo realizarse por falta de tiempo y temas de dinero con la oficina de administración y mantenimiento de la institución.

Recomendaciones

- Realizar más pruebas con la metodología de diseño para concretos permeables propuesta, variando los materiales, relaciones A/C, porcentaje de vacíos y porcentaje de agregado fino. Esto para comprobar si la metodología es válida con estas variaciones, e inclusive se pueden realizar pruebas con aditivos y así mejorar sus características mecánicas sin disminuciones en la permeabilidad, además de los aditivos que se deben utilizar cuando se coloca una gran cantidad de material por el cuidado que se debe tener con la cantidad de agua en la mezcla.
- Como se comentó antes, este proyecto se presenta como un buen inicio a una metodología de diseño aplicable en el país, esto dado de que a pesar de que se realiza la propuesta, por el mismo alcance de este se lograron probar un par de diseños con algunas variables; por esta razón, se recomienda realizar las pruebas correspondientes para validarla estadísticamente donde esta investigación queda corta.
- Desarrollar nuevos datos de índices de compactación, esto utilizando otra clase de materiales, ya que estos podrían variar respecto a los presentados para este proyecto al variar el cemento o los agregados.
- Generar curvas de permeabilidad esperada según porcentaje de vacíos diseñado, como las que se presentan en el ACI 522R. Esto para obtener el grafico homologado aplicado a esta metodología y a los materiales que se utilizan en el país.
- Ya que se obtuvieron datos altos de permeabilidad para todos los diseños realizados, esto en comparación con los que se estudió en la literatura además de la comparación contra los datos de lluvia para Costa Rica, se deberían realizar estos diseños castigando un poco el porcentaje de vacíos para incrementar las resistencias del material hasta el punto de alcanzar una permeabilidad mínima aceptable o que se ajuste a las necesidades de cada caso específico.
- Utilizar una gama más amplia de equipos de compactación con energías distintas a las de este proyecto, tanto para el caso de moldeos de cilindro en el laboratorio como para la construcción en campo; además con esto se podría llegar a asignar índices de compactación a equipos específicos del mercado.
- Ejecutar la construcción del parqueo propuesto para la Escuela de Ingeniería Agrícola mostrado en esta investigación. Ya que se había acordado realizarlo y la propuesta ya está hecha, debería retomarse la idea y ejecutarla, pues en el tiempo otorgado para realizar este proyecto fue imposible hacerlo.
- Realizar estudios sobre el mantenimiento de las losas de concreto permeable, esto porque el material se comporta como un filtro, el cual llegará a taparse en algún momento si no se le da el mantenimiento adecuado; se pueden realizar estudios de reducción de permeabilidad en estos casos, y de cómo combatirlo. Se puede aplicar la norma ASTM C1747 para el cálculo de la resistencia a la degradación del concreto permeable por impacto y abrasión.
- Llevar a cabo pruebas de porcentaje de vacíos del concreto en estado endurecido, para comprobar si este se encuentra dentro del rango de diseño o varía mucho respecto al tomado en estado fresco; el procedimiento

para realizar esta prueba se encuentra dado en la norma ASTM C1754.

- Realizar pruebas de permeabilidad a los cilindros en el laboratorio utilizando un permeámetro de carga constante para determinar si existen diferencias, en cuyo caso se debería determinar el porcentaje y cuál sería el más fiable.
- Implementar esta tipología de concreto en otras aplicaciones aparte del enfoque a parques que se da en este proyecto, como

aceras, ciclovías, carreteras de bajo volumen de tránsito, etc.

- Se debería sugerir y apoyar el mayor uso del concreto permeable como alternativa verde a lo que conocemos y utilizamos actualmente, además de los beneficios que su uso trae a los proyectos de construcción se hace conciencia sobre la importancia de cuidar el recurso hídrico.

Apéndices

Apéndice 1. Matriz experimental de moldeo de cilindros en el laboratorio

Apéndice 2. Datos de compresión uniaxial y tensión diametral de cilindros

Apéndice 3. Resultados de módulo de ruptura en vigas

Apéndice 4. Datos de pruebas de permeabilidad

Apéndice 5. Puntos del levantamiento topográfico

Apéndice 1. Matriz experimental de moldeo de cilindros en el laboratorio

Diseño	A												B											
Relación A/C Energía de compactación	A/C 1				A/C 2				A/C 3				A/C 1			A/C 2			A/C 3					
Edad (días)	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28						
1	6	6	6	1	6	6	6	1	6	6	6	1	6	6	6	1	6	6	6	1	6	6	6	1
2	6	6	6	1	6	6	6	1	6	6	6	1	6	6	6	1	6	6	6	1	6	6	6	1
Total= 228																								

Apéndice 2. Datos de compresión uniaxial y tensión diametral de cilindros

A A/C1 C1

Falla a compresión a 8 días		
1	13,12	MPa
2	12,08	MPa
3	12,39	MPa
Promedio	12,53	MPa
Coefficiente de variación	4,26%	

Tensión diametral a 7 días		
1	1,20	MPa
2	1,14	MPa
3	1,24	MPa
Promedio	1,19	MPa
Coefficiente de variación	4,65%	

Falla a compresión a 14 días		
1	15,96	MPa
2	14,53	MPa
3	14,83	MPa
Promedio	15,11	MPa
Coefficiente de variación	4,99%	

Tensión diametral a 14 días		
1	1,35	MPa
2	1,32	MPa
3	1,40	MPa
Promedio	1,36	MPa
Coefficiente de variación	2,86%	

Falla a compresión a 28 días		
1	17,91	MPa
2	18,23	MPa
3	18,33	MPa
Promedio	18,16	MPa
Coefficiente de variación	1,21%	

Tensión diametral a 28 días		
1	1,58	MPa
2	1,42	MPa
3	1,52	MPa
Promedio	1,51	MPa
Coefficiente de variación	5,25%	

A A/C1 C2

Falla a compresión a 7 días		
1	14,26	MPa
2	14,67	MPa
3	13,78	MPa

Tensión diametral a 7 días		
1	1,28	MPa
2	1,25	MPa
3	1,30	MPa

Promedio	14,24	MPa
Coeficiente de variación	3,13%	

Promedio	1,28	MPa
Coeficiente de variación	2,08%	

Falla a compresión a 14 días		
1	16,8	MPa
2	17,07	MPa
3	16,77	MPa
Promedio	16,88	MPa
Coeficiente de variación	0,98%	

Tensión diametral a 14 días		
1	1,37	MPa
2	1,41	MPa
3	1,44	MPa
Promedio	1,40	MPa
Coeficiente de variación	2,51%	

Falla a compresión a 28 días		
1	19,04	MPa
2	19,57	MPa
3	19,73	MPa
Promedio	19,45	MPa
Coeficiente de variación	1,86%	

Tensión diametral a 28 días		
1	1,53	MPa
2	1,56	MPa
3	1,63	MPa
Promedio	1,57	MPa
Coeficiente de variación	3,46%	

A A/C2 C1

Falla a compresión a 7 días		
1	10,87	MPa
2	11,08	MPa
3	10,08	MPa
Promedio	10,68	MPa
Coeficiente de variación	4,94%	

Tensión diametral a 7 días		
1	1,07	MPa
2	1,08	MPa
3	1,17	MPa
Promedio	1,10	MPa
Coeficiente de variación	4,90%	

Falla a compresión a 14 días		
1	13	MPa
2	13,87	MPa
3	12,64	MPa
Promedio	13,17	MPa
Coeficiente de variación	4,80%	

Tensión diametral a 14 días		
1	1,18	MPa
2	1,22	MPa
3	1,28	MPa
Promedio	1,23	MPa
Coeficiente de variación	4,40%	

Falla a compresión a 28 días		
1	14,5	MPa
2	14,88	MPa

Tensión diametral a 28 días		
1	1,40	MPa
2	1,48	MPa

3	14,11	MPa	3	1,35	MPa
Promedio	14,50	MPa	Promedio	1,41	MPa
Coefficiente de variación	2,66%		Coefficiente de variación	4,56%	

A A/C2 C2

Falla a compresión a 7 días			Tensión diametral a 7 días		
1	11,81	MPa	1	1,20	MPa
2	11,28	MPa	2	1,34	MPa
3	12,03	MPa	3	1,18	MPa
Promedio	11,71	MPa	Promedio	1,24	MPa
Coefficiente de variación	3,29%		Coefficiente de variación	6,92%	

Falla a compresión a 14 días			Tensión diametral a 14 días		
1	14,35	MPa	1	1,40	MPa
2	13,67	MPa	2	1,27	MPa
3	14,05	MPa	3	1,30	MPa
Promedio	14,02	MPa	Promedio	1,32	MPa
Coefficiente de variación	2,43%		Coefficiente de variación	5,12%	

Falla a compresión a 28 días			Tensión diametral a 28 días		
1	15,92	MPa	1	1,51	MPa
2	16,08	MPa	2*	1,38	MPa
3	15,72	MPa	3*	1,29	MPa
Promedio	15,91	MPa	Promedio	1,39	MPa
Coefficiente de variación	1,13%		Coefficiente de variación	7,59%	

A A/C3 C1

Falla a compresión a 7 días			Tensión diametral a 7 días		
1	11,2	MPa	1	1,18	MPa
2	12,05	MPa	2	1,11	MPa
3	11,68	MPa	3	1,26	MPa
Promedio	11,64	MPa	Promedio	1,18	MPa
Coefficiente de variación	3,66%		Coefficiente de variación	6,51%	

Falla a compresión a 14 días		
1	13,58	MPa
2	13,69	MPa
3	13,83	MPa
Promedio	13,70	MPa
Coefficiente de variación	0,91%	

Tensión diametral a 14 días		
1	1,22	MPa
2	1,35	MPa
3	1,28	MPa
Promedio	1,28	MPa
Coefficiente de variación	4,92%	

Falla a compresión a 28 días		
1	15,74	MPa
2	16,01	MPa
3	16,32	MPa
Promedio	16,02	MPa
Coefficiente de variación	1,81%	

Tensión diametral a 28 días		
1	1,40	MPa
2	1,42	MPa
3	1,48	MPa
Promedio	1,43	MPa
Coefficiente de variación	3,01%	

A A/C3 C2

Falla a compresión a 8 días		
1	11,82	MPa
2	12,17	MPa
3	12,48	MPa
Promedio	12,16	MPa
Coefficiente de variación	2,72%	

Tensión diametral a 7 días		
1	1,19	MPa
2	1,14	MPa
3	1,18	MPa
Promedio	1,17	MPa
Coefficiente de variación	2,53%	

Falla a compresión a 14 días		
1	13,74	MPa
2	14,23	MPa
3	13,22	MPa
Promedio	13,73	MPa
Coefficiente de variación	3,68%	

Tensión diametral a 14 días		
1	1,29	MPa
2	1,34	MPa
3	1,37	MPa
Promedio	1,33	MPa
Coefficiente de variación	2,90%	

Falla a compresión a 28 días		
1	16,89	MPa
2	17,42	MPa
3	16,65	MPa
Promedio	16,99	MPa

Tensión diametral a 28 días		
1	1,48	MPa
2	1,47	MPa
3	1,45	MPa
Promedio	1,47	MPa

Coefficiente de variación	2,32%	Coefficiente de variación	1,21%
----------------------------------	-------	----------------------------------	-------

B A/C1 C1

Falla a compresión a 7 días			Tensión diametral a 7 días		
1	10,67	MPa	1	1,13	MPa
2	10,89	MPa	2	1,08	MPa
3	9,94	MPa	3	1,04	MPa
Promedio	10,50	MPa	Promedio	1,08	MPa
Coefficiente de variación	4,74%		Coefficiente de variación	3,85%	

Falla a compresión a 14 días			Tensión diametral a 14 días		
1	11,34	MPa	1	1,27	MPa
2	12,33	MPa	2	1,21	MPa
3	11,66	MPa	3	1,17	MPa
Promedio	11,78	MPa	Promedio	1,22	MPa
Coefficiente de variación	4,29%		Coefficiente de variación	4,48%	

Falla a compresión a 28 días			Tensión diametral a 28 días		
1	13,05	MPa	1	1,28	MPa
2	12,75	MPa	2	1,26	MPa
3	13,16	MPa	3	1,34	MPa
Promedio	12,99	MPa	Promedio	1,29	MPa
Coefficiente de variación	1,63%		Coefficiente de variación	3,23%	

B A/C1 C2

Falla a compresión a 7 días			Tensión diametral a 7 días		
1	9,8	MPa	1	1,14	MPa
2	10,11	MPa	2	1,10	MPa
3	10,06	MPa	3	1,06	MPa
Promedio	9,99	MPa	Promedio	1,10	MPa
Coefficiente de variación	1,67%		Coefficiente de variación	3,72%	

Falla a compresión a 14 días		Tensión diametral a 14 días	
-------------------------------------	--	------------------------------------	--

1	11,75	MPa
2	12,15	MPa
3	11,32	MPa
Promedio	11,74	MPa
Coefficiente de variación	3,54%	

1	1,30	MPa
2	1,20	MPa
3	1,27	MPa
Promedio	1,25	MPa
Coefficiente de variación	4,21%	

Falla a compresión a 28 días		
1	13,23	MPa
2	13,02	MPa
3	13,15	MPa
Promedio	13,13	MPa
Coefficiente de variación	0,81%	

Tensión diametral a 28 días		
1	1,35	MPa
2	1,31	MPa
3	1,37	MPa
Promedio	1,34	MPa
Coefficiente de variación	2,03%	

B A/C2 C1

Falla a compresión a 7 días		
1	10,31	MPa
2	9,75	MPa
3	10,01	MPa
Promedio	10,02	MPa
Coefficiente de variación	2,80%	

Tensión diametral a 7 días		
1	0,96	MPa
2	1,01	MPa
3	1,06	MPa
Promedio	1,01	MPa
Coefficiente de variación	4,73%	

Falla a compresión a 15 días		
1	11,66	MPa
2	12,07	MPa
3	11,37	MPa
Promedio	11,70	MPa
Coefficiente de variación	3,01%	

Tensión diametral a 14 días		
1	1,16	MPa
2	1,20	MPa
3	1,25	MPa
Promedio	1,20	MPa
Coefficiente de variación	3,65%	

Falla a compresión a 28 días		
1	13,24	MPa
2	13,39	MPa
3	12,96	MPa
Promedio	13,20	MPa
Coefficiente de variación	1,65%	

Tensión diametral a 28 días		
1	1,29	MPa
2	1,27	MPa
3	1,23	MPa
Promedio	1,27	MPa
Coefficiente de variación	2,57%	

B A/C2 C2

Falla a compresión a 7 días		
1	10,19	MPa
2	10,76	MPa
3	10,4	MPa
Promedio	10,45	MPa
Coefficiente de variación	2,76%	

Tensión diametral a 7 días		
1	0,96	MPa
2	1,08	MPa
3	1,05	MPa
Promedio	1,03	MPa
Coefficiente de variación	6,14%	

Falla a compresión a 15 días		
1	12,48	MPa
2	12,17	MPa
3	11,94	MPa
Promedio	12,20	MPa
Coefficiente de variación	2,22%	

Tensión diametral a 15 días		
1	1,17	MPa
2	1,21	MPa
3	1,13	MPa
Promedio	1,17	MPa
Coefficiente de variación	3,62%	

Falla a compresión a 28 días		
1	14,11	MPa
2	13,04	MPa
3	13,94	MPa
Promedio	13,70	MPa
Coefficiente de variación	4,20%	

Tensión diametral a 28 días		
1	1,37	MPa
2	1,33	MPa
3	1,33	MPa
Promedio	1,35	MPa
Coefficiente de variación	1,87%	

B A/C3 C1

Falla a compresión a 7 días		
1	10,84	MPa
2	10,37	MPa
3	10,03	MPa
Promedio	10,41	MPa
Coefficiente de variación	3,91%	

Tensión diametral a 7 días		
1	0,97	MPa
2	1,02	MPa
3	1,04	MPa
Promedio	1,01	MPa
Coefficiente de variación	3,77%	

Falla a compresión a 14 días		
1	12,11	MPa
2	12,68	MPa

Tensión diametral a 14 días		
1	1,24	MPa
2	1,13	MPa

3	12,42	MPa
Promedio	12,40	MPa
Coefficiente de variación	2,30%	

3	1,21	MPa
Promedio	1,19	MPa
Coefficiente de variación	4,67%	

Falla a compresión a 28 días		
1	13,39	MPa
2	13,67	MPa
3	13,04	MPa
Promedio	13,37	MPa
Coefficiente de variación	2,36%	

Tensión diametral a 28 días		
1	1,39	MPa
2	1,36	MPa
3	1,31	MPa
Promedio	1,36	MPa
Coefficiente de variación	3,15%	

B A/C3 C2

Falla a compresión a 7 días		
1	10,76	MPa
2	9,45	MPa
3	10,75	MPa
Promedio	10,32	MPa
Coefficiente de variación	7,30%	

Tensión diametral a 7 días		
1	1,02	MPa
2	1,11	MPa
3	1,10	MPa
Promedio	1,07	MPa
Coefficiente de variación	4,52%	

Falla a compresión a 14 días		
1	11,87	MPa
2	12,62	MPa
3	12,83	MPa
Promedio	12,44	MPa
Coefficiente de variación	4,06%	

Falla a compresión a 14 días		
1	1,23	MPa
2	1,17	MPa
3	1,25	MPa
Promedio	1,21	MPa
Coefficiente de variación	3,08%	

Falla a compresión a 28 días		
1	13,67	MPa
2	13,23	MPa
3	13,03	MPa
Promedio	13,31	MPa
Coefficiente de variación	2,46%	

Tensión diametral a 28 días		
1	1,39	MPa
2	1,33	MPa
3	1,28	MPa
Promedio	1,33	MPa
Coefficiente de variación	4,11%	

Apéndice 3. Resultados de módulo de ruptura en vigas

Falla a 7 días diseño B A/C2 C1

Viga 1		
P=	15,504	kN
L=	450	mm
b=	155	mm
d=	155	mm

Falla en tercio medio

R=	1,87	MPa
----	------	-----

Viga 2		
P=	14,097	kN
L=	450	mm
b=	155	mm
d=	155	mm

Falla en tercio medio

R=	1,70	MPa
----	------	-----

Falla a 14 días diseño B A/C2 C1

Viga 1		
P=	21,302	kN
L=	450	mm
b=	155	mm
d=	155	mm

Falla en tercio medio

R=	2,57	MPa
----	------	-----

Viga 2		
P=	17,986	kN
L=	450	mm
b=	155	mm
d=	155	mm

Falla en tercio medio

R=	2,17	MPa
----	------	-----

Falla a 28 días diseño B A/C2 C1

Viga 1		
P=	21,991	kN
L=	450	mm
b=	155	mm
d=	155	mm

Falla en tercio medio

R=	2,66	MPa
----	------	-----

Viga 2		
P=	22,595	kN
L=	450	mm
b=	155	mm
d=	155	mm

Falla en tercio medio

R=	2,73	MPa
----	------	-----

Apéndice 4. Datos de pruebas de permeabilidad

Código	Tiempo de prueba (s)	Promedio (s)
A A/C 1 C1	16,9	16,90
	16,9	
	16,9	
A A/C1 C2	17,7	17,67
	17,6	
	17,7	
A A/C2 C1	17,6	17,63
	17,6	
	17,7	
A A/C2 C2	19	18,97
	18,9	
	19	
A A/C3 C1	17,3	17,30
	17,3	
	17,3	
A A/C3 C2	18,6	18,60
	18,6	
	18,6	
B A/C2 C1	15,6	15,70
	15,8	
	15,7	
B A/C2 C2	15,2	15,17
	15,2	
	15,1	
B A/C3 C1	15,4	15,37
	15,4	
	15,3	
B A/C3 C2	15,6	15,60
	15,6	
	15,6	
B A/C1 C1	15,4	15,43
	15,4	
	15,5	
B A/C1 C2	16	16,07
	16,1	
	16,1	

Apéndice 5. Puntos del levantamiento topográfico

Punto	N	E	Z
P1	108,644	102,039	100,266
P2	109,87	99,811	100,221
P3	110,436	98,337	100,209
P4	111,673	97,97	100,213
P5	113,915	93,429	100,431
P6	100,116	96,86	99,92
P7	102,033	92,832	100,167
P8	104,896	88,158	100,278
P9	93,371	93,109	99,611
P10	96,271	89,317	99,976
P11	98,654	85,053	100,186
P12	84,702	82,897	98,969
P13	83,115	81,401	98,046
P14	81,708	83,912	98,253
P15	86,771	89,086	99,478

Anexos



Technical specifications

WP 1550A*	
Operating data	
Operating weight kg	86
Centrifugal force kN	15
Base plate size (w x l) mm	500 x 585
Operating width mm	500
Height Lowest working mm	510
Operating height mm	965
Frequency Hz	100
Advance travel m/min	30
Surface capacity m ² /h	905
Engine	
Engine	air-cooled, 4 cycle, single cylinder, gasoline engine
Engine	Honda
Displacement cm ³	163
Engine performance kW	4.1
at rpm	3,9
Fuel consumption l/h	1.8
Tank capacity l	3.7
Power transmission	Power transmission from engine via centrifugal clutch and V-belt onto exciter which transmits centrifugal force onto baseplate.
*Water tank models available. Tank capacity 11 qt/10.5 l.	

Referencias bibliográficas

- American Concrete Insitute. (2013). *522.1-13 Specification for Pervious Concrete Pavement*.
- American Concrete Insitute Committee 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*.
- American Concrete Institute Committee 522. (2010). *522R-10 Report on Pervious Concrete*. Farmington Hills, MI.
- American Society for Testing and Materials. (2009). *C1701: Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*.
- American Society for Testing and Materials. (2011). *C-496: Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete*.
- American Society for Testing and Materials. (2012). *C1754: Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete*.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *C1688: Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *C29: Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *C39: Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- American Society for Testing Materials. (2012). *D1557: Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*.
- American Society for Testing Materials. (2015). *C31: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*.
- American Society for Testing Materials. (2015). *C78: Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.
- Fernández Arrieta, R. J. (2008). *Concreto Permeable: Diseño de mezclas Para Evaluar su Resitencia a la Compresión Uniaxial y su Permeabilidad*. Informe de trabajo de graduación. Escuela de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. San José.
- Georgia Concrete and Products Association. (2004). *Recommended Specifications for Portland Cement Pervious Pavement*. Tucker Georgia.
- Ghafoori, N., & Dutta, S. (1995). *Development of No-Fines Concrete Pavement Applications*. American Society of Civil Engineers.
- Hein, D. K., & Schaus, L. (2013). *Permeable Pavement Design and Construction. What Have We Learned Recently?* Toronto, ON, Canada.

- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2015). *Construcción. Cemento Hidráulico. Especificaciones y Requisitos*. INTECO.
- Kauffman, R. C. (n.d.). *Presentacion del curso de Concreto CO3403*.
- Kevern, J. T. (2015). *Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete*. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 43, No. 3, 2015, pp. 544–553.
- Kresge, P. (2010). *Designing and Specifying Pervious Concrete*. National Ready Mixed Concrete Association.
- Lee, M.-G., Huang, Y.-S., Chang, T.-K., & Pao, C.-H. (2011). *Experimental Study of Pervious Concrete Pavement*. Taiwan, China: American Society of Civil Engineers.
- Legret, M., & Colandini, V. (1999). *Effects of a Porous Pavement with Reservoir Structure on Runoff Water: Water Quality and Fate of Heavy Metals*.
- Montes, F., & Haselbach, L. (2006). *Measuring Hydraulic Conductivity*. *Environ. Eng. Sci.*, Vol 23 No. 6, p. 960-969.
- Mulligan, A. M. (2005). *Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems*. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Department of Civil Engineering in the College of Engineering at the University of Central Florida Orlando, Florida.
- Neithalath, N., Weiss, J., & Olek, J. (2006). *Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements*.
- Obla, K. H. (2007). *Pervious Concrete for Sustainable Development*. Silver Spring, Maryland, USA.
- Paine, J. (1992). *Portland Cement Pervious Pavement Construction*.
- Suleiman, M. T., Kevern, J., Schaefer, V. R., & Wang, K. (2006). *Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties*. Iowa, USA: Iowa State University.
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Portland Cement Association.
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). *Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials*.

