

Análisis de variables de entrada alternativas para método de dosificación de hormigones drenantes propuesto por ACI.

Analysis of alternative input variables for the pervious concrete mix design method proposed by ACI.

Presentación: 11/09/2023

Fernando Fogliatti

Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional, Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina.

fernandofogliatti@gmail.com

Santiago Noguera Vivas

Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional, Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina.

santiago_noguera98@hotmail.com

Rocío Goddio

Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional, Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina.

rociogoddio@gmail.com

Resumen

En la actualidad el hormigón drenante tiene una aplicación amplia, debido a su capacidad para permitir la filtración de agua a través de su estructura porosa y una adecuada resistencia mecánica. La determinación de las proporciones de los materiales que se ven involucrados se puede realizar por distintos métodos, uno de los más difundidos es el propuesto por el American Concrete Institute (ACI), que parte del contenido de vacíos para la adopción del volumen de pasta, sin considerar como variables directas las propiedades del hormigón tales como la resistencia mecánica y la permeabilidad. Este artículo propone una metodología alternativa que permita establecer una relación directa con las propiedades más relevantes para función que deba desempeñar el hormigón drenante. Se estudiaron correlaciones entre el contenido de pasta, el contenido de vacíos, la permeabilidad y la resistencia a compresión a partir de mezclas diseñadas con el método ACI.

Palabras clave: hormigón drenante, método de dosificación, propiedades.

Abstract

Currently, pervious concrete has a wide application, due to its ability to allow water filtration through its porous structure and adequate mechanical resistance. The determination of mix proportions can be carried out by different methods, one of the most widespread is that proposed by the American Concrete Institute (ACI), which adopts volume past as a function of void content, without considering concrete properties such as mechanical resistance and permeability as direct variables. This article proposes an alternative methodology that allows establishing a direct relationship with the most relevant properties for the function that pervious concrete must perform. Correlations between paste content, void content, permeability and compressive strength were studied from mixtures designed with the ACI method.

Keywords: Pervious Concrete, mix design method, properties.

Introducción

El hormigón drenante se describe como un material formado por agregado grueso de granulometría uniforme, cemento portland, agua y aditivos, prescindiéndose de la incorporación de arena para alcanzar valores de porcentaje de vacíos de entre 15 % y 35 % (Kováč, M. et al, 2018), manteniendo magnitudes de resistencia a la compresión de entre 3,5 MPa y 28 MPa (ACI Committee 522, 2010). Su estructura se basa en la unión entre los agregados que se logra generando puntos de contacto entre las partículas recubiertas de pasta de cemento mediante una adecuada compactación. Es necesario, además, una pasta de alta viscosidad para recubrir los agregados, y al mismo, tiempo impedir el escurrimiento a través de ellos (Sakthivel D. et al, 2019), que logre también una estructura de poros correcta.

Por lo tanto, la pasta de cemento debe poseer una baja relación agua-cemento (a/c), 0,25 a 0,40 (ACI Committee 522, 2010) y un correcto mezclado, con la posibilidad de incorporar aditivos reductores de agua de alto rango (Kováč, M. et al, 2018). Dicha pasta debe presentarse en una cantidad reducida, lo que garantiza que la mezcla de hormigón drenante tenga prácticamente un asentamiento nulo, situación que caracteriza a este tipo de hormigones. Estas particularidades permiten alcanzar una cantidad suficiente de poros interconectados para lograr una rápida infiltración del agua a través del material.

Entre los usos que se le da a este material, puede mencionarse su aplicación en el control de caudales de escurrimiento superficial y en la recarga de reservorios de agua, o acuíferos, mediante la construcción de pavimentos permeables, permitiendo reducir el área impermeabilizada (Castro, 2011). Otros usos se encuentran en la construcción de reservorios para excedentes pluviales, los cuales permiten regular los caudales vertidos, solados permeables, aceras, barreras acústicas, etc. (Aguirre et al., 2022; Miraglio et al., 2021).

Existen varios métodos de diseño para hormigones drenantes, que se basan en diferentes premisas de cálculo e hipótesis propuestas, entre ellos pueden mencionarse el planteado por el American Concrete Institute (ACI) en su informe ACI 522R-10 (ACI Committee 522, 2010), un método modificado propuesto por Nguyen (Nguyen et al, 2014), y el presentado por Castro (Solminihac et al, 2007; Castro et al, 2009), para mezclas de hormigón poroso en pavimentos urbanos permeables. Entre estos el enfoque propuesto por la ACI se encuentra muy difundido y ha ganado una amplia aceptación y uso, razón por la cual, en el contexto de este informe, se realizará un análisis detallado de sus parámetros de diseño.

Para el empleo de este método de dosificación se debe contar con tres parámetros de entrada, relacionados con propiedades inherentes a las características de los materiales a utilizar: porcentaje de finos, contenido de vacíos y relación agua/cemento, obteniéndose como variables de salida las cantidades requeridas de los materiales en la mezcla (Figura 1) y determinando una resistencia a compresión esperada de manera indirecta, ya se relaciona con el contenido de vacíos presente en la dosificación. Se presentan entonces, en el método, dos caminos independientes para determinar las cantidades de los materiales. Uno a partir de la relación entre el contenido de vacíos y el volumen de pasta, establecido según el nivel de compactación que se le proporcione

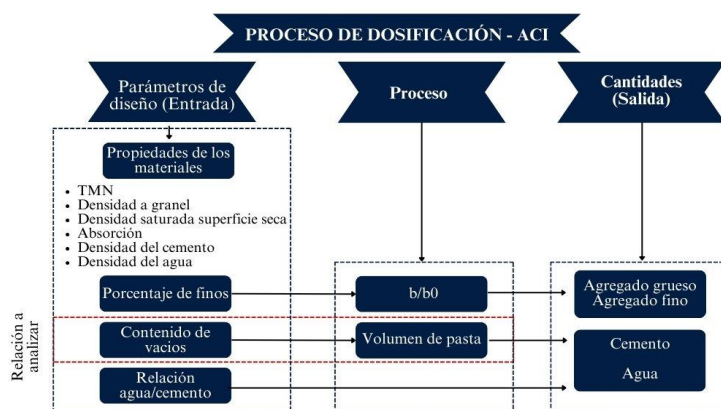


Figura 1 - Proceso de dosificación de la ACI

a la mezcla y otro a partir del coeficiente b/b_0 , asociado únicamente al porcentaje de finos y el tamaño máximo nominal del agregado grueso, donde b : Volumen sólido de agregado grueso en una unidad de volumen de hormigón; b_0 : Volumen sólido de agregado en una unidad de volumen de agregado grueso, este parámetro se utiliza para afectar el peso unitario volumétrico (PUV) del agregado grueso, el cual compensa automáticamente los efectos de las diferencias en la forma del agregado, su graduación y peso específico (ACI Committee 522, 2010). Sin embargo, se ha demostrado que existe una relación directa entre el volumen de pasta y el distanciamiento entre los agregados, medido a través del factor b/b_0 . (Fogliatti et al., 2023).

El uso de este enfoque al determinar cantidades de los materiales presenta limitaciones relacionadas al alcance y a la falta de consideración de factores que pueden modificar los resultados. Nuevas aplicaciones requieren poner atención a propiedades como la resistencia mecánica y permeabilidad, por lo que las variables de entrada que emplea la ACI para realizar la dosificación resultan acotadas. En el presente informe, se propone abordar las principales restricciones identificadas, correlacionando las propiedades más relevantes, de modo de poder utilizar el proceso de dosificación con variables de entrada diferentes, que permitan encontrar soluciones para diseñar mezclas de hormigón drenante adaptadas de manera óptima a las aplicaciones y necesidades, superando las limitaciones de los métodos tradicionales y promoviendo su versatilidad y eficacia.

Metodología

En la práctica se llevaron a cabo nueve dosificaciones, manteniendo constante la relación agua cemento (a/c) en un valor de 35 %. Se trabajó con tres contenidos de pasta diferente, de 15, 20 y 25 %, en los cuales se ejecutaron tres dosificaciones distintas para cada uno, variando la proporción de finos entre 12, 14 y 16 %, en estas dosificaciones los materiales utilizados fueron: agregado grueso y fino, cemento, agua potable y aditivos químicos. Específicamente, se utilizó piedra granítica 3-9mm, arena de río, cemento portland compuesto CPC-40 (según IRAM 50000) y agua potable de red, que cumpliera con los requisitos de la norma IRAM 1601. Cabe destacar que en ninguna dosificación se optó por el uso de aditivo químico. Por cada mezcla se elaboraron cinco probetas cilíndricas, tres de ellas fueron ensayadas a compresión simple y dos a permeabilidad. Las probetas poseían dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto y se compactaron en 3 capas de 10 golpes proporcionando una energía total de 142.85 kJ/m^3 mediante pisón chico, similar al del ensayo Proctor Estándar. Todas se desmoldaron a las 24 h y se mantuvieron en curado en una pileta de agua con cal a temperatura de $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta la edad de cada ensayo. El contenido de vacíos accesibles al agua (porosidad) y la densidad seca se determinaron con el método de la balanza hidrostática. Dicha porosidad describe la proporción total de vacíos por la cual el agua puede circular (Torres et al., 2015; Fogliatti et al., 2023). Es una propiedad importante para evaluar el comportamiento hidrológico y otras características del material. Por otro lado, para la permeabilidad se utilizó el método propuesto por Neithalath et al. basado en un permeámetro de carga variable (Neithalath et al., 2003). Para obtener la resistencia a compresión a 28 días se siguió el procedimiento de la norma IRAM 1546 y se emplearon placas de elastómero no adheridas (IRAM 1709).

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1. El contenido de vacíos de diseño se representa en un entorno establecido por ACI 522R-10, en función de la Figura 6.3 “Relationship between paste and void content for No. 8 aggregate size designations” (ACI Committee 522, 2010), y cuyos datos se incluyeron en la Figura 2, a través del cual se determina el volumen de pasta que permitiría una correcta unión entre los agregados y que se relaciona indirectamente con las otras propiedades de los hormigones.

Dosificación	Volumen de pasta (%)	Contenido de vacíos de diseño (%)	Porcentaje de finos (%)	Resistencia a compresión 28 d (MPa)	Densidad seca (kg/m^3)	Contenido de vacíos (%)	Contenido de vacíos teórico (%)	Permeabilidad (cm/s)
A	15	20-28	12	4.60	1838	30.10	30.00	1.21
B	15	20-28	14	5.20	1823	34.10	30.10	1.15
C	15	20-28	16	8.60	1900	29.90	30.10	0.92
D	20	15-23	12	8.70	1926	25.80	25.10	0.63
E	20	15-23	14	9.60	1934	24.80	25.20	0.87
F	20	15-23	16	20.40	1982	25.90	25.30	0.60
G	25	10-17	12	14.90	1892	21.20	20.20	0.68
H	25	10-17	14	18.20	1936	20.30	20.30	0.47

I 25 10-17 16 22.70 2086 20.40 20.50 0.34

Tabla 1 – Resultados de ensayos obtenidos en cada moldeo.

En las Figuras 2, 3 y 4 se graficaron las relaciones entre el contenido de vacíos, la permeabilidad y la resistencia a compresión a 28 días, de las mezclas elaboradas, con el contenido de pasta empleado, diferenciándolas por el porcentaje de finos presente en cada una. En estas relaciones, se determinaron las funciones de tendencia lineal que mejor se ajustan a los valores experimentales, según el porcentaje de finos adoptado.

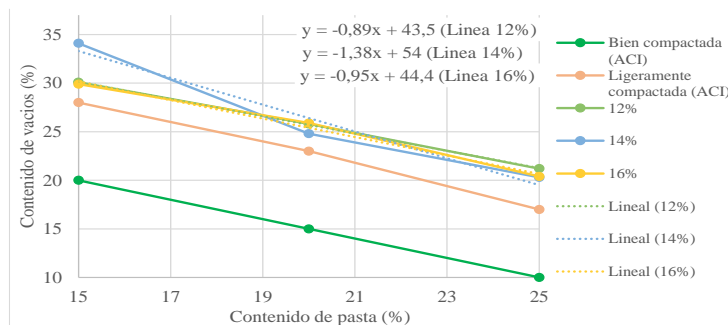


Figura 2 – Contenido de Vacíos Vs. Contenido de Pasta – a/c=35%

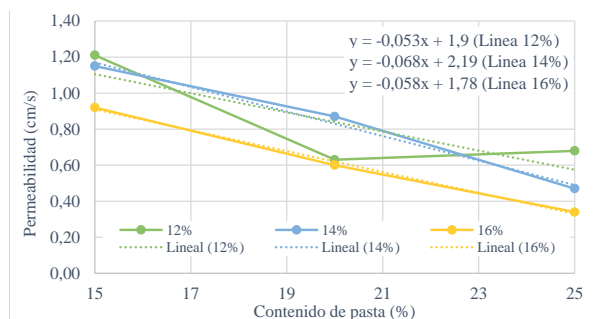


Figura 3 – Permeabilidad Vs. Contenido de Pasta – a/c= 35%

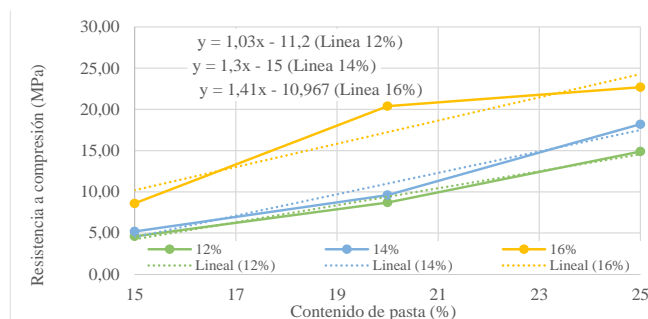


Figura 4 – Resistencia a compresión Vs. Contenido de Pasta – a/c=35%

De la Figura 2 se pudo observar que, al aumentar el volumen de pasta, el contenido de vacíos disminuye, sin apreciarse una diferencia notable al variar el contenido de finos. En este sentido, si bien el método de la ACI no tiene en cuenta su efecto, la contribución de este parámetro no influye notablemente en el volumen de pasta.

Por otro lado, en la práctica se observó que la energía de compactación suministrada mediante equipos con dimensiones y pesos estandarizados fue la adecuada, ya que se apreciaron golpes "secos" del pisón al ejecutar los últimos impactos, lo cual podría sugerir que no se logra una mayor reorganización de los agregados en caso de que se quiera aumentar la energía. Valores superiores, además, condujeron a la rotura del agregado grueso, motivo por el cual se adoptó como límite superior el trabajado de 142.85 kJ/m³. A pesar de estas verificaciones, el volumen de vacíos real, obtenido en los ensayos de cada moldeo, se ubicó ligeramente por encima de la curva de "poca compactación" propuesta por la ACI, la cual se reproduce en la Figura 2.

Analizando la Figura 3, la permeabilidad resultó mayor para contenidos de finos menores y con una tendencia decreciente al aumentar el contenido de pasta. Por otro lado, en la resistencia a compresión se observó el comportamiento opuesto, para mayor porcentaje de finos la resistencia a compresión aumentó al igual que lo hace aumentando el volumen de pasta (Figura 4).

Al comparar los resultados obtenidos para las diferentes variables, resultó evidente que al limitar el diseño a una sola de ellas se restringía la optimización de los parámetros que finalmente se obtendrán. Dado los diversos usos posibles del hormigón drenante, algunas características podrían adquirir mayor relevancia que otras. Por lo tanto, resulta de gran importancia establecer

métodos de dosificación que no dependan exclusivamente del contenido de vacíos, sino más bien, se basen en los requisitos específicos de la mezcla, brindando la posibilidad de elegir variables como resistencia, permeabilidad y contenido de vacíos en función del parámetro que rijan la utilización del material.

Buscando representar todos los resultados en una misma figura que permita la elección de variables según la conveniencia antes mencionada, se presentan en la Tabla 2 los parámetros de las ecuaciones de las líneas de tendencia para cada contenido de finos, obtenidas en las Figuras 2, 3 y 4 correspondientes a cada propiedad medida. Las pendientes obtenidas demostraron similitudes. Por lo tanto, para lograr una estimación conjunta de cada propiedad, se calculó el promedio de estas, obteniéndose una pendiente media. Luego, al emplear la ecuación [1] para determinar la ordenada al origen, se obtuvieron las funciones que engloban los resultados para cada propiedad, donde \bar{x} representa el promedio de contenidos de pasta e \bar{y} es el promedio de los resultados obtenidos en la Tabla 1, para cada propiedad medida, manteniendo constante el porcentaje de finos.

$$\text{Ord. Corregida} = \bar{y} + \text{Pte. media} \cdot \bar{x} \quad [1]$$

Propiedad	Línea de tendencia	Porcentaje de finos			Parámetros corregidos	Porcentaje de finos		
		12	14	16		12	14	16
Contenido de vacíos (%)	Pendiente	-0.89	-1.38	-0.95	Pte. media	-1.07		
	Ord. al origen	43.50	54.00	44.40	Ord. corregida	47.17	47.87	46.87
Permeabilidad (cm/s)	Pendiente	-0.05	-0.07	-0.06	Pte. media	-0.06		
	Ord. al origen	1.90	2.19	1.78	Ord. corregida	2.03	2.02	1.81
Resistencia a compresión 28 d (MPa)	Pendiente	1.03	1.30	1.41	Pte. media	1.25		
	Ord. al origen	-11.20	-15.00	-10.97	Ord. corregida	-15.53	-13.93	-7.70

Tabla 2 – Resumen de parámetros de líneas de tendencia que mejor se ajustan a los valores experimentales.

Para lograr el objetivo de correlacionar las funciones obtenidas, resultó conveniente realizar un gráfico de triple entrada, plasmado en la Figura 5, donde pueda optarse por ingresar con el contenido de vacíos, la permeabilidad o la resistencia que desee obtenerse y de esta forma poder determinar el volumen de pasta requerido en la mezcla y las cantidades necesarias de cada material para la dosificación final. Debido a que las ecuaciones obtenidas representan funciones diferentes, se realizó una transformación algebraica lineal.

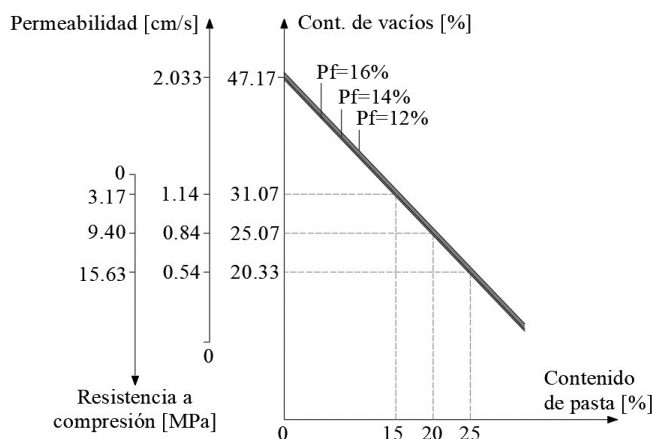


Figura 5 – Gráfico de triple entrada para determinación del contenido de pasta para aplicación en el método ACI.

A partir de estimaciones realizadas para el contenido de vacíos, la permeabilidad y la resistencia a compresión en función del contenido de pasta de las mezclas, y su comparación con los valores experimentales, fue posible determinar los errores que

las afectaban. Para el contenido de vacíos los errores se encuentran por debajo del 9 % para todos los volúmenes de pasta, pero para la permeabilidad y la resistencia a compresión crecen alcanzando el 30 % en algunos casos.

Conclusiones

En función de los resultados obtenidos se pudo concluir:

Si bien este trabajo experimental constituye una primera etapa de análisis, que deberá confirmarse para otros entornos de mezclas de hormigones drenantes, es posible establecer relaciones entre las propiedades más significativas que definen el comportamiento de los hormigones, tales como el contenido de vacíos, el porcentaje de finos y contenido de vacíos de la mezcla, permitiendo explorar las variables de dosificación para obtener el desempeño esperado.

Los errores que afectaron las estimaciones para los parámetros permeabilidad y resistencia a compresión, fueron considerables y deberán ser evaluados en relación con los propios errores experimentales que resultaron de su determinación. En cambio, los errores en el parámetro de contenido de vacíos no superaron el 9 % para los casos analizados.

A futuro se planea extender esta propuesta a otras dosificaciones que contemplen distintos tamaños de agregados y relaciones a/c.

Referencias

- ACI Committee 522, (2010). Report on Pervious Concrete, ACI 522R-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, pp. 1-38
- Aguirre, D.D., Argento, R.S., y Carrasco, M.F. (2022a). Hormigones Drenantes como Retardadores de Excedentes Pluviales. *IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica de la AATH* (pp. 511-519). Buenos Aires, Argentina, 31 de octubre al 4 de noviembre.
- Castro J., Solminihac, H. de, Videla C., Fernández B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón, *Revista Ingeniería de Construcción*, 24, 3, 271-284.
- Castro Espinosa, M. L. (2011). *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano* (Tesis de grado, Ingeniería Civil). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá Colombia.
- Fogliatti, F. L., Carrasco, M. F., Beltramini, L. B., Defagot, C. A., & Grether, R. O. (2023). Efecto del contenido pasta y agregados finos sobre las propiedades del hormigón drenante. *Revista Tecnología Y Ciencia*, 46, 18–40. Disponible en: <<https://doi.org/10.33414/rtyc.46.18-40.2023>>
- Kováč, M.; Sičáková, A. (2018). “Pervious Concrete as an Environmental Solution for Pavements: Focus on Key Properties”, *Environments*, 5(1), 11. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/environments5010011>>
- Miraglio, M.E., Aguirre, D.D., Fogliatti, F. (2021). Uso del hormigón drenante como alternativa a los sistemas de regulación pluvial convencionales. *JIT 2021: Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos* (pp. 243-247). Santa Fe, Argentina, 6 y 7 de octubre.
- Neithalath, N., Weiss, W. J., Olek, J. (2003). “Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials. Final Report”. The Institute for Safe, Quiet and Durable Highways, 179 pp.
- Nguyen D.H., Sebaibi N., Boutouil M., Leleyter L., Baraud F. (2014). “A modified method for the design of pervious concrete mix”. *Construction and Building Materials*, 73, 271-282.
- Sakthivel D., Rashi Puri R., Suruthi K., Swetha S., Tinu A.V. (2019). “Environmental-Sustainable Solution of Pervious Concrete for Pavement”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 06, 03, 275-281.
- Solminihac H. de, Videla C., Fernández B., Castro J. (2007). Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables. *Revista Materiales de Construcción*, 57, 287, 23-36.

Torres, A., Hu, J., Ramos, A. (2015). “The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete”, *Construction and Building Materials*, 95, 850-859.