

Diseño de un módulo de hormigón permeable para la filtración de la escorrentía pluvial urbana.

Design of a pervious concrete module for the filtration of urban stormwater runoff.

Ignacio Corazza

Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI). Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Santa Fe.
icorazza@frsf.utn.edu.ar

Resumen

El presente proyecto busca diseñar módulos de hormigón permeable destinado a desagües pluviales de la ciudad de Santa Fe a fin de contribuir a purificar el agua de escorrentía pluvial. Esto se basa en su capacidad para retener agentes contaminantes del fluido que atraviesa su estructura interna, utilizándolo para purificar agua de lluvia antes de su ingreso al sistema de desagües urbanos. Estos módulos actuarían como filtros, mejorando la calidad del efluente, disminuyendo los residuos que obstruyen el sistema y contaminan el medioambiente. A partir de modelizaciones numéricas y de resultados de tomografías computadas, fue posible contrastar los requerimientos de diseño del módulo respecto de las características del hormigón permeable, considerándose es posible materializarlos y avanzar en etapas futuras sobre la evaluación de la capacidad de reducción de contaminantes del agua de escorrentía pluvial.

Palabras claves: hormigón permeable, filtración, purificación, drenaje pluvial.

Abstract

This project seeks to design permeable concrete modules for storm drains in the city of Santa Fe in order to contribute to purifying storm runoff water. This is based on its ability to retain contaminating agents from the fluid that passes through its internal structure, using it to purify rainwater before entering the urban drainage system. These modules would act as filters, improving the quality of the effluent, reducing the waste that clogs the system and contaminates the environment. Based on numerical modeling and computed tomography results, it was possible to contrast the design requirements of the module with respect to the characteristics of permeable concrete, considering it possible to materialize them and advance in future stages on the evaluation of the capacity to reduce water contaminants. of stormwater runoff.

Keywords: pervious concrete, filtration, purification, sewerage.

Introducción

El hormigón permeable presenta una estructura de poros interconectados que permiten el flujo de agua u otros líquidos a través de su estructura, como expone Klein, N. (2019) (Figura 1). Esta característica permite que sea utilizado en la gestión de excedentes pluviales, posibilitando el ingreso de los mismos al sistema de desagües y actuando como dispositivo de retención de contaminantes (Pilon et al., 2019). Esto tiene como principal objetivo mejorar las propiedades del agua erogada y disminuir el ingreso de residuos sólidos urbanos a la red de alcantarillado, evitando que estos sean depositados en los cursos naturales, reduciendo la probabilidad de obstrucciones y tareas de mantenimiento en la red, entre otros beneficios (Corazza, 2023).

La mejora de la calidad del agua será analizada a partir de la medición de parámetros específicos que caracterizan el grado de contaminación de los efluentes pluviales (EPA, 1999). Sobre estos, el hormigón permeable, tendría diferentes influencias, destacándose la gran eficiencia en la disminución de la demanda biológica y química de oxígeno. Este desempeño se ve

influenciado significativamente por el tamaño de la grava utilizada, lo que es atribuido a que con una mayor permeabilidad conforme aumenta el tamaño máximo nominal de agregado, se produce una mayor absorción y descomposición biológica a través del pavimento, producto de la actividad bacteriana originada por la adsorción de nutrientes en los poros del material (Faisal et al., 2020).

En función de estos objetivos y principios es que se diseñaron módulos de forma tal que puedan ser colocados en los ingresos al sistema de desagüe pluvial urbano existente en la Peatonal de la Ciudad de Santa Fe, los cuales deberán permitir el paso del caudal pico y resistir las sollicitaciones mecánicas a las que estarán sometidos, reemplazando las rejas metálicas utilizadas actualmente. Evaluando para esto diferentes dosificaciones ya analizadas por proyectos anteriores del CECIVI (Aguirre et al., 2022).

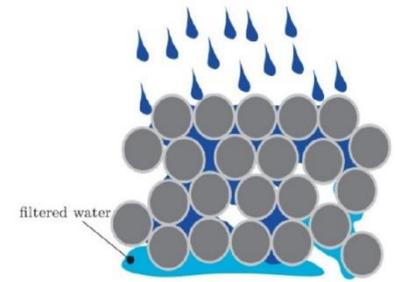


Figura 1 - Esquema hormigón permeable.
(Kováč et al. 2017).

Materiales y Métodos

En la ciudad de Santa Fe, se desarrolla en el sector céntrico un paseo peatonal que tiene un desarrollo de 11 cuadras y que posee en todo su trazado un sistema de desagües pluviales consistente en un canal con rejas superiores (Figura 2). Dado que la estructura de captación actual posee 20 cm de ancho y 30 cm de profundidad en su sección de menor altura, aumentando según la dirección de la pendiente, es que se buscó diseñar un premoldeado que se adapte a dicha geometría, con el fin de realizar la menor intervención posible, disminuyendo costos y tiempos de obra.

Se escogió una sección de tipo trapecio isósceles, con un ancho de 28 cm en la cara superior, 20 cm en la inferior y una altura de 20 cm (Figura 3). Se adoptó esta forma con el fin de que pueda ser fácilmente colocado sin necesidad de estructuras de soporte, sustentándose con las paredes presentes a sus lados, disminuyendo la sollicitación a flexión del mismo, buscando que las tensiones principales sean de compresión. Asimismo, se redujo el volumen de material utilizado y por ende los costos asociados a la construcción. Otra ventaja se obtiene a partir del espacio libre en la zona inferior del canal donde el agua puede fluir libremente con la pendiente, evitando la necesidad de garantizar la permeabilidad en sentido horizontal. Este espacio inferior también permite que los sólidos de tamaños menores a los poros puedan ser eliminados, sin quedar atrapados en la estructura interna del material, aminorando las probabilidades de colmatación del módulo.



Figura 2 - Imagen de las rejas metálicas.

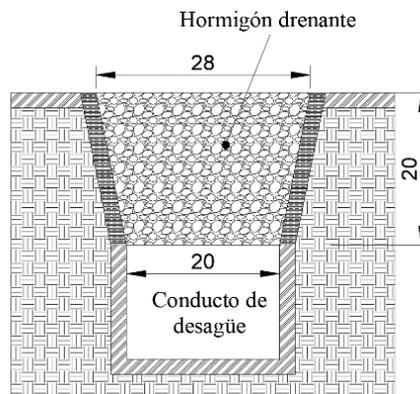


Figura 3 - Esquema del módulo proyectado.

Para caracterizar el material se llevó a cabo una tomografía computada en el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) situado en Rafaela. Como producto de esta se obtiene un modelo en tres dimensiones de la probeta, del cual se pueden adquirir datos sobre la estructura interna del material (Figura 4).

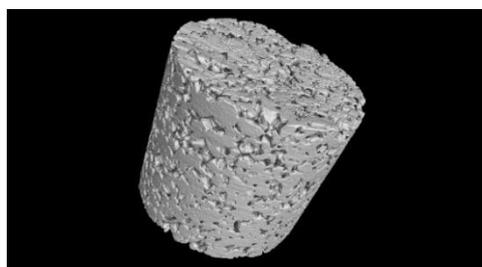


Figura 4 - Estructura en 3D.

Por otro lado, se realizaron simulaciones computacionales para la evaluación de la capacidad de erogación y resistencia mecánica del módulo.

Resultados

Para poder evaluar la eficacia de los módulos para la infiltración del agua precipitada se puede evaluar una tormenta de diseño, quedando ésta definida por los parámetros de duración, intensidad y recurrencia. La recurrencia adoptada por la Secretaría de Asuntos Hídricos para la verificación del sistema de desagüe pluvial es de 5 años, para una duración de 5 min se obtiene la mayor intensidad que es de $i = 186,1$ mm/h.

El modelo es adecuado según la subcuenca perteneciente a la zona centro de la Ciudad de Santa Fe, donde el factor de impermeabilización es del 100 %, por lo tanto la totalidad de la precipitación se transforma en escurrimiento superficial.

Considerando franjas de 1 m de largo y dado que el ancho total entre líneas de edificación es de 13 m, el caudal pico a erogar por metro lineal resultó de:

$$Q_i = i \cdot S \quad (1)$$
$$Q_i = 5,1694 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 13[m] \cdot 1[m] = 6,72 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Ya que la capacidad de descarga del módulo es dada por la permeabilidad y la superficie de descarga del mismo. Siendo p la permeabilidad $0,0131 \left[\frac{m}{s} \right]$ y la superficie es el ancho de la sección inferior multiplicada por la longitud.

$$Q_s = p \cdot S \quad (2)$$
$$Q_s = 0,0131 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 0,2 [m] \cdot 1[m] = 2,62 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

El caudal obtenido en la ecuación número (2) corresponde al volumen de agua que puede atravesar la estructura el hormigón drenante a utilizar por unidad de tiempo y de longitud.

Comparando los valores de las ecuaciones (1) y (2), pude apreciarse que la capacidad de descarga del módulo diseñado, con la mezcla de hormigón drenante escogida y una superficie de evacuación libre de 20 cm era superior al caudal producido por la máxima intensidad de la tormenta de diseño. Por lo tanto se definió como factible la utilización de los módulos en los ingresos pluviales de la peatonal santafesina.

Antes de los ensayos físicos, se realizaron simulaciones computacionales para verificar que el módulo permitirá el paso del caudal pico y resistirá las sollicitaciones mecánicas a las que estará expuesto, con el fin de poder modificar el material o las dimensiones del módulo antes de materializar probetas. La permeabilidad se analizó en OpenFOAM, utilizando el módulo porousMultiphaseFoam (Horgue, 2015), módulo desarrollado para flujos bifásicos en medios porosos.

La altura de presión en la cara superior es igual a cero ya que el módulo podrá erogar el caudal pico, por lo que no existirá acumulación de agua que genere una altura de presión. En la cara inferior la presión será igual a cero, ya que se permite el flujo libre de agua hacia el desagüe. La velocidad de flujo es calculada dividiendo el caudal total producido por la tormenta de diseño en la superficie de aporte por el área de descarga del módulo:

Siendo la superficie de descarga libre del módulo igual a: $S = 0,2[m] * 1 [m] = 0,2 [m^2]$

$$\text{La velocidad será igual a: } V = U_{theta} = \frac{Q}{S} = \frac{6,72 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{0,2 [m^2]} = 3,36 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m}{s} \right]$$

En las caras laterales de apoyo se establece un flujo nulo, ya que las mismas estarán apoyadas sobre material considerado impermeable y en ambas caras transversales se aplica la condición “empty”, ya que no existe flujo horizontal en el modelo diseñado.

La figura 5 representa las líneas de corriente junto con los colores correspondientes a la escala de velocidades. Se apreció la verificación de las condiciones de borde en velocidades sobre los contornos, así como también el recorrido del fluido, el cual se mueve principalmente en dirección vertical descendente, aumentando su velocidad a medida que va atravesando el módulo, no solo por la influencia de la gravedad, sino también por la diferencia existente entre el área de ingreso y egreso.

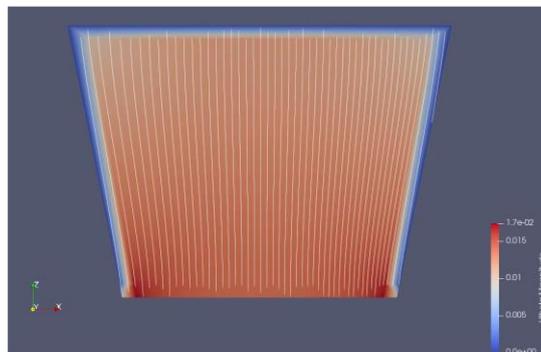


Figura 5 - Líneas de corriente y magnitud de la velocidad en cm/s.

Por otro lado se realizó un modelo computacional para verificar la resistencia mecánica del módulo. El software escogido fue Robot Structural Analysis Professional (2023), el cual permite crear estructuras de deformación plana, pudiendo analizar tensiones y deformaciones solo en un plano del cuerpo.

El área de contacto del neumático para las cuatro ruedas de un automóvil mediano típico es de aproximadamente de 8,5 x 11 pulgadas (21,59 cm x 27,94 cm) (Figura 6) (García, 2008).

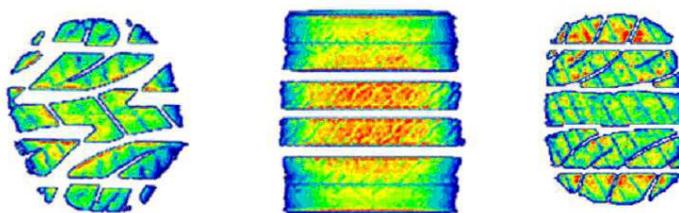


Figura 6 - Imágenes obtenidas mediante piel inteligente. Muestra de tres huellas de contacto de diferentes vehículos, con la distribución de presiones representada mediante escala de colores (Daniel G. et al. 2008).

El valor indicado por la norma AASHTO 1993 para la carga por eje en un vehículo liviano es de 0,6 tn por eje, es decir, 600 kg por eje. Esta carga fue distribuida a cada uno de los neumáticos, recibiendo cada uno de ellos el equivalente a 300 kg.

A partir de este valor se obtuvo una carga lineal que fue utilizada para el modelo computacional, se divide el valor de 300 kg entre los 20 cm estimados de profundidad de la huella, obteniendo así una carga distribuida linealmente igual a $15 \frac{kg}{cm}$.

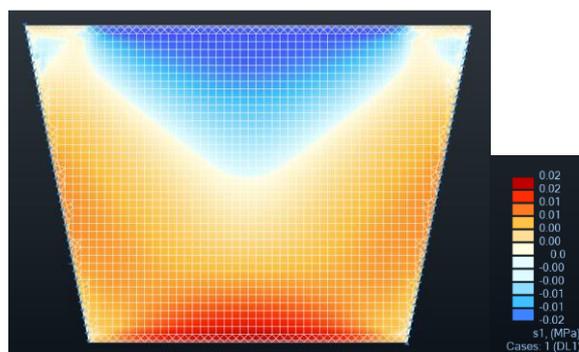


Figura 7 - Diagrama de tensiones principales.

Como puede apreciarse en la figura 7, se generaron tensiones negativas (de compresión) en la parte superior del módulo, mientras que en la cara inferior la tensión es positiva (tracción).

Las simulaciones permitieron verificar que el módulo resistirá correctamente los esfuerzos a los que estará sometido y que el caudal pico podrá atravesar la estructura.

Luego de analizar la información brindada por la tomografía, se determinó que el tamaño máximo de poros es de 16 mm de diámetro (mayor dimensión abierta), por lo que el módulo podría retener todos los objetos cuyas dimensiones sean mayores a este valor. Asimismo, al producirse una disminución de la velocidad del fluido en la masa del hormigón y debido a la tortuosidad, partículas menores pueden ser retenidas, disminuyendo así la cantidad total de sólidos suspendidos.

Para obtener piezas de hormigón permeable tales como las proyectadas, es que se diseñó y materializó un encofrado con placas de aglomerado de madera que consta de piezas móviles que permiten el fácil desmolde de las piezas. Este será utilizado para obtener las piezas de hormigón permeable sobre las cuales se ejecutarán los ensayos necesarios para evaluar el desempeño del material y del módulo según los objetivos buscados.

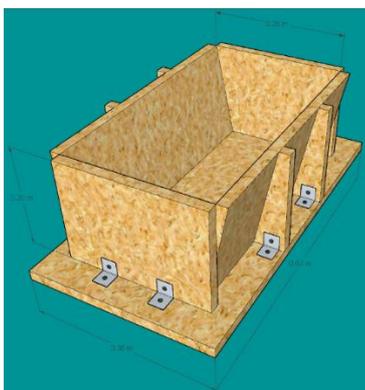


Figura 8 - Diseño 3D del encofrado.



Figura 9 - Encofrado materializado.

Conclusiones y trabajos a futuro

A partir de los resultados obtenidos hasta el presente, es posible concluir:

Tanto el hormigón drenante como el módulo diseñado poseen la permeabilidad suficiente para erogar el caudal producido por la tormenta de diseño y el área que aporta a los desagües de la peatonal. Esto es primordial, ya que si sólo se observa la capacidad de filtración, se podría producir un fenómeno de acumulación de agua y generar inundaciones.

El material posee la capacidad de filtración necesaria para retener residuos urbanos del agua que ingresa a los desagües, ya que su estructura porosa permite que el agua ingrese a los desagües pero los residuos mayores a 16 [mm] queden en la superficie. Este es el principal punto del proyecto, a partir del cual se concluye que la utilización de los módulos de la forma planteada permitirá una disminución en la cantidad de residuos que ingresan a los desagües pluviales, reduciendo así las obstrucciones en las alcantarillas, aumentando la durabilidad de las mismas y por último aminorando la contaminación del curso de agua natural que recibe los excesos pluviales sin tratamiento.

El módulo es capaz de resistir correctamente los esfuerzos producidos por las cargas que lo solicitarán durante su vida útil.

Es necesario avanzar sobre las siguientes etapas de la investigación:

El estudio de la disminución de residuos urbanos presentes en el agua erogada por los desagües pluviales, este punto es esencial para evaluar la capacidad de filtración del material y del módulo, el cual retiene los sólidos mayores del tamaño de la porosidad y permite el paso del líquido. Este proceso de filtración depende del tamaño y distribución de poros en el material. Luego de haber materializado y curado adecuadamente los módulos, se procederá a realizar los ensayos de flexión y compresión simple, para verificar que las piezas resistirán los esfuerzos a los que estarán sometidos. También se realizarán ensayos correspondientes a la verificación de la conductividad hidráulica, determinando si es posible que los módulos eroguen el caudal producido por la tormenta de diseño utilizada para el cálculo de los desagües existentes, según la normativa vigente en la Municipalidad de Santa Fe. De obtener resultados insuficientes, se ajustarán los valores de las dosificaciones para alcanzar los requerimientos del caso.

Por último se procederá a realizar los ensayos que determinarán el desempeño del hormigón drenante en la mejora de los parámetros indicados anteriormente para evaluar la calidad del agua erogada. Esto se llevará a cabo obteniendo muestras de agua de lluvia y comparando los valores de los parámetros antes y después de atravesar la estructura.

Por otro lado se pretende realizar la comparación entre diferentes dosificaciones y evaluar cuales serían las características optimas que debe tener el módulo para aumentar su rendimiento, buscando establecer relaciones entre diferentes parámetros, comparando la mejora de la calidad del agua obtenida con la variación en el tamaño de poros, la permeabilidad o la resistencia a compresión.

Referencias

Aguirre, D.D., Fogliatti, F.L., Miraglio, M.E. (2022) *Efecto de la porosidad y espesor de pasta en el desempeño del hormigón drenante*. JIT 2022: Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos. Reconquista, Argentina, 3 a 4 de noviembre de 2022.

Pilon, B.S.; Tyner, J.S.; Yoder, D.C.; Buchanan, J.R. *The Effect of Pervious Concrete on Water Quality Parameters: A Case Study*. Water 2019, 11, 263. <https://doi.org/10.3390/w11020263>

Corazza, I.(2023). *Utilización de hormigón drenante para estructuras de recepción de excedentes pluviales*. Tesis de grado de la carrera de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.

García-Pozuelo Ramos, G. (2008). *Modelo contacto neumático-calzada a baja velocidad*. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid (España).

Faisal GH, Jaeel AJ, Al-Gasham TS. (2020). BOD and COD Reduction Using Porous Concrete Pavements, *Case Studies in Construction Materials* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00396>

Klein, N. (2019). *Offenporiger Beton. Lärmarme Straßenoberflächen, Spezialbetone*. Technische Universität München.

Kováč, M., Sicáková, A. (2017). *Pervious Concrete as a Sustainable Solution for Pavements in Urban Areas*. Environmental Engineering 10th International Conference, Lithuania, 27 a 28 de Abril de 2017. DOI: <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.031>

Horgue, P., Franc, J., Guibert, R., & Debenest, G. (2015). *An extensión of the open-source POROUSMULTIPHASEFOAM toolbox dedicated to groundwater flows solving the Richard's equation*. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Université de Toulouse.

United States Environmental Protection Agency (1999). *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices*. Washington, DC.