

COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE AGREGADOS NATURALES Y RECICLADOS EN CONCRETO PERMEABLE

M.J. Chinchillas¹, R. Corral¹, J.M. Gómez², S.P. Arredondo¹, J.L. Almaral¹, O.H. Acuña¹, C.A. Rosas¹.

1. Universidad Autónoma de Sinaloa, UAS, Facultad de Ingeniería Mochis, Ciudad Universitaria, Fuente Poseidón prolongación Ángel flores S/N, Pte. Fracc. Las Fuentes, C.P. 81223, México.
2. Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, Av. Dr. Marañón, No. 44-50, C.P. 08028, Barcelona, España.

RESUMEN

Inyectar la mayor cantidad de agua al subsuelo es de gran importancia, ya que cuando el nivel del manto freático está por debajo de su capacidad, provoca asentamientos en el terreno. Aunado a esto reciclar el concreto es una forma efectiva para eliminar escombros que contaminan nuestros suelos. Éste concreto contiene poros interconectados que permiten el paso del agua con facilidad. Se trabajó con agregados naturales (AN) y reciclados (AR) a 25 y 50% de sustitución. A los 28 días de curado se evaluó la permeabilidad, resistencia a la flexión y compresión. Los resultados están ligados entre sí, ya que el concreto menos permeable alcanzó resistencias mecánicas mayores e inversamente, por otra parte el uso de AR provocó una disminución en las propiedades mecánicas y la forma del agregado influyó, siendo el agregado triturado un material que se enlaza mejor entre la pasta y los otros agregados.

Palabras claves: Concreto permeable, agregado reciclado, humo de sílice, zona de transición interfacial y permeabilidad.

ABSTRACT

Inject more water into the subsoil is very important, because when the ground water level is below capacity, causing settlements on the ground. Coupled with this, concrete recycling is an effective way to remove debris that pollute our soil. This concrete contains interconnected pores that allow water to pass easily. We worked with natural aggregates (NA) and recycled (AR) at 25 and 50% substitution. At 28 days of curing, the permeability, flexural strength and compression was evaluated. The results are linked together as the less permeable concrete obtained mechanical strength greater and inversely, on the other hand the use of AR caused a decrease in mechanical properties and aggregate shape was influential, crushed aggregate material which is a better link between the paste and the other aggregates..

Keywords: Pervious concrete, recycled aggregates, silica fume, interfacial transition zone, permeability.

INTRODUCCIÓN

El término “concreto permeable” típicamente describe un material de revenimiento cero y con una relación alta de vacíos, que consiste de cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua. La combinación de estos ingredientes producirá un material endurecido con poros conectados (Figura 1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), que varían en tamaño desde 0.08 a 0.32 pulgadas (2 a 8 mm), lo cual permite que el agua pase a través de ellos fácilmente. El contenido de huecos puede variar de 18 a 35%, con resistencias a la compresión típicas de 400 a 4000 psi (2.8 a 28 MPa). La capacidad de drenaje de un pavimento de concreto permeable variará con el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente caerá en el rango de 2 a 18 galones/min/pies² (81 a 730 L/min/m²) [1].



Figura 1. Imagen del Concreto permeable

Los concretos permeables cuentan con una resistencia a la compresión y resistencia a la flexión menor a un concreto convencional y entre mayor sea la relación de vacíos menor será las resistencias mecánicas [2-4], debido a su alto contenido de porosidad, de igual manera el utilizar agregados reciclados en lugar de agregados naturales, las propiedades mecánicas del concreto disminuyen notablemente, ya que el AR es un material reutilizado, esto ocasiona que sea un agregado muy absorbente y poroso, al utilizarlo en el concreto convencional se encontró que las propiedades mecánicas disminuyen[5-6]. Esta es la principal problemática encontrada en la literatura. Existe un material utilizado en el concreto convencional que mejora sus propiedades mecánicas y físicas, "el humo de sílice", el funcionamiento de este material está comprobado en varios artículos [7-8], un reemplazo parcial de humo de sílice (HS) por cemento Portland mejora las propiedades del concreto, sin embargo su uso en el concreto permeable no ha sido tema de estudio, por lo cual es una alternativa que puede ser utilizada en esta investigación.

Los problemas de la calidad del agua para las cuencas colectoras son cada vez más importantes. Gran parte del material que se lava y se arrastra hacia los arroyos, ríos, y eventualmente a las aguas subterráneas vienen de los escurrimientos superficiales contaminados con materiales aplicados a la superficie del suelo. Inyectar la mayor cantidad de agua al subsuelo es de gran importancia, ya que cuando el nivel del manto freático está por debajo de su capacidad, provoca asentamientos en el terreno, utilizar

el concreto permeable ayudará a que el concreto no sea una barrera física entre el agua de lluvia y el subsuelo. Aunado a esto reciclar el concreto es una forma muy efectiva para eliminar escombros procedentes de demoliciones de edificios, pavimentos, puentes y otras construcciones hechas con concreto, igualmente sustituir parcialmente el cemento por un material de desecho (HS) ayuda a disminuir su producción y en consecuencia disminuir las emisiones de CO₂ producidas por la industria cementera. Desde el punto de vista científico-técnico, no se encontraron investigaciones del concreto permeable con reemplazos de humo de sílice por cemento Portland, realizar esta investigación aportará al estado del arte del tema y también las aplicaciones del concreto permeable aumentarán si se mejoran las propiedades mecánicas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales.

El cemento utilizado es un Cemento Portland Compuesto de resistencia 30 (CPC 30R), los requerimientos físico-químicos se estipulan en la norma NMX-C-414 [9] y equivale al cemento Portland ordinario Tipo III que establece ASTM C150 [10].

El humo de sílice utilizado en la investigación fue donación del Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV) de la ciudad de Chihuahua, este material y el Cemento Portland fueron caracterizados con el fin de comparar las propiedades conocidas mediante la revisión de la literatura, la cual lo define como una sílice no cristalina muy fina, que contiene un alto contenido de sílice amorfa y consiste en partículas esféricas muy finas con un diámetro promedio de 0.1 a 0.2 μm . Su color es gris oscuro, tiene una densidad entre 2.2 a 2.3 g/cm^3 , su superficie específica (medida por adsorción de nitrógeno, BET) está alrededor de los 20,000 m^2/kg . En la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas mencionadas.

Tabla 1. Propiedades físicas del cemento y HS

<i>Material</i>	<i>Densidad (g/cm^3)</i>	<i>Superficie específica, BET (m^2/kg)</i>	<i>Tamaño promedio (μm)</i>
a) CPC	3.15	1400	15-25
b) HS	2.27	19600	0.1 - 0.2

Por medio de la técnica de caracterización de fluorescencia de rayos X se conoció la composición química que contiene el Cemento Portland Compuesto y el humo de sílice que utilizamos en esta investigación, en este estudio se observa la cantidad de óxidos presente en el CPC, siendo el CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ los óxidos con mayor proporción. En el humo de sílice el SiO₂ tiene un 95.22 % seguido por el Fe₂O₃, los demás compuestos están presentes en menor proporción. En la Tabla 2 se muestran los valores de los óxidos en el CPC y HS.

Tabla 2. Composición química (% en peso)

<i>Material</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>MgO</i>
-----------------	------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------	-----------------------	-----------------------	------------------------	------------

a) CPC	19.94	4.40	2.97	63.50	3.08	0.42	0.12	-
b) HS	95.22	0.08	2.37	0.26	0.11	0.56	0.30	0.24

Los agregados gruesos naturales triturados (ANT) y redondeados (ANR) fueron obtenidos en la criba de la localidad Charay, El Fuerte, Sinaloa (la criba nueva), se consiguió este material con un tamaño de 3/4 hasta 3/8 de pulgada (19.05 mm a 9.5 mm) y la grava reciclada fue obtenida a partir de la trituración de concreto de pavimento recolectada en el basurero llamado "la morena" de la ciudad Los Mochis, Sinaloa. Se eligió el concreto con un espesor de 20 cm de peralte. A este concreto se evaluó la porosidad, la absorción por inmersión y la densidad siguiendo la norma ASTM C-642 y la resistencia a compresión por medio de la técnica de índice de rebote siguiendo la norma NMX-C-192.

Mezclas.

Se diseñaron mezclas de concreto permeable con una relación de a/c de 0.35 (con el fin de obtener altas resistencias mecánicas y una relación de vacíos de 15%, para que el concreto permeable tenga una alta permeabilidad. En éstas se utilizó agregado natural triturado, agregado natural redondo y agregado reciclado en sustitución de 50% respecto al agregado natural, con la finalidad de evaluar la influencia que tiene la forma del agregado en el concreto permeable. En cada mezcla con diferentes agregados se le adicionó 10% de HS, para aumentar las resistencias mecánicas. La dosificación de las mezclas se muestran en la Tabla 3, donde puede observarse la cantidad de material necesario para elaborar dos vigas de concreto permeable de 15x15x50 cm y una losa de 30x30x5 cm y la Tabla 4 muestra la nomenclatura utilizada.

Tabla 3. Cantidad de material utilizado en mezclas con relación a/c de 0.35

	<i>GNT-C</i>	<i>GNT-HS</i>	<i>GNR-C</i>	<i>GNR-HS</i>	<i>GR50-C</i>	<i>GR50-HS</i>
AGUA	4.7474	4.747410	4.672187	4.67218	4.67218	4.67218
GRAVA NATURAL	42.1362	42.13692	42.13692	42.136	21.0684	21.0684
GRAVA RECICLADA	-	-	-	-	21.0684	21.0684
CEMENTO	13.3491	12.01419	13.3491	12.0141	13.3491	12.0141
HUMO DE SÍLICE	-	1.33491	-	1.33491	-	1.33491

Tabla 4. Nomenclatura utilizada

GNT	Grava natural triturada
GNR	Grava natural redonda
GR50	Grava reciclada en sustitución del 50%
C	Cemento Portland Compuesto
HS	Humo de sílice

RESULTADOS

En la Tabla 5 se puede observar las características del concreto de origen, las cuales ejercen una influencia considerable en las propiedades de los agregados

reciclados, en la tabla puede observarse una alta absorción, lo cual proporciona que al momento de realizar la mezcla, el agua jugará un papel importante en el desarrollo del concreto, por lo tanto fue necesario realizar un ajuste de agua en el diseño de mezcla. Se puede observar que la densidad del concreto reciclado es menor que el concreto convencional, esto es debido a su naturaleza porosa, el agregado reciclado tiene adherida pasta antigua, lo cual proporciona una densidad baja. La resistencia que alcanzó por medio del método no destructivo como el índice de rebote fue de 29.9 MPa, es un valor promedio, lo cual nos dice que el material utilizado es un material con resistencias altas y a la vez apto para utilizarse como agregado reciclado.

Tabla 5. Propiedades del concreto de origen

<i>Pruebas</i>	<i>Resultado</i>
Absorción (%)	6.28
Densidad g/cm ³	2.35
Porosidad %	16.31
Índice de rebote MPa	29.9

Resistencia a la compresión de relación a/c de 0.35

En la Figura 2 se observan que en las muestras elaboradas con CPC alcanzaron las resistencias más altas y las mezclas elaboradas con HS alcanzaron resistencias a compresión bajas a los 28 días de curado, lo cual puede ser atribuido a que la cantidad de agua utilizada no fue la adecuada y no alcanzó para formar gran cantidad de hidróxido de calcio (CH) en la hidratación del cemento, por lo cual el HS no formó nuevos silicatos de calcio hidratado (CSH) en la reacción puzolánica. También se piensa que la causa por la cual el HS no alcanzó resistencias elevadas es porque los CH se disolvieron en la cámara de curado, ya que el concreto permeable tiene una estructura de poro de gran abertura, lo cual es necesario seguir investigando para corroborar lo mencionado. La mezcla de GNT-C fue la más resistente a los esfuerzos a compresión, alcanzando hasta un 203.15 kg/cm², es de suponerse que la forma del agregado tuvo una influencia en la resistencia, debido a que el material utilizado en esta mezcla es grava triturada, la adherencia fue mayor entre la grava y la pasta. El mismo resultado se muestra en las otras mezclas, a pesar de tener HS, la resistencia mecánica no aumentó. Por otra parte las mezclas que tienen 50 % de agregado reciclado fueron las mezclas con menor resistencia, esto es atribuido a que el agregado utilizado en estas mezclas es poroso y tiene una menor densidad, al contener pasta antigua adherida en la grava y tener una mayor cantidad de ZTI. En la gráfica se muestra una tendencia un poco extraña, ya que el concreto permeable que contiene 100% CPC alcanzó resistencia mayores que las que contenían HS, en ambos casos fue mayor el concreto con ANT, seguido de las mezclas que contenían ANR y por último las mezclas con 50% de sustitución de AR por ANT. Comparando los resultados la mezcla de GNT-C fue la que alcanzó mayor resistencia mecánica, 32.41% menos fue el concreto de GNT-HS, es muy alta la diferencia mecánica que existe entre estos dos concretos, lo diferente que contiene una de ellas es 10% de HS, que se cree que no reaccionó lo suficiente para elevar las resistencias, o se necesitó mayor cantidad de agua. La mezcla GNR-C

alcanzó 192.2 kg/cm² y GNR-HS 32.45% menos, el mismo comportamiento observado en la mezcla mencionada anteriormente. En el caso de GR50-C alcanzó 186.15 kg/cm² y GR50-HS un 33.07% menos.

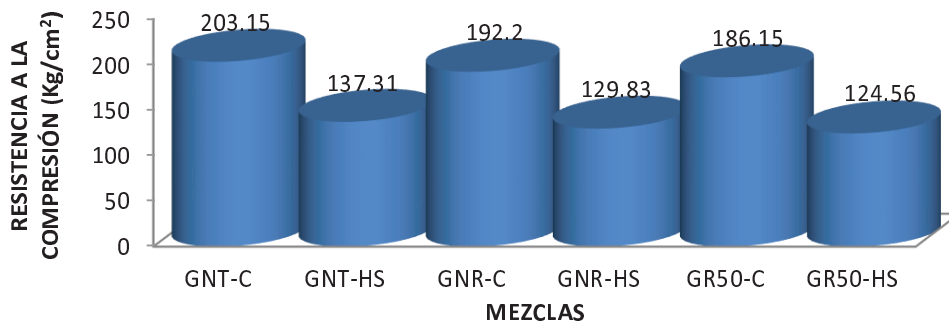


Figura 2. Resultados de resistencia a compresión de mezclas con relación a/c de 0.35

Resistencia a la flexión de relación a/c de 0.35

La Figura 3 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la flexión de las mezclas de concreto permeable con una relación a/c de 0.35 a los 28 días de curado, la tendencia es similar a los resultados obtenidos en f'c, donde la muestra que alcanzo mayor esfuerzo a flexión es la que contenía ANT y 100 % CPC, a su vez las mezclas con humo de sílice tienen resistencias a la flexión bajas. Los agregados reciclados tuvieron influencia, ya que las mezclas elaboradas con esos agregados tienen resistencias bajas, es atribuido a la mayor cantidad de ZTI que conlleva ese material. También se observa que el utilizar ANT en el concreto permeable, hace que sea más resistente en las propiedades mecánicas. La mezcla de GNT-C alcanzó resistencias de 29.38kg/cm² y el concreto que más se acercó a esa cantidad fue GNR-C con una diferencia del 2.89% respecto a la resistencia más elevada. La mezcla GR50-C tuvo una diferencia del 3.34%. Estos resultados muestran que la diferencia entre ellas no es muy significativo y el utilizar hasta 50% de AR en el concreto permeable es técnicamente apto. La diferencia que existe entre el concreto con 100% CPC y las mezclas con HS es muy notorio. 43.88% de diferencia existe entre la mezcla GNT-HS respecto a GNT-C, 43.78% disminuyó la mezcla de GNR-HS respecto a GNR-C y 44.3% de GR50-HS comparada con GR50-C. Estos resultados muestran que el utilizar 10% de HS en concreto permeable con estas especificaciones no es la forma más adecuada de lograr altas resistencias mecánicas.

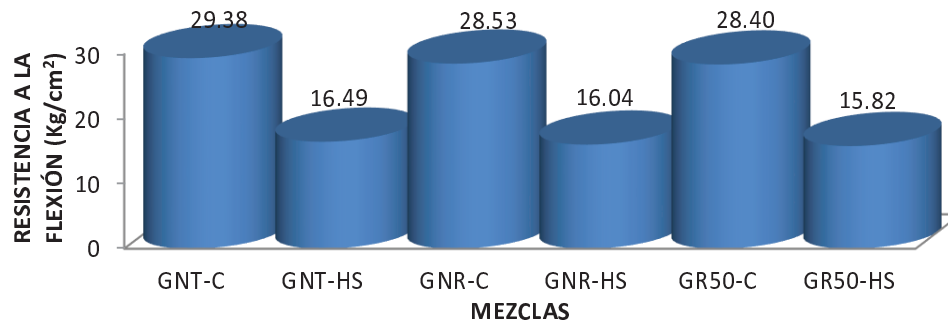


Figura 3. Resultados de resistencia a la flexión de mezclas con relación a/c de 0.35

Coefficiente de permeabilidad

Del ensayo de permeabilidad se observan los resultados en la figura 4 a los 28 días de curado, donde se aprecia que las mezclas que contienen HS tienen una mayor permeabilidad que las elaboradas con CPC, la muestra menos permeable fue GNT-C con una permeabilidad de 0.00887 m/s y comparándola con la mezcla GNT-HS existe una diferencia de 17.87%. El concreto de GNR-C tiene una permeabilidad de 0.0094 m/s y la que contiene HS con el mismo agregado tiene un incremento en el coeficiente de permeabilidad del 14.78%. Por último la mezcla GR50-C tiene una permeabilidad de 0.0101 m/s y GR50-HS 10.62% más. Los concretos con un mayor alto coeficiente de permeabilidad, son aquellos que tienen menor resistencia mecánica, ya sea resistencia a compresión o flexión. Los concretos más resistentes tienen menor coeficiente de permeabilidad. Esto es atribuible a que al ser más resistente se formó una matriz más densa y a su vez más resistente, pero ésta matriz impidió un poco el paso del agua al momento de realizar el ensayo. Tomando en cuenta el coeficiente de permeabilidad de un concreto convencional, todos los valores observados en la Figura 4 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran un muy alto coeficiente de permeabilidad, que se encuentra entre los valores típicos de los concretos permeables.

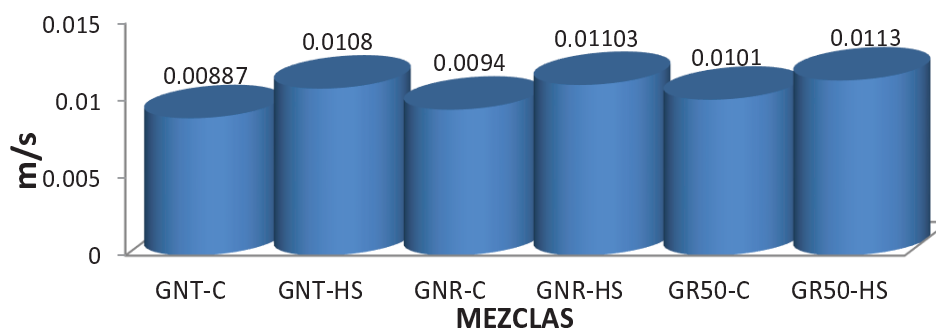


Figura 4. Resultados de la permeabilidad

CONCLUSIONES

El concreto original alcanza resistencias a la compresión válidas para ser utilizado como un nuevo agregado resistente y en buen estado; el periodo de envejecimiento de este tipo de concretos se puede intuir en propiedades tales como la absorción, densidad y porosidad, puesto que la correlación directa entre la edad y éstas es válida. La resistencia a compresión y flexión del concreto permeable con una relación de a/c 0.35, disminuyó notablemente con las mezclas que contenían humo de sílice, de 30-40% aproximadamente. Es necesario continuar la investigación para comprobar dicho fenómeno.

La permeabilidad para el concreto permeable con a/c de 0.35 es alta, los valores indican que la permeabilidad alcanza valores que van de 0.0088 a 0.0113 m/s, el utilizar una relación de vacíos de 15% ayuda a que el material contenga mayor abertura entre su estructura y en consecuencia sea más permeable.

El efecto que tiene el agregado reciclado en el concreto permeable con una relación a/c de 0.35 no es muy significativo, debido a que la resistencia mecánica que se alcanza con una sustitución del 50% de AR, provoca una disminución en la resistencia de 3.33 y 8.37% en la resistencia a la flexión y compresión respectivamente en comparación a la mezcla con ANT-C. Debido a que la falla del concreto en las pruebas mecánicas se provoca por el sitio de adherencia entre agregado y agregado y poco se ve influenciado la ZTI de los agregados nuevos y los agregados reciclados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud a la Universidad Autónoma de Sinaloa y a la Universidad Politécnica de Cataluña por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación a través de su infraestructura.

REFERENCIAS

Libro.

[1] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Concreto permeable, (2006), Concreto permeable ACI 522R-06. P. 15-17.

Tesis.

[2] A. Mulligan, "Attainable compressive strength of previous concrete paving system", Tesis de maestría, University of Central Florida, (2005,) p.132.

Revista.

[3]R. Meininger, "No-fines pervious concrete for paving", Concrete International, V.10, (1988): pp. 20-27.

[4]Y. Chen. K. Wang. X. Zhou, "Strength, fracture and fatigue of pervious concrete", Construction and Building Materials 42 (2013): pp. 97-104.

[5]R. Corral. et al., "Chloride ion penetrability and corrosion behavior of steel in concrete with sustainability characteristics", International Journal of Electrochemical Science 6, 3 (2011): p. 958-970.

[6]J. Gómez, "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregates an experimental study", Cement and Concrete Research 32, 8 (2002). : pp. 1301-1311.

[⁷] Z. Bayasi. J. Zhou. "Properties of silica fume concrete and mortar", ACI Mater. J. 90, 4 (1993): pp. 349– 356.

[⁸] Y. Yogendran. B. Langan. M. Haque. M. Ward, "Silica fume in high-strength concrete", ACI Mater. J. 84 (1987): pp.124–129.

Normas.

[⁹]nmx-414-onncce-2004. Industria de la Construcción Cementos Hidráulicos, especificaciones y métodos de prueba. (www.onncce.org.mx)

[¹⁰]ASTM-C 150. Standard Specification for Portland Cement. Doi: 10.1520/c0150_c0150m-12. (www.astm.org).