

Evaluación experimental de la resistencia del concreto modificado con caucho

Experimental evaluation of the strength of concrete modified with rubber

Jaime Retama Velasco
Facultad de Estudios Superiores Aragón
Universidad Nacional Autónoma de México

Ricardo Heras Cruz
Facultad de Estudios Superiores Aragón
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

En este trabajo se reportan resultados parciales derivados de una serie de experimentos de laboratorio, con los que se estudia el empleo de caucho de llantas de desecho como agregado en concreto de cemento Portland, reemplazando el 10% en peso del agregado pétreo. Se estudiaron tres mezclas de concreto: simple, con caucho grueso y con caucho fino. Los tamaños de las partículas del caucho grueso variaron de 6.32 - 9.53 mm, mientras que para el fino iban de 2.35 - 2.80 mm. La influencia de este material en la resistencia mecánica del concreto se evaluó mediante cilindros y vigas, a los 28 días de edad, bajo condiciones de carga uniaxial de compresión, tracción indirecta y flexión. Para las tres condiciones de carga estudiadas, los resultados experimentales mostraron una reducción de la resistencia del concreto, cuando se sustituye parte del agregado pétreo con caucho. La mezcla de concreto con partículas finas de caucho presentó un mejor comportamiento mecánico que la mezcla con partículas gruesas; incluso en condiciones de flexión, la resistencia era casi igual a la del concreto simple.

Palabras clave:

Caucho reciclado, concreto hidráulico, compresión, flexión, tensión indirecta.

Abstract

In this work, partial results derived from a series of laboratory experiments are reported. In this, the use of waste tire rubber as aggregate in Portland cement concrete is studied, replacing 10% by weight of the stone aggregate. Three concrete mixes were studied: plain, with coarse rubber and with fine rubber. The sizes of the rubber particles vary between 6.32 - 9.53 mm, for coarse rubber, and 2.35 - 2.80 mm, for fine rubber. The influence of rubber on the mechanical resistance of concrete was evaluated by means of cylinders and beams, at 28 days of age, under conditions of uniaxial compression, indirect traction and bending load. For the three load conditions studied, the experimental results showed a reduction in the strength of the concrete when rubber is incorporated to replace part of the stone aggregate. The mixture of concrete with fine rubber presented a better mechanical behavior than the mixture of concrete with coarse rubber; even under flexural conditions, the strength was almost equal to plain concrete.

Keywords:

Recycled rubber, hydraulic concrete, compression, flexion, indirect tension.

Fecha de recepción: 31 de enero de 2022
Fecha de aceptación: 29 de marzo de 2022

<https://doi.org/10.22201/fesa.rdp.2023.6.50>

Introducción

El concreto es el material más utilizado en la construcción de infraestructura, pero no siempre cumple con ciertos requisitos en condiciones de carga de trabajo, como bajo peso, alta resistencia y ductilidad. Se han realizado numerosos estudios para mejorar sus propiedades mecánicas, mediante la sustitución de parte del agregado pétreo por caucho obtenido de neumáticos desechados (Topcu, 1995; Khatib & Bayomy, 1999; Retama & Ayala, 2017) (figura 1). En comparación con las mezclas de caucho empleadas en pavimentación asfáltica, su uso es limitado en material PCC (Huang, Li, Pang, & Eggers, 2004; Shu & Huang, 2014; Ma, Dai, Fu, Liu, Dong, & Huang, 2020). El empleo de granulado para reemplazar parte del agregado fino o grueso mejora algunas de sus propiedades mecánicas, mientras que otras se reducen, como su resistencia a la compresión (Khatib & Bayomy, 199; Xue & Pei, 2018; Li, Stubblefield, Garrick et al., 2004).

Durante las últimas tres décadas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones para evaluar el reciclaje del caucho de llantas de desecho (Eldin & Senouci, 1992; Eldin & Piekarski, 1993; DeGroot, 2007; Ghaly & Cahill IV, 2005). Una de las aplicaciones más prometedoras en el aprovechamiento de tales residuos es como agregado de concreto, reemplazando parte de la mezcla con partículas de caucho fino o grueso; para dicho proceso, los neumáticos se trituran en forma de virutas o de polvo antes de incorporarse a la masa de concreto (Eldin & Senouci, 1992; Batayneh, Marie & Asi, 2008; Humphrey & Blumenthal, 2010; Presti, 2013). De acuerdo con los métodos seguidos para el tratamiento de los neumáticos, el caucho podría clasificarse como astillas o virutas, migas y polvo de caucho.

Figura 1. Tiradero de neumáticos.



Nota: Se calcula que en México se desechan alrededor de 40 millones de neumáticos al año. En la actualidad hay más de 300 millones de unidades repartidas en basureros clandestinos (Llantrac México, 2022).

Youssf, Mills y Hassanli (2016) realizaron una serie de experimentos para estudiar la resistencia a la compresión del concreto modificado con caucho granulado, tratado químicamente. Girskas y Nagrockiene (2017) investigaron la influencia del caucho triturado en la resistencia a la compresión, la absorción de agua y la velocidad del pulso ultrasónico, cuando se agrega del 5 al 20% al concreto Portland. En tanto que Sadowski y Pietras (2014) hicieron ensayos con la mezcla de concreto y caucho como subrasante, o en carreteras, en probetas sometidas a compresión uniaxial cíclica y flexión cíclica. Más recientemente, Ma et al. (2020) desarrollaron un nuevo método para mejorar el rendimiento de la mezcla asfáltica, modificada con caucho granulado y a la que se incorporan aditivos para diseñar el proceso seco de la mezcla.

En este trabajo se realizaron ensayos experimentales para evaluar las propiedades mecánicas del concreto con cemento Portland (PCC), modificado con caucho de neumáticos. Se probó la resistencia a la compresión, flexión y tracción, con

tres mezclas de PCC: con caucho grueso, con fino y sin caucho; en las mezclas modificadas, se reemplazó el 10% del agregado, en peso, por caucho grueso o fino, respectivamente.

Métodos y materiales

Materiales

Las mezclas se prepararon con arena, grava, caucho granulado y cemento Portland tipo II; la densidad de este último es de 3150 kg/m^3 ; mientras que para la arena es de 2370 kg/m^3 , su módulo de finura de 3.04, su absorción de 8.79% y su humedad de 0.01%. En tanto que la densidad de la grava es de 2330 kg/m^3 , su tamaño nominal es de 12.7 mm, su absorción del 0.21% y humedad del 0.06%. Se emplearon dos tipos de agregados de caucho granulado: grueso con tamaños que variaban entre 6.35 - 9.53 mm, y finos, cuyos valores oscilaron entre 2.35 - 2.80 mm. Las figuras 2 y 3 muestran las formas y tamaños de ambas partículas

Figura 2. Partículas de caucho gruesas.



Fuente: Archivo personal de J. Retama (2022).

Figura 3. Partículas de caucho finas.



Fuente: Archivo personal de J. Retama (2022).

de caucho granulado, respectivamente; nótese que su forma no es uniforme y presenta superficies muy rugosas.

Dado que el caucho se obtuvo de llantas de desecho, provenientes de distintas fuentes, presenta una alta variabilidad en sus propiedades físicas y mecánicas; para obtener un tamaño de partícula casi uniforme de los cauchos fino y grueso, se les clasificó en laboratorio mediante una máquina de agitación mecánica.

A diferencia de otras investigaciones, en las que se aplicó un tratamiento químico a las partículas de caucho (Youssif et al., 2016; Zhang, Liu & Peng, 2019; Li et al., 2004), y con el objetivo de reducir el costo económico generado por el uso de caucho como agregado en el concreto, en este estudio experimental no se les trató de forma especial. Además, se retiraron los alambres de acero de los neumáticos triturados, como se observa en las figuras 2 y 3.

Mezclas

Se consideraron tres mezclas para el estudio del programa experimental: la primera fue de control, contenía concreto simple sin caucho granulado y se etiquetó como NR. Se especificó una resistencia a la compresión de 20 MPa, de acuerdo con el método ACI 211.1-91, *Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal, pesado y masivo* (American Concrete Institute [ACI], 2009). Como se mencionó, en las otras dos mezclas se sustituyó parte del agregado pétreo, fino o grueso, en un 10% en peso, por caucho granulado fino o grueso, respectivamente. La mezcla de concreto con caucho grueso se etiquetó como CR, y la que contenía caucho fino, como FR. En la tabla 1 se muestra el diseño final de las mezclas.

Colado de las probetas

El proceso de colado de las mezclas se llevó a cabo en el laboratorio, de acuerdo con la norma ASTM¹ C192/C192M-15 (2015a), que es la

Tabla 1. Mezclas de concreto.

Mezcla	Agua (l)	Cemento (kg)	Agregado pétreo		Caucho	
			Fino (kg)	Grueso (kg)	Fino (kg)	Grueso (kg)
NR	266.64	325.30	723.80	907.80	0	0
CR	266.51	325.30	723.80	817.02	0	90.78
FR	260.28	325.30	651.42	907.80	72.38	0

Fuente: Elaboración propia (2022).

¹ Siglas correspondientes a la American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales).

Práctica estándar para la fabricación y curado de probetas de concreto en el laboratorio. Se coló un total de 32 cilindros de 150 × 300 mm y 15 vigas de 150 × 150 × 600 mm. La figura 4 muestra el proceso de colado de los tres especímenes de concreto en una máquina mezcladora mecánica, para obtener una masa casi homogénea. El tiempo de mezcla inicial fue de 5 minutos, seguido de 3 min de reposo para agregar el caucho granulado (fino

o grueso, según la muestra) en el mezclador, más 5 min para asegurar la incorporación completa de este a la mezcla. El procedimiento garantiza una masa de concreto casi homogénea. Después de estos pasos y según el tipo de muestra, cilindros o vigas, el concreto se vertió en moldes con la técnica recomendada y establecida en la norma ASTM C192, antes citada.

Figura 4. Colado de los especímenes.



Fuente: Archivo personal de J. Retama (2022).

Transcurridas 24 horas desde el colado de los especímenes, se desmoldaron y rotularon según la mezcla de concreto correspondiente y el tipo de ensayo experimental. Posteriormente, las probetas se colocaron en tanques con agua para su curado, se verificó que estuvieran sumergidas por completo (figura 5) y se les monitoreó hasta que alcanzaron su endurecimiento, a los 28 días, edad a la que se evaluó la resistencia mecánica.

Figura 5. Curado de los especímenes.



Fuente: Archivo personal de J. Retama (2022).

Métodos experimentales

Para evaluar la influencia del caucho granulado en la resistencia mecánica del concreto de cemento Portland, cuando aquel se incorpora parcialmente para reemplazar parte del agregado pétreo, se realizaron tres tipos de pruebas experimentales: compresión uniaxial, tensión indirecta y flexión, de acuerdo con los estándares de la ASTM.

Compresión uniaxial

Se probaron cinco cilindros de cada mezcla bajo una condición de carga de compresión uniaxial,

con la norma ASTM C39/C39M-15a (2015b), que establece aplicar una carga axial de compresión a los cilindros o núcleos moldeados a una velocidad que esté dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante la prueba por el área de la sección transversal de la muestra.

La carga se debe aplicar de forma monótona y continua sin golpes, hasta que ocurra la falla. En esta prueba se usó una carga de 0.25 MPa/seg para las tres mezclas de concreto. En la figura 6 se observa una de las muestras de cilindros montada en la máquina de prueba hidráulica y las placas planas de neopreno empleadas para garantizar una distribución uniforme de la carga en las superficies superior e inferior.

Figura 6. Prueba de compresión uniaxial.



Fuente: Archivo personal de J. Retama (2022).

Tensión indirecta

La resistencia a la tensión se evaluó mediante 15 cilindros, cinco por cada mezcla de concreto. Los especímenes se ensayaron bajo condiciones de carga de tensión indirecta, con base en la norma ASTM C496/C496M-11 (2011), que indica aplicar una fuerza de compresión a lo largo de la longitud de una probeta de concreto cilíndrica, a una tasa que esté dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla.

La carga continua se debe aplicar de forma monótona y constante, sin golpes, para llevar la

muestra a la falla. En esta prueba se utilizó una carga de velocidad de 1 kN/seg para todos los tipos de mezcla. En la figura 7 se muestra un espécimen montado en la máquina de ensayo. Se utilizaron dos barras cuadradas de acero macizo: una ubicada en la parte superior del cilindro, y la otra, debajo de este; ambas distribuyen la carga concentrada, aplicada por la máquina, en una línea a lo largo de la altura del cilindro. En la misma figura se observan dos pedazos pequeños de cartón que se usaron para alinear la probeta con el pistón de la máquina.

Figura 7. Prueba de tensión indirecta.



Fuente: Archivo personal de J. Retama (2022).

Módulo de flexión

Para evaluar la resistencia a la flexión o módulo de ruptura, se probó un total de 15 vigas (cinco por cada mezcla de concreto) y se les aplicó una carga a la mitad del claro, según el método propuesto en la norma ASTM C293/C293M-10 (2010), que indica cargar la muestra de forma continua y sin golpes. La carga debe aplicarse a una tasa constante hasta el punto de ruptura, de modo que la tensión máxima en la cara de tensión aumente a una velocidad de 0.9 a 1.20 MPa/min.

La tasa de carga para esta prueba fue de 4295.00 N/min; calculado con la ecuación de tensión de flexión de la teoría de vigas (Gere & Timoshenko, 1991; Oden & Ripperger, 1981).

En la figura 8 se muestra una viga montada en la máquina de prueba, apoyada en dos puntos en la parte inferior, con una separación de 550 mm entre sí. La carga se aplica en la parte superior del tramo medio, con una barra circular de acero sólido para distribuir la carga a lo largo de la profundidad.

Figura 8. Prueba de flexión.



Fuente: Archivo personal de J. Retama (2022).

Resultados

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión σ_c , la desviación estándar (SD), el coeficiente de variación (CV) y la reducción de la resistencia se consignan en la tabla 2 para cada una de las tres mezclas de concreto estudiadas. Se puede apreciar que el CV para todos los casos es menor a 5%, esto significa que no hay dispersión en los datos experimentales.

En la misma tabla se observa que no hay una reducción significativa en la densidad del concreto modificado; 4% para concreto con caucho grueso y 3% para concreto con caucho fino. Sin embargo, sí hay un efecto importante en la resistencia a la compresión. La resistencia media obtenida para la mezcla NR de control fue de 19.13 MPa, mientras que para la mezcla CR y la FR, fueron 10.46 MPa y 14.36 MPa, respectivamente. Esto significa una reducción del 45% para el concreto con caucho grueso y del 25% para el concreto con caucho fino.

Tabla 2. Resistencia a la compresión.

Mezcla NR			Mezcla CR			Mezcla FR		
Probeta	σ_c (MPa)	ρ (kg/m ³)	Probeta	σ_c (MPa)	ρ (kg/m ³)	Probeta	σ_c (MPa)	ρ (kg/m ³)
NR-1	18.95	2236	CR-1	10.23	2179	FR-1	14.65	2190
NR-2	18.16	2246	CR-2	10.32	2141	FR-2	14.24	2207
NR-3	19.13	2270	CR-3	10.50	2173	FR-3	13.72	2195
NR-4	19.49	2258	CR-4	10.77	2165	FR-4	14.71	2192
NR-5	19.89	2263	CR-5	10.48	2152	FR-5	14.46	2187
Prom.	19.13	2255	Prom.	10.46	2162	Prom.	14.36	2194
SD	0.65	13.47	SD	0.21	15.45	SD	0.40	7.82
CV	3.41	0.60	CV	1.97	0.71	CV	2.80	0.36
(%)			(%)			(%)		
Reducción de resistencia (%)			45			25		

Fuente: Elaboración propia (2022).

Resistencia a la tensión

Este ensayo arrojó datos similares a los de las pruebas de compresión. A continuación, se presentan los resultados para las pruebas de tensión indirecta. La resistencia a la tensión σ_t , la desviación estándar (SD), el coeficiente de variación (CV) y la reducción de la resistencia se muestran en la tabla 3 para las tres mezclas de concreto.

Nótese que la resistencia a la tracción para la mezcla de concreto de control se reporta en 2.29 MPa, y en 1.69 MPa y 1.77 MPa, para los concretos con caucho grueso y fino, respectivamente. La reducción de resistencia para el concreto con

caucho grueso es del 26%, mientras que para la mezcla con caucho fino es del 23%, lo que sugiere un mejor desempeño de esta última, en contraste con la que contenía caucho granulado grueso, en condiciones de carga de tracción indirecta.

La relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión es del 12% para el concreto simple y la mezcla con caucho fino; para el concreto con caucho grueso es del 16%. Estos resultados concuerdan con los informes de investigación (Arioglu, Girgin & Arioglu, 2006; Tajik, 2011). Esta relación podría dar un valor indirecto de la resistencia a la tracción cuando solo se conoce información de la resistencia a la compresión.

Tabla 3. Resistencia a la tensión.

Mezcla NR		Mezcla CR		Mezcla FR	
Probeta	σ_t (MPa)	Probeta	σ_t (MPa)	Probeta	σ_t (MPa)
NR-1	1.96	CR-1	1.62	FR-1	1.72
NR-2	2.21	CR-2	1.91	FR-2	1.75
NR-3	2.35	CR-3	1.70	FR-3	1.87
NR-4	2.40	CR-4	1.73	FR-4	1.81
NR-5	2.52	CR-5	1.48	FR-5	1.77
		CR-6	1.69	FR-6	1.73
Prom.	2.29	Prom.	1.69	Prom.	1.77
SD	0.22	SD	0.14	SD	0.06
CV (%)	9.51	CV (%)	8.29	CV (%)	3.17
Reducción de resistencia (%)			26		23

Fuente: Elaboración propia (2022).

Resistencia a la flexión

Para obtener la resistencia a la flexión en las mezclas de concreto, se construyeron 15 vigas, 5 probetas por cada mezcla. Los resultados de la resistencia a la flexión σ_f , desviación estándar, coeficiente de variación y reducción de la resistencia se reportan en la tabla 4. El CV para concreto con caucho grueso fue de 19.30%. Esta alta dispersión de datos se debe a la probeta CR-5, cuya resistencia a la flexión fue de 3.26 MPa. Si se omite este valor, la resistencia media a la flexión es $\sigma_f = 2.23$ MPa, desviación estándar 0.11, coeficiente de variación 5.03% y una reducción de la resistencia de 29 por ciento.

Conclusiones

En este trabajo se reportan los resultados derivados de un estudio experimental sobre el comportamiento mecánico de probetas de concreto de cemento Portland modificado con caucho granulado. Para el estudio se consideraron tres grupos de probetas con diferentes mezclas: uno de control, hechas de concreto simple sin agregado de caucho, y otros dos grupos elaborados con mezclas de concreto modificado, reemplazando el 10% en peso de los agregados pétreos por caucho. Se llevó a cabo un programa de prueba experimental, de acuerdo con las normas ASTM, para investigar la influencia del caucho granulado en la resistencia,

Tabla 4. Resistencia a la flexión.

Mezcla NR		Mezcla CR		Mezcla FR	
Probeta	σ_f (MPa)	Probeta	σ_f (MPa)	Probeta	σ_f (MPa)
NR-1	2.86	CR-1	2.13	FR-1	3.25
NR-2	3.09	CR-2	2.23	FR-2	2.97
NR-3	3.28	CR-3	2.18	FR-3	2.99
NR-4	3.00	CR-4	2.39	FR-4	3.06
NR-5	3.48	CR-5	3.26	FR-5	3.29
Prom.	3.14	Prom.	2.44	Prom.	3.11
SD	0.24	SD	0.47	SD	0.15
CV (%)	7.71	CV (%)	19.30	CV (%)	4.77
Reducción de resistencia (%)			22		1

Fuente: Elaboración propia (2022).

bajo condiciones de compresión uniaxial, tracción indirecta y flexión de estas mezclas de concreto a los 28 días de edad. Las principales conclusiones derivadas de estas investigaciones son que

1. El caucho granulado se puede usar como agregado en el concreto de cemento Portland, reemplazando parte del agregado pétreo, es decir, grava y arena. Su uso provoca una reducción de la resistencia del concreto y modifica su modo de falla.
2. Cuando el caucho granulado se incorporó parcialmente como agregado del concreto, la resistencia a la compresión de las muestras se redujo notablemente. Las probetas con caucho grueso tuvieron una reducción de la resistencia del 45%, mientras que en las probetas con caucho fino fue del 25%. Esto significa que en condiciones de compresión uniaxial el concreto con caucho fino muestra mejor comportamiento que la mezcla con caucho grueso.
3. Para la prueba de tracción indirecta, se observó un resultado similar, ya que la resistencia a la tracción para el concreto con caucho grueso disminuyó en 26%, en tanto que para el compuesto con caucho fino fue del 22%; los resultados muestran que el concreto con agregado fino presenta un mejor desempeño que el adicionado con caucho grueso.
4. Por último, la reducción de la resistencia a la flexión fue mayor para el concreto con caucho grueso, con 22%, que la reducción del 1% para la mezcla de concreto con caucho fino, cuyo desempeño, en condiciones de carga de flexión, fue casi igual a la resistencia del concreto simple.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias al apoyo otorgado por el proyecto PAPIIT IN116419, “Estudio del agrietamiento termomecánico de estructuras masivas de concreto”, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Referencias

- American Concrete Institute. (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*.
- American Society for Testing and Materials. (2010). *ASTM C293/C293M-10. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)*.
- American Society for Testing and Materials. (2011). *ASTM C496/C496M-11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- American Society for Testing and Materials. (2015a). *ASTM C192/C192M-15. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*.
- American Society for Testing and Materials. (2015b). *ASTM C39/C39M-15a. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- Arioglu, N., Girgin, Z. C., & Arioglu, E. (2006). The Evaluation of Ratio Between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength

- for Concretes Up to 120 Mpa and Its Applications in Strength Criterion. *ACI Materials Journal*, 103 (1), 18-24. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=15123>
- Batayneh, M. K., Marie, I., & Asi, I. (2008). Promoting the Use of Crumb-Rubber Concrete in Developing Countries. *Waste Management*, 28, 2171-2176. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.035>
- DeGroot, D. H. (2007). *Mexico-US Cross-Border Resolution of Waste Tire Disposal*. Proceedings of the 2007 Worlds Environmental and Water Resources Congress. [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)301](https://doi.org/10.1061/40927(243)301)
- Eldin, N. N., & Senouci, A. B. (1992). Use of Scraps Tires in Road Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 118(3), 561-576. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1992)118:3(561)
- Eldin, N. N., & Piekarski, J. (1993). Scrap Tires: Management and Economics. *Journal of Environmental Engineering*, 119, 1217-1232. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1993)119:6(1217)
- Gere, J. M. & Timoshenko, S. P. (1991). Chapter 5. Stresses in Beams. In *Mechanics of materials*. Springer-Science+Business Media.
- Ghaly, A. N., & Cahill, IV J. D. (2005). Correlation of Strength, Rubber Content, and water to cement ratio in rubberized concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(6), 1075-1081. <https://doi.org/10.1139/105-063>
- Girskas, G., & Nagrockiene, D. (2017). Crushed Rubber Waste Impact of Concrete Basic Properties. *Construction and Building Materials*, 140, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.107>
- Huang, B., Li, G., Pang, J., & Eggers, J. (2004). Investigation into Waste Tire Rubber Filled Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 187-194. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(187)
- Humphrey, D., & Blumenthal, M. (2010). *The Use of Tire-Derived Aggregated in Road Construction Applications*, Green Streets and Highways Conference 2010. ASCE 2011, 299-313. DOI: 10.1061/41148(389)25
- Khatib, Z. K., & Bayomy, F. M. (1999). Rubberized Portland Cement Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(3), 206-213. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:3(206)
- Li, G., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., & Huang, B. (2004), Development of Waste Tire Modified Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2283-2289. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.04.013
- Llantrac México (2022, 24 de junio). *Reciclaje de llantas en México, ¿cómo vamos?* <https://llantrac.com.mx/blog/reciclaje-de-llantas-en-mexico-como-vamos#:~:text=Se%20estima%20que%20en%20M%C3%A9xico,de%20unidades%20por%20C3%ADan%20ser%20reutilizadas.>
- Ma, F., Dai, J., Fu, Z., Liu, J., Dong, W., & Huang, Z. (2020, October). A New Type of Crumb Rubber Asphalt Mixture: A Dry

- Process Design and Performance Evaluation. *Applied Sciences*, 10, 372. DOI: [10.3390/app10010372](https://doi.org/10.3390/app10010372)
- Oden, J. T., & Ripperger, E. A. (1981). Chapter 4. Stresses and Stress Resultants in Bars. *In Mechanics of elastic structures*. McGraw-Hill.
- Presti, D. L. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for Road Asphalt Mixtures: A Literature Review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007)
- Retama, J., & Ayala, A. G. (2017). Influence of Crumb-Rubber in the Mechanical Response of Modified Portland Cement Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2017, 1-9. DOI: [10.1155/2017/3040818](https://doi.org/10.1155/2017/3040818)
- Sadowski, T., & Pietras, D. (2014). Description of Degradation Process of Rubberized Lean Concrete. *Solid State Phenomena*, 216, 67-72. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.216.67](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.216.67)
- Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of Waste Tire Rubber in Asphalt and Portland Cement Concrete: An Overview. *Construction and Building Materials*, 67B, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
- Tajik, N. (2011). Chapter 2. Factors Influencing on the Early Age Thermal Cracking. *In Early Age Thermal Cracking in Concrete Structures*. Lab Lambert Academic Publishing.
- Topcu, I. (1995). The Properties of Rubberized Concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 304-310. DOI: [10.1016/0008-8846\(95\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00014-3)
- Xue, G., & Pei, Z. (2018). Experimental Study on Axial Compressive Properties of Rubber Concrete at Low Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3), 1-8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002178](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002178)
- Youssf, O., Mills, J. E., & Hassanli, R. (2016). Assessment of the Mechanical Performance of Crumb Rubber Concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 175-183. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040)
- Zhang, Y., Liu, Z., & Peng, J. (2019). Silane Modification of Crumb Rubber on The Rheological Properties of Rubberized Asphalt. *Applied Sciences*, 9, 1-11. DOI: [10.3390/app9224831](https://doi.org/10.3390/app9224831)

Notas de los autores:

Jaime Retama Velasco
Profesor de Tiempo Completo de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM.
Profesor del Programa de la Especialización en Puentes de la División de Estudios de Posgrado e Investigación de la FES Aragón.
jretamav@comunidad.unam.mx

Ricardo Heras Cruz
Técnico Académico de los Laboratorios de la Licenciatura en Ingeniería Civil de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM.
ricardo_heras@yahoo.com.mx