

Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante

Recycled rubber in the compressive strenght and bending of modified concrete with plasticizing admixtrue

M. Farfán¹*, E. Leonardo *

* Universidad César Vallejo, Trujillo, PERÚ

Fecha de Recepción: 28/02/2018

Fecha de Aceptación: 29/05/2018

PAG 241-250

Abstract

The use of concrete made with recycled materials allows an alternative in the optimization and considerable reduction of resources during the manufacturing process of the components. The resistance to compression and bending in concrete of 210 Kg/cm² modified with plastifying additive at ages 7, 14 and 28 days were evaluated using recycled rubber of 5, 10 and 15% in its composition. Three experimental groups were included, with plastifying additive and recycled rubber, and two control groups, with and without plastifying additive. The resistance to compression reached maximum values of 218.45 Kg/cm² and 212.33 Kg/cm² at 5% and 10% rubber, respectively. As for the resistance to bending, a maximum value of 81.86 Kg/cm² was achieved for 10% rubber. The recycled rubber proved to be an excellent addition to be used in concrete mixtures despite the losses of mechanical strength, but by adding plastifying additive, it significantly improves making it possible to be incorporated into concrete up to 10%. By means of variance analysis with significance of 5%, it is concluded that the percentage of recycled rubber has a significant effect on the resistance to compression and bending in the manufacture of modified concrete with plastifying additive.

Keywords: Rubber, concrete, resistance, compression, bending

Resumen

La utilización de concreto elaborado con materiales reciclados permite tener una alternativa en la optimización y disminución considerable de recursos durante el proceso de fabricación de los componentes. Se evaluaron las resistencias a compresión y flexión en concreto de 210 Kg/cm² modificado con aditivo plastificante a edades 7, 14 y 28 días, usando en su composición caucho reciclado de 5, 10 y 15%. Se incluyeron tres grupos experimentales, con aditivo plastificante y caucho reciclado, y dos grupos control, con aditivo plastificante y sin él. La resistencia a la compresión logró valores máximos de 218.45 Kg/cm² y 212.33 Kg/cm² a 5% y 10% de caucho, respectivamente. Para la resistencia a flexión se logró un valor máximo de 81.86 Kg/cm² para 10% de caucho. El caucho reciclado demostró ser un excelente agregado a ser empleado en mezclas de concreto a pesar de las pérdidas de resistencia mecánica, pero agregándole aditivo plastificante mejora significativamente haciendo viable su incorporación en el concreto hasta en 10%. Mediante análisis de varianza con significancia de 5%, se concluye que el porcentaje de caucho reciclado tiene efecto significativo en la resistencia a compresión y flexión en la fabricación de concreto modificado con aditivo plastificante.

Palabras clave: Caucho, concreto, resistencia, compresión, flexión

1. Introducción

La eliminación de neumáticos, después de su tiempo de vida, afecta indiscutiblemente al medioambiente a nivel mundial, ya que al no ser biodegradables son depositados en vertederos incontrolados o simplemente son abandonados en zonas públicas. En el Perú, el problema ambiental de los desechos de neumáticos se genera por el escaso conocimiento en temas de gestión de residuos tanto por razones culturales como por la falta de políticas e investigaciones sobre la reutilización y disposición final de este tipo de residuo. Según el Ministerio de transportes y Comunicaciones (MTC, 2016), publicado en el diario oficial El Peruano, durante el período 2011 – 2014 el parque automotor se incrementó a una tasa promedio del 8.84% anual, pasando de 2 523,441 vehículos en 2011 a 3 252,714 en el 2014, y en consecuencia la cantidad de neumáticos como desecho crecieron exponencialmente.

Bajo este escenario la utilización de concreto elaborado con materiales reciclados permitirá una optimización y disminución considerable de recursos durante el proceso de fabricación de los componentes, en tal sentido la investigación evalúa la viabilidad técnica de incorporar residuos provenientes de neumáticos como materiales para la elaboración de concreto.

Siendo el caucho, como residuo de neumático, un material muy popular se han realizado muchas investigaciones que dan cuenta de la utilización de este material en elaboración del concreto, así tenemos a Ghosh y Bera (2016) quienes realizan una revisión exhaustiva y nos muestran que los agregados de neumáticos de caucho de desecho se pueden usar en concreto como reemplazo parcial de agregados gruesos y finos, obteniendo resultados que están en el límite aceptable. Thomas y Gupta (2015), analizando la bibliografía, también concluyen que este material de desecho puede ser un sustituto parcial del agregado en el concreto, el cual muestra una alta resistencia a la congelación-descongelación, al ataque ácido y penetración de iones cloruro. También afirman, que el uso de humo de sílice permite alcanzar una alta resistencia a los sulfatos, ácido y cloruro.

¹ Autor de correspondencia:

Universidad César Vallejo, Trujillo, PERÚ
E-mail: mfarfan@ucv.edu.pe



Así también, Pelisser et al. (2011) determinaron que el caucho neumático reciclado demuestra ser un excelente agregado que junto al hidróxido de sodio y humo de sílice mejora la resistencia a la compresión del concreto. Así mismo, Issa y Salem (2013), quienes utilizaron caucho molido como agregado fino en hormigón, lograron determinar resultados positivos de resistencia a compresión cuando el contenido de caucho es inferior al 25%, así también obtuvieron mejoras en la ductibilidad. También, Netravati (2017) determinó que la combinación de caucho de neumáticos y cenizas volantes da buena calidad en resistencia a la compresión y flexión de hormigón. Por su parte, Chauhan y Sood (2017) concluyen que adicionando partículas de caucho de neumáticos le da características dúctiles al hormigón, además, desarrolla la capacidad de soportar la carga incluso después de que se alcanza la formación de grietas y la carga máxima.

Es de resaltar que la calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y del agregado, y de la unión entre los dos. En un concreto adecuadamente preparado, cada y toda partícula de agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan totalmente (Kosmatka et al., 2004).

De otro lado, Tung-Chai (2011) usó contenido de caucho entre 5% a 50% como reemplazo del volumen de arena para formular ecuaciones lineales y logarítmicas para predecir la densidad y resistencia a la compresión de bloques de concreto. Cabe resaltar que el tipo y tamaño de las partículas del agregado de caucho reciclado es factor condicionante para mejorar la predicción.

Otro componente no menos importante en la mezcla de concreto es el aditivo plastificante o superplastificante, usado específicamente para reducir cantidad de agua en la mezcla (Rivera, 2009), componente que ayuda a mantener o mejorar la resistencia a la compresión de la mezcla (Mayta, 2014).

2. Discusión y desarrollo

2.1 Material y métodos

Para cumplir con los objetivos planteados se realizó una caracterización de los agregados fino y grueso; y con estos materiales se realizó, por medio del método ACI 210, el diseño de mezclas de concreto para una resistencia de 210 kg/cm². Se fabricaron cinco tipos de mezclas, concreto simple (CS), CS más aditivo plastificante (CSAP), CSAP más 5% en volumen de caucho reciclado (CSAP5CR), más 10% de caucho reciclado (CSAP10CR) y 15% de caucho reciclado (CSAP15CR). A cada una de las mezclas en estado plástico se le efectuaron pruebas de asentamiento, y en estado endurecido se midieron resistencia a la compresión en cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto para edades 7, 14 y 28 días. Las pruebas de flexión se realizaron en vigas de 150 mm x 150 mm x 500 mm a la edad de 28 días. Se elaboraron en total 45 probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto.

La caracterización de los agregados para producir el concreto usado en las pruebas, se seleccionaron cumpliendo los requisitos de especificación de las normas técnicas peruanas NTP 400.011 2013, NTP 400.037 2014 y ASTM C33 2016. Las gravas y arenas provenían de un proveedor de materiales DINO Arvesac, se les realizaron las pruebas de análisis granulométrico, peso específico y absorción, peso

unitario y contenido de humedad, según las normas ASTM C-136 2016, C-128 2016, C-29 2016 y C-566 2016 respectivamente. El cemento utilizado fue Pacasmayo Extraforte (Tipo I), el cual cumple con la NTP 334.090 2016. El agua usada para el mezclado y curado de las muestras es la que provenía de la red de agua para consumo humano de la ciudad de Trujillo. En el caso del aditivo, se usó Sika® Cem súper plastificante reductor de agua, el cual cumple con la norma ASTM C 494 2016. A este aditivo no se le realizaron pruebas de control, ya que fueron entregados certificados por el proveedor. El caucho reciclado triturado fue obtenido de neumáticos desechados en botaderos y talleres de mecánica, el cual se usó sin separación de textiles ni acero de su composición. El tamaño de la partícula de caucho fue de 0.5 cm de diámetro.

El diseño de la mezcla de concreto se realizó siguiendo el procedimiento ACI 210, estableciendo como dato de entrada la resistencia a la compresión de 210 kg/cm², con asentamiento de 4" para concreto simple y 5.5" para concreto con aditivo plastificante. Las proporciones de caucho reciclado para la fabricación de las probetas cilíndricas se establecieron en 5%, 10% y 15% de volumen en concreto con plastificante. Adicionalmente, se conformaron muestras de control sin plastificante y con plastificante solamente para cuantificar las variaciones en las propiedades estudiadas. Igualmente, se realizó el mismo procedimiento para las vigas sometidas a flexión.

Las pruebas del concreto en estado plástico y en estado endurecido se realizaron a diferentes edades, siendo en estado plástico las pruebas de asentamiento y en estado endurecido los ensayos a la compresión en cilindros y flexión en vigas. Las pruebas de asentamiento se realizaron bajo la norma NTP 339.035 2015 y ASTM C 143 2016, permitiendo establecer una comparación con la muestra control. Las pruebas de compresión en cilindros de concreto se realizaron de acuerdo a la norma ASTM C39 2016.

Las pruebas a flexión se realizaron sobre las vigas de 150 mm x 150 mm x 500 mm, bajo la norma ASTM C293, ambos tipos de especímenes experimentaron un proceso de curado con inmersión en agua en condiciones controladas de acuerdo con la norma ASTM C 192M. El número de vigas fabricadas fue de 15, de las cuales 6 fueron control (con y sin plastificante) y 9 con porcentaje de caucho reciclado al 5%, 10% y 15% de volumen.

Los resultados de ensayos a la compresión se procesaron usando el análisis de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias de resistencias entre los grupos de probetas. Posteriormente se utilizó la prueba para comparaciones múltiples, Tukey, para identificar cuáles de los pares de grupos son significativamente diferentes entre sí, a un nivel de significancia de 5%.

2.2 Resultados

A continuación presentamos cada uno de los resultados obtenidos en la ejecución de las actividades definidas en la metodología de trabajo.

2.2.1 Caracterización físico-química de materiales y diseño de mezclas

Las figuras 1 y figura 2 presentan la granulometría obtenida en los ensayos realizados al agregado fino y grueso, respectivamente.

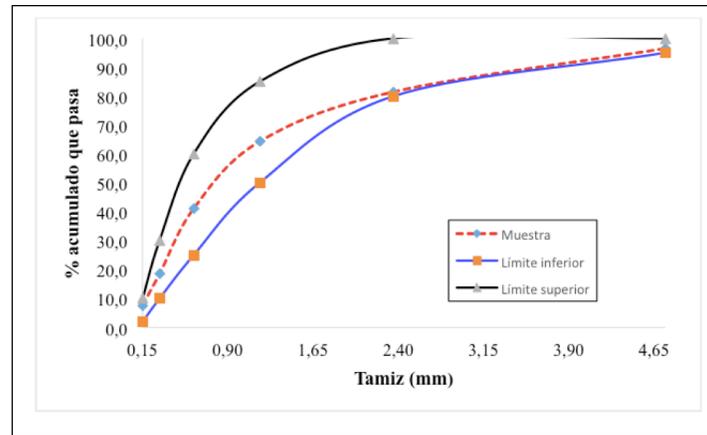


Figura 1. Granulometría del agregado fino – Límites especificación ASTM C33 2016

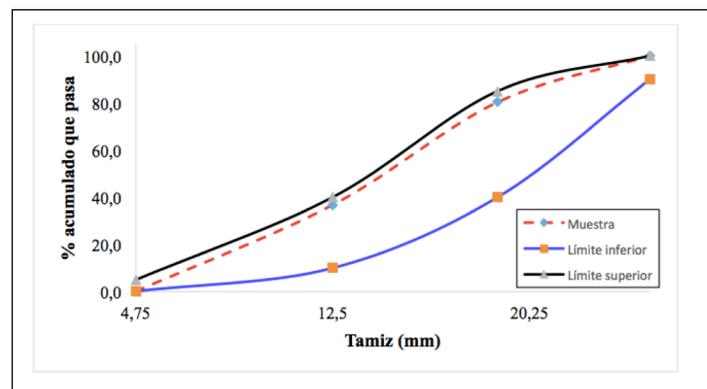


Figura 2. Granulometría del agregado grueso – Límites especificación ASTM C33

Los resultados sobre las características físico-químicas y mecánicas del Cemento Pacasmayo Extraforte (Tipo I), se encuentran en la tabla 1, proporcionadas por el fabricante. El diseño de la mezcla de concreto se realizó siguiendo el procedimiento ACI-2010, y fue ajustado con la incorporación

de un aditivo súper plastificante reductor de agua. La dosificación del aditivo se realizó según recomendación del fabricante; siendo las proporciones usadas en la mezcla de concreto como se indica en la tabla 2 y tabla 3.

Tabla 1. Características físico-químicas y mecánicas del cemento

Propiedades químicas	Requisito NTP 334.090	Resultado	Verificación
MgO	Máximo 6.0%	1.3%	Cumple
SO ₂	Máximo 4.0%	1.99%	Cumple
Propiedades físicas y mecánicas			
Contenido de aire	Máximo 12%	6%	Cumple
Expansión de autoclave	Máximo 0.80%	0.065%	Cumple
Superficie esférica	No específica	5020 cm ² /g	Cumple
Retenido en tamiz N°325	No específica	3.2%	Cumple
Densidad	No específica	3.00 g/mL	Cumple
Fraguado inicial	Mínimo 45 min	111 min	Cumple
Fraguado final	Mínimo 420 min	260 min	Cumple
Resistencia a compresión a 3 días	Mínimo 133 kg/cm ²	245 kg/cm ²	Cumple
Resistencia a compresión a 7 días	Mínimo 204 kg/cm ²	288 kg/cm ²	Cumple
Resistencia a compresión a 28 días	Mínimo 255 kg/cm ²	330 kg/cm ²	Cumple

Tabla 2. Diseño de mezcla de concreto simple para 210 Kg/cm² con relación a/c de 0.6

Material	Proporción en peso	Pesos (Kg)	% de mezcla
Cemento	1.00	386	15.72
Agua	0.60	232	9.45
Grava	2.25	869	35.38
Arena	2.51	969	39.45
Total para 1m		2456	100.0

Tabla 3. Diseño de mezcla para 210 Kg/cm² con aditivo plastificante y relación a/c de 0.48

Material	Proporción en peso	Pesos (Kg)	% de mezcla
Cemento	1.00	386	15.98
Agua	0.48	186	7.70
Grava	2.25	869	35.98
Arena	2.51	969	40.12
Plastificante	0.014	5.44	0.225
Total para 1m		2415.44	100.0

2.2.2 Pruebas en estado plástico y ensayos mecánicos en estado endurecido

Los ensayos de las muestras en estado fresco se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Asentamiento del concreto en estado fresco

Mezclas	Relación a/c	Slump máximo (pulg)	% variación
CS*	0.60	4	0%
CSAP**	0.48	5.5	38%
CSAP5CR**	0.48	5.5	38%
CSAP10CR**	0.48	5.7	43%
CSAP15CR**	0.48	5.8	45%

*relación a/c=0.60

**relación a/c=0.48

Los ensayos de las muestras en estado endurecido se muestran en la tabla 5, figura 3, figura 4 y figura 5 en cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto, y para

vigas de 150 mm x 150 mm x 500 mm se muestra en la tabla 6 y figura 6.

Tabla 5. Resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido

Mezcla	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)						Deformación máxima (mm/1000)
	7 días	% alc.	14 días	% alc.	28 días	% alc.	
CS*	164.3	78%	197.95	94%	219.06	104%	4571.72
CSAP**	209.96	100%	251.37	120%	295.73	141%	6395.50
CSAP5CR**	152.916	73%	176.946	84%	218.452	104%	6808.53
CSAP10CR**	152.882	73%	180.486	86%	212.337	101%	6934.77
CSAP15CR**	149.156	71%	169.043	81%	198.875	95%	7451.99

*relación a/c=0.60

**relación a/c=0.48

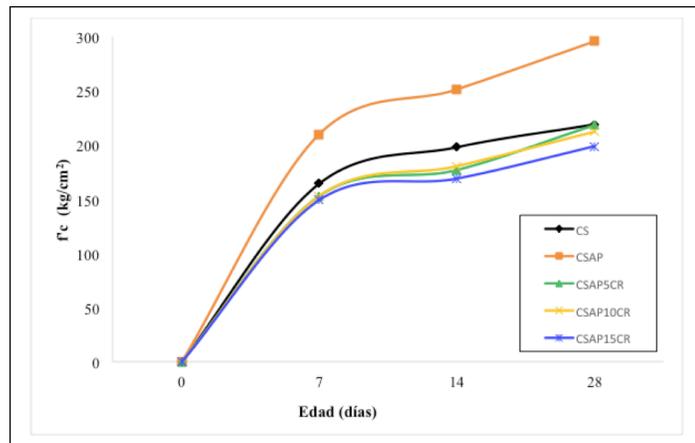


Figura 3. Resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido según tiempo de curado.

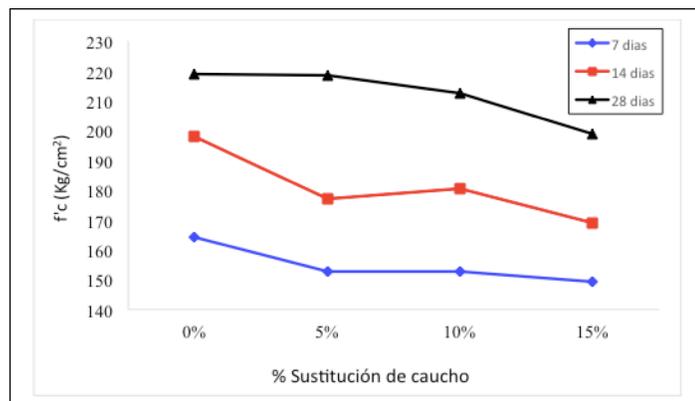


Figura 4. Resistencia a la compresión según porcentaje de caucho reciclado.



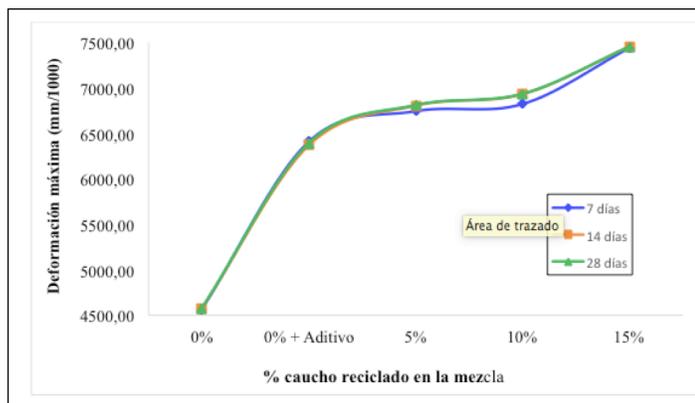


Figura 5. Deformación máxima según porcentaje de caucho reciclado.

Tabla 6. Resistencia a la flexión del concreto en estado endurecido

Mezcla	Resistencia a la flexión (Kg/cm ²)	Deflexión máxima (mm/1000)
	28 días	
CS*	83.580	3577.94
CSAP**	102.092	3318.09
CSAP5CR**	71.219	2454.95
CSAP10CR**	81.861	3578.18
CSAP15CR**	77.768	3814.69

*relación a/c=0.60

**relación a/c=0.48

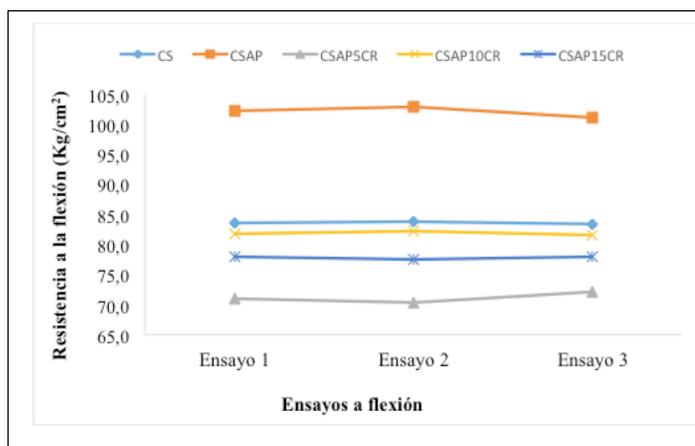


Figura 6. Resistencia a flexión en concretos de 28 días de curado a diferentes proporciones de caucho reciclado.

2.2.3 Análisis estadístico de resultados

Todas las muestras cumplieron con la prueba de normalidad ($p > 0.05$) según la edad de los cilindros de concreto. El análisis de varianza y la prueba de comparación

múltiple – Tukey, de las resistencias a la compresión y flexión en los cinco tratamientos independientes, se muestra en las tablas 7, 8, 9 y 10.

Tabla 7. Análisis de varianza (ANOVA) para los datos de resistencia a la compresión según edad de cilindros de concreto

Edad de cilindros	Media	Desviación estándar	F	Significancia (p)*
7 días	165,84	23,44	3040,869	0,000
14 días	195,16	30,71	2784,031	0,000
28 días	228,89	35,40	59034,331	0,000

*La diferencia de medias es muy significativa en el nivel 0.01 ($p < 0,01$)

En cuanto al efecto del porcentaje de caucho reciclado, según los días de curado, en la tabla 7 se observa que existe diferencias muy significativas ($p < 0,01$) en los cilindros de concreto tanto para 7, 14 y 28 días de curado. En la tabla 9 se hace notar que a los 28 días de curado no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las resistencias de las muestras CSAP5CR y CS. En todos los

demás casos se muestran diferencias muy significativas ($p < 0,01$). Para el análisis a flexión, se observa en la tabla 8, que las muestras de vigas presentan diferencias muy significativas ($p < 0,01$) en su diferencia de medias. Así mismo, en las comparaciones múltiples de la tabla 10 sólo en las muestras CS y CSAP10CR la diferencia de medias no es significativa ($p > 0,05$).

Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA) para los datos de resistencia a la flexión según muestras de vigas de concreto a 28 días de edad

Muestras	Media	Desviación estándar	F	Significancia (p)*
CS	83,57	0,208	896,995	0,000
CSAP	102,10	0,954		
CSAP5CR	71,13	1,050		
CSAP10CR	81,87	0,3511		
CSAP15CR	77,77	0,231		

*La diferencia de medias es muy significativa en el nivel 0.01 ($p < 0,01$)

Tabla 9. Comparación múltiple entre las muestras de cilindros de concreto según edad

Muestras	CS	CSAP	CSAP5CR	CSAP10CR	CSAP15CR
7 días					
CS	-----	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**
CSAP	0,000**	-----	0,000**	0,000**	0,000**
CSAP5CR	0,000**	0,000**	-----	1,000	0,000**
CSAP10CR	0,000**	0,000**	1,000	-----	0,000**
CSAP15CR	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	-----
14 días					
CS	-----	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**
CSAP	0,000**	-----	0,000**	0,000**	0,000**
CSAP5CR	0,000**	0,000**	-----	0,017*	0,000**
CSAP10CR	0,000**	0,000**	0,017*	-----	0,000**
CSAP15CR	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	-----
28 días					
CS	-----	0,000**	0,123	0,000**	0,000**
CSAP	0,000**	-----	0,000**	0,000**	0,000**
CSAP5CR	0,123	0,000**	-----	0,000**	0,000**
CSAP10CR	0,000**	0,000**	0,000**	-----	0,000**
CSAP15CR	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	-----

*La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05 ($p < 0,05$)

**La diferencia de medias es muy significativa en el nivel 0.01 ($p < 0,01$)



Tabla 10. Comparación múltiple entre las muestras de vigas de concreto según composición de la mezcla.

Muestras	CS	CSAP	CSAP5CR	CSAP10CR	CSAP15CR
CS	-----	0,000**	0,000**	0,066	0,000**
CSAP	0,000**	-----	0,000**	0,000**	0,000**
CSAP5CR	0,000**	0,000**	-----	0,000**	0,000**
CSAP10CR	0,066	0,000**	0,000**	-----	0,000**
CSAP15CR	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	-----

2.3 Discusión de resultados

2.3.1 Asentamiento del concreto fresco

De la tabla 4 podemos observar que el asentamiento en las mezclas de concreto tuvo un incremento de 38 a 45%, respecto al concreto simple, en concretos con contenidos de caucho de 5 a 15% más aditivo plastificante. Sin embargo Maldonado et al. (2016), solo reportaron incrementos en el asentamiento entre 1 a 3% al usar caucho reciclado. Por su parte Bravo y Brito (2012) también determinaron incrementos de asentamiento de 11 a 25% y de 14 a 16% en concretos con 10% y 15% de caucho reciclado, respectivamente, en reemplazo de agregados finos y gruesos. De otro lado, Mayta (2014) al usar plastificantes a diferentes dosis obtuvo incrementos promedio mínimo de 47.9% y 139.6% como máximo. Se observa claramente que esta diferencia sustancial se debe principalmente al aditivo plastificante utilizado en la mezcla de concreto, ya que asegura una fluidez limitada para que el concreto pueda acomodarse con facilidad.

2.3.2 Resistencia a la compresión

Las mediciones de resistencia a la compresión, en tabla 5, nos muestran que únicamente la mezcla de concreto con aditivo plastificante alcanzó la resistencia esperada en las tres edades de estudio, así también lo confirman Reina et al. (2010) quienes encontraron que la resistencia alcanzada a los 28 días superó a la resistencia en estudio. Por su parte Mayta (2014) también logró determinar que usando aditivo superplastificante se supera a la resistencia en estudio desde los 3 hasta 28 días de curado. Podemos decir que este incremento en la resistencia se debería a las propiedades de los aditivos plastificantes o también conocidos como reductores de agua y se vería evidenciado en la reducción de la relación a/c de 0.6 a 0.48 con lo cual se habría logrado dicho incremento.

Para las muestras con diferentes contenidos de caucho reciclado, las resistencias encontradas estuvieron hasta 29% por debajo de la resistencia de diseño para edades de 3 y 14 días de curado. Solo a la edad de 28 días se superó a la resistencia de diseño en las muestras con 5 y 10% de caucho y aditivo plastificante. Se evidencia que el incremento de la resistencia a la compresión del concreto obedece a la influencia del tiempo de curado, notándose (tabla 5) que a 7 días la resistencia alcanzada en promedio por las mezclas en estudio es aproximadamente 79%, para 14 días es 93% y para 28 días se llegó a alcanzar 109% respecto a la resistencia de diseño (210 Kg/cm² para 28 días).

También, Bravo y De Brito (2012) determinaron que cuando se reemplaza un agregado fino por caucho la caída en la resistencia a la compresión a 28 días alcanza el 50%. Por su parte, Torres (2014) utilizando únicamente caucho reciclado tipo Grass de llantas en desuso logró superar la resistencia de diseño (21 MPa) sólo a los 90 días para proporciones de caucho de 10 y 20%. Como se observa en la figura 3 esta propiedad mejora con ensayos a largo plazo, aunque también es cierto que conforme se incrementa el porcentaje de caucho la resistencia tiende a disminuir, como se observa en la figura 4. Al respecto Valadares et al. (2012) sostiene que la resistencia a la compresión se ve afectada y reducida por la incorporación de caucho molido, pero este problema se podría compensar con la incorporación de hidróxido de sodio y humo de sílice (en nuestro caso aditivo plastificante), como lo sostienen Pelsser et al. (2011). Respecto a la deformación máxima alcanzada, vemos en la figura 5 que las deformaciones tienden a incrementarse a medida que las adiciones de caucho aumentan, siendo el valor más alto alcanzado 7451.99 mm/1000 para la mezcla con caucho al 15%, el cual representa un 63% superior respecto al diseño de concreto simple sin aditivo (CS).

2.3.3 Resistencia a la flexión

En la tabla 6 se muestran los valores promedios de la resistencia a flexión a los 28 días de curado, en vigas de 150mmx150mmx500mm, resaltando la mezcla de concreto simple con aditivo plastificante (CSAP) siendo 22% superior a la resistencia a flexión de la muestra control (CS). Las mezclas con diferentes porcentajes de caucho tienen tendencia a disminuir la resistencia, aunque obtuvo un mejor comportamiento la que incorporaba 10% de caucho siendo 2% menor que la muestra control, como se ve en la figura 6. Maldonado et al. (2016) también determinaron que el concreto con caucho disminuye hasta un 8% la resistencia a la flexión, aduciendo que las incrustaciones de caucho en la estructura del cilindro de concreto no permitía que este se destruyera y lograba tener mayor capacidad de resistencia. Comportamientos similares del caucho se dieron en ensayos de resistencia a la compresión y a la tracción como lo reportan Albano et al. (2007). Estrada (2016) también reporta disminución en la resistencia al usar caucho en hormigones, presentando disminuciones entre 22% y 44% para diferentes edades y proporciones de caucho grueso como sustituto del agregado fino.

SPANISH VERSION.....

2.3.4 Análisis estadístico

En cuanto al efecto de la dosificación de caucho en la resistencia a la compresión del concreto, en la tabla 7 se observa que existen variaciones muy significativas ($p < 0,01$) entre las resistencias de las muestras, para cada grupo de edad. Esto estaría reafirmando que los componentes del concreto juegan un rol fundamental en esta propiedad mecánica. De forma similar ocurre para la resistencia a flexión de la tabla 8, donde sus resistencias muestran un comportamiento diferenciado, alcanzando un mejor desarrollo de esta propiedad la muestra CSAP10CR. A través de la tabla 9 se da cuenta de las comparaciones múltiples entre las muestras, mostrando que a 7 días de curado las muestras con proporciones de caucho ya tienden a diferenciarse de la muestra patrón (CS) pero las muestras CSAP5CR y CSAP10CR tienen un comportamiento similar ($p > 0,05$). A 14 días estas diferencias persisten aunque están por debajo de las de diseño. A los 28 días las muestras CSAP5CR tiene comportamiento similar a CS, no mostrando diferencias significativas ($p > 0,05$), no siendo así en los otros casos en donde se evidencia diferencias muy significativas ($p < 0,01$) entre CAAP10CR y CSAP15CR, y frente a la muestra patrón (CS y CSAP). Por tanto, se evidencia que la presencia de caucho como componente estructural del concreto influye en sus propiedades mecánicas, en particular en la resistencia a la compresión.

De la tabla 10 podemos inferir que la muestra CSAP10CR tiene un mejor comportamiento y similar a la

muestra control (CS), logrando desarrollar una mejor resistencia a la flexión que las muestras con porcentajes de caucho 5 y 15%.

3. Conclusiones

El porcentaje óptimo de caucho reciclado para lograr la resistencia máxima a la compresión del concreto (218.452 Kg/cm²) es del 5%, a los 28 días.

El porcentaje óptimo de caucho reciclado para lograr la máxima resistencia a la flexión del concreto (81.861 Kg/cm²) es 10%.

Es factible utilizar caucho reciclado en combinación con aditivo plastificante para recuperar significativamente la resistencia mecánica hasta en un 10%, además contribuye a disminuir los efectos negativos que generan los desechos de caucho en el medio ambiente.

La resistencia a la compresión se ve afectada por el reemplazo de agregado natural por agregado de caucho de neumáticos en desuso, con una reducción de aproximadamente 12% para una proporción de reemplazo del 15%.

El caucho de llantas de desecho se presenta como una excelente alternativa de agregado en la preparación de concreto, y puede usarse en estructuras donde hay poca intensidad sísmica.

4. Referencias

- Albano C., Camacho N., Hernández M., Bravo A. J., Guevara H. (2007)**, Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas. Revista de la facultad de ingeniería, 23(1): 67-75.
- ACI (2010)**, Diseño de mezclas de concreto. American Concrete Institute (ACI).
- ASTM C33 (2016)**, ASTM C33 Especificación normalizada para agregados para concreto. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C136 (2016)**, ASTM C136 Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C128 (2016)**, ASTM C128 Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (Gravedad Específica), y la absorción de agregados finos. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C29 (2016)**, ASTM C29 Método de ensayo estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de huecos en los agregados. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C566 (2016)**, ASTM C566 Método de ensayo normalizado para medir el contenido total de humedad evaporable en agregados mediante secado. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C494 (2016)**, ASTM C494 Especificación normalizada de aditivos químicos para concreto. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C143 (2016)**, ASTM C143 Método de ensayo normalizado para asentamiento de concreto de cemento hidráulico. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C39 (2016)**, ASTM C39 Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C293 (2016)**, ASTM C293 Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión del hormigón (utilizando una viga simple Con punto central de carga). American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C192M (2016)**, ASTM C192M Práctica normalizada para Preparación y Curado de especímenes de Concreto para Ensayo en laboratorio. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Bravo M., De Brito J. (2012)**, Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance. Journal of Cleaner Production, 25: 42-50, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.066>.
- Chauhan M., Sood H. (2017)**, Rubber Modified Concrete- A Green Approach For Sustainable Infrastructural Development. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(6): 973-978. <https://www.irjet.net/volume4-issue6>.
- Estrada J. (2016)**, Estudio de propiedades físico mecánicas y de durabilidad del hormigón con caucho (Tesis de Master). Barcelona: Universidad
- Ghosh S. K., Bera D.K. (2016)**, Fundamental properties of self-compacting concrete utilizing waste rubber tires-a review. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 5(1): 254-261, doi: <https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0501051>.
- Issa C., Salem G. (2013)**, Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. Construction and Building Materials, 42: 48-52, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.054>.
- Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., Tanesi J. (2004)**, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, p. 186, Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association.



- Maldonado M., Blanco J., Ángel S. (2016)**, Análisis de la influencia del uso de caucho reciclado tratado con NaOH usado como adición en concreto normal. (Analysis of the influence of the use of recycled rubber treated with NaOH as an admixture in normal concrete). (p.). Inédito. Doi: <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.1064.2806>.
- Mayta J. (2014)**, Influencia del aditivo superplastificante en el tiempo de fraguado, trabajabilidad y resistencia mecánica del concreto, en la ciudad de Huancayo (Tesis para el título de ingeniero civil). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/403>.
- Ministerio de transportes y Comunicaciones (2016)**, Resolución Ministerial N° 246-2016 MTC/01.02 de Proyecto de decreto supremo que modifica el Reglamento Nacional de Inspecciones Técnicas Vehiculares y el Texto Único Ordenado del Reglamento Nacional de Tránsito. Separata especial del diario oficial El Peruano. Lima. <http://busquedas.elperuano.pe/download/url/proyecto-de-decreto-supremo-que-modifica-el-reglamento-nacio-resolucion-ministerial-no-246-2016-mtc0102-1369742-1>
- Netravati Y Banasode (2017)**, Investigation Performance by Relatively Substitution of Cement and Coarse Aggregate by Fly ash and Waste Tire Rubber in Concrete. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(10): 1615-1619. <https://www.irjet.net/volume4-issue10>.
- NTP 400.011 (2013)**, NTP 400.011 Agregados. Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos). Norma Técnica Peruana (NTP).
- NTP 400.037 (2014)**, NTP 400.037 Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto. Norma Técnica Peruana (NTP).
- NTP 334.090 (2016)**, NTP 334.090 Cementos. Cemento Portland adicionados. Requisitos. Norma Técnica Peruana (NTP).
- NTP 339.035 (2015)**, NTP 339.035 Concreto. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland. 4a. Edición. Norma Técnica Peruana (NTP).
- Pelisser F., Zavarise N., Longo T. A., Bernardin A. M. (2011)**, Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. Journal of Cleaner Production, 19(6-7): 757-763, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.014>.
- Reina J., Sánchez M., Solano E. (2010)**, Influencia de la tasa de aditivo superplastificante, en las propiedades del concreto de alta resistencia en estado fresco y endurecido (Tesis para título de ingeniero civil). San Salvador: Universidad de El Salvador. http://ri.ues.edu.sv/2242/1/Influencia_de_la_tasa_de_aditivo_superplastificante%2C_en_las_propiedades_del_concreto_de_alta_resistencia_en_estado_fresco_y_endurecido.pdf.
- Rivera G. (2009)**, Tecnología del concreto y mortero, p. 235, Ciudad del Cauca: Universidad del Cauca.
- Thomas B., Gupta R. (2015)**, A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54(2016): 1323-1333, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>.
- Torres H. (2014)**, Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho (Tesis de Magister). Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito. <http://repositorio.esuelaing.edu.co/handle/001/169>.
- Tung-Chai L. (2011)**, Prediction of density and compressive strength for rubberized concrete blocks. Construction and Building Materials, 25(11): 4303-4306, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.074>.
- Valadares F., Bravo M., De Brito J. (2012)**, Concrete with Used Tire Rubber Aggregates: Mechanical Performance. Aci Materials Journal, 109(3): 283-292, doi: <https://doi.org/10.14359/51683818>.

