

## Influencia del polímero reciclado de neumáticos y los elementos de mezcla en la optimización de la resistencia a la compresión en unidades de albañilería

Influence of the recycled polymer of tires and the elements of mixture in the optimization of the resistance to the compression in units of masonry

**Edinson Guillermo Portilla Amaro; Martin Taboada Neira\*; Jorge Vera Alvarado**

Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n. Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

\* Autor correspondiente: [martin.taboada@hotmail.com](mailto:martin.taboada@hotmail.com) (M. Taboada).

Fecha de recepción: 13 11 2018. Fecha de aceptación: 17 12 2018.

### RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo determinar la resistencia a la compresión óptima de unidades de albañilería mediante la adición de polímeros reciclados de los neumáticos y elementos de mezcla. Para el estudio se utilizó un diseño de Mezclas Simplex-Lattice (DML-S) de tres factores aumentado, para un slump 2"- 3", que permitió evaluar el efecto de los componentes: Piedra, Arena y Polímero; y una proporción constante de A/C = 0,83, sobre la resistencia a la compresión. Los resultados mostraron que los elementos de mezcla con un 50% de piedra, 38% de arena fina y 2% de polímero, presentó la mayor resistencia de 126.21 kg/cm<sup>2</sup>. El modelo ajustado de regresión cubico para la optimización alcanzó el valor de 129,37 Kg/cm<sup>2</sup>, con proporciones de 2,4% del polímero, 47,6% de arena y 50% piedra. Con respecto a los elementos de mezcla se concluye que, en la medida que aumenta el contenido de polímero la resistencia a la compresión disminuye y en la medida que los contenidos de piedra y arena se incrementan, la resistencia a la compresión aumenta respectivamente. La combinación óptima para la maximizar de la resistencia a la compresión se dio en valores bajos de polímero, valores altos de piedra y valores intermedios de arena.

**Palabras clave:** polímero reciclado; diseño de mezcla; construcciones; mampostería. .

### ABSTRACT

The objective of the research was to determine the optimal compressive strength of masonry units by adding recycled polymers from tires and mixing elements. For the study a design of Mixed Simplex-Lattice (DML-S) of three factors was used, for a slump 2" - 3", which allowed to evaluate the effect of the components: Stone; Arena and Polymer; and a constant proportion of A / C = 0.83, on the resistance to compression. The results showed that the elements of mixture with 50% stone, 38% fine sand and 2% polymer, showed the highest resistance of 126.21 kg / cm<sup>2</sup>. The adjusted cubic regression model for optimization reached the value of 129.37 Kg / cm<sup>2</sup>, with proportions of 2.4% of the polymer, 47.6% of sand and 50% of the stone. With respect to the mixing elements, it is concluded that, as the polymer content increases, the compressive strength decreases and as the content of stone and sand increases, the compressive strength increases respectively. The optimal combination for the maximization of the compressive strength was given by low polymer values, high stone values and intermediate sand values.

**Key words:** Recycled polymer; mix design; constructions; masonry.

## INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción consta en su mayoría de procedimientos artesanales, siendo el concreto el material más utilizado en el mundo de la construcción, tanto en edificios como en obras de Ingeniería civil, por lo que resulta de gran importancia un buen control de calidad de este material y sus componentes (Bendezú, 2009).

Los neumáticos son los que más problemas ha traído al medio ambiente por la dificultad en su destrucción una vez que ha cumplido su vida útil (Delarze, 2008). Los neumáticos fuera de uso (NFU) procedentes del parque automotor, aproximadamente 800 millones se descartan anualmente en todo el mundo y se estima que está cifra aumenta en un 2% cada año (Sienkiewicz *et al.*, 2017).

Como la naturaleza no es capaz de asimilar por sí misma los componentes altamente contaminantes de los NFU, es fundamental reciclarlos de manera correcta. En países de América como México (ciudad de Morelos) se desechan 28 millones de neumáticos al año y se recolectan 500 toneladas de NFU (Teorema ambiental, 2016). En Bolivia (ciudad de Santa Cruz) son almacenados unas 275,000 llantas en el Botadero y 3 mil a 4 mil llantas en desuso se recolectan por semana (Bravo *et al.*, 2015).

La disposición final de los NFU en el año 2016 en España, el 12% se destinó a recauchutado, 53% se prepararon en sus componentes (acero, caucho y fibra textil), solo el 0,1% se destinó a obra civil, 34% se utilizó en el coproceso de fabricación de cemento (SIGNUS, 2017). En Colombia el 71,9% es para uso energético (combustible), el 17,2% se reencaucha, el 6,2% tiene uso artesanal, el 2,3% se utiliza para regrabado y el resto se destina para otros usos (Caracol radio, 2017).

En Perú no se registra información actual sobre la disposición final de los residuos de neumáticos. Sin embargo, un estudio realizado en el año 2006, señala que el 80% de estos residuos, se encontraron en espacios públicos y el resto se destinó como combustible y usos recreativos en parques infantiles (Andrade *et al.*, 2013).

La adición de partículas de caucho (CR) o las fibras parcialmente recubiertas de

polvo de caucho (FCR) reduce la densidad del concreto y aumenta su porosidad abierta, incluso el hormigón se vuelve más ligero; y el concreto con CR o FCR puede considerarse como concreto liviano de acuerdo con la guía ACI 213R-03 (Flores *et al.*, 2016).

La incorporación combinada de 20% residuos uno de caucho de neumáticos en agregado fino (RW) con 5% y 7,5% ladrillos como relleno (BW) condujo a la disminución de la absorción de agua y contracción a los 28 días; el deterioro de resistencia a la compresión y a la flexión inducidos por la incorporación de los áridos RW se puede minimizar significativamente mediante la introducción de cargas de BW debido a su capacidad para compactar las mezclas y su puzolanicidad (Boukour y Benmalek, 2016). El mortero que contiene caucho reciclado (RRA) superior al 3% es sensible a temperaturas elevadas. Hasta este límite, se puede utilizar este material en forma segura, sin ningún riesgo de combustión en caso de incendio (Guelmine *et al.*, 2016).

En relación a una mezcla con partículas de caucho sustituidas parcialmente por agregados finos (arena natural) en múltiplos de 2,5%, con proporciones agua-cemento de 0,4, 0,45 y 0,5; los resultados señalaron que la resistencia a la compresión disminuyó hasta el 50% con las proporciones, cuando el porcentaje de partículas de caucho alcanzó el 20% de los agregados finos, que puede utilizar para el reemplazo parcial de agregados finos naturales hasta un 7,5%, sin una reducción suficiente de la resistencia deseada, pudiendo ser recomendado para la construcción de pavimentos, trabajos estructurales (hasta 7,5% de sustitución) y trabajos no estructurales (Blessen *et al.*, 2014).

La influencia de la sustitución parcial del árido fino por polvo de neumático fuera de uso (PNFU), comparando las propiedades físicas y mecánicas de los morteros con sustituciones de 5, 10, 15% del volumen de arena por dos cauchos granulados (diámetro inferior a 0.8 mm), por sustitución parcial, disminuye la resistencia a la flexión y a compresión de los hormigones, pero aumenta la tenacidad, la resistencia al impacto y aislamiento térmico y acústico. Además, no recomiendan la sustitución superior al

20 % del volumen de los áridos, debido a que representan bajadas considerables (Peñarroya, 2013).

El comportamiento en estado fresco de los hormigones mezclados con los reciclados del NFU es más laborioso de trabajar, aumentando este inconveniente de forma proporcional con la adición de estos materiales y el comportamiento en el hormigón endurecido, provocan que estos sean más ligeros que el hormigón común, y está cualidad aumenta de forma proporcional con el incremento de ambos agregados; sin embargo, provoca deficiencias en las resistencias, tanto a compresión como a flexión la fuerza disminuye con la adición de caucho, pero a su vez, ofrece otras propiedades: menor retracción, reducción de la densidad (reducción de carga muerta en las estructuras), mayor porosidad y mejora en las propiedades acústicas y térmicas (Flores, 2013).

El efecto de los residuos de fibras de caucho en las propiedades geotécnicas de la arcilla no cementada, en proporciones de 0%, 2,5%, 5,0%, 7,5% y 10,0%) y de cemento 0%, 3% y 6%, con adición de caucho hasta 2,5% aumenta marginalmente la resistencia a la compresión no confinada de 60,59 kPa a 62,69 kPa, reduciéndose al incrementar de 7,5% a 10% el stress axial máximo disminuye en 12,30% y 21,71% respectivamente, así mismo, la resistencia a la tracción dividida de la arcilla no cementada aumenta en 8,6% con la adición del 2,5% de fibra de caucho (Yadav y Tiwari, 2017).

La adición de partículas de caucho a la matriz del polímero reduce tanto la conductividad térmica como la densidad de los materiales compuestos. El bajo valor de la conductividad térmica (0,144 – 0,113 W / m K) y la muy baja retención de agua (< 2,0%) del compuesto de caucho y poliéster son prometedores para aplicaciones constructivas como aislante térmico (Abu-Jdayil *et al.*, 2016).

El método de curado y la aplicación de un diseño de mezcla, permitieron mejorar el rendimiento de arena estabilizada; cuando se aumentó la cantidad de polímero líquido, la resistencia de la arena estabilizada aumentó linealmente hasta 5000 kPa de resistencia a la compresión (Rezaeimalek *et al.*, 2017).

Una herramienta de optimización adaptada para analizar la resistencia a la compresión no confinada de un concreto de tierra cruda se basó en el método de diseño de experimentos, encontrando que es necesario un modelo cuadrático para un tiempo de curado corto, mientras que para un tiempo de curado de 90 días es suficiente un modelo lineal; sin embargo, un modelo de superficie de respuesta, permitió proponer una formulación optimizada del material, teniendo en cuenta las limitaciones técnicas, económicas y ecológicas (Imanzadeh *et al.*, 2018).

En el marco de la información analizada, no se da cuenta de la obtención de unidades de albañilería con adición de polímeros reciclados de neumáticos a los elementos de mezcla, razón por la cual, se justifica esta investigación, con la finalidad de encontrar un material con la resistencia adecuada que pueda ser aplicado en la industria de la construcción. De otro lado, la fabricación de unidades de albañilería con adición de polímeros reciclados de neumáticos en mezclas de concreto, ayudaría a la mitigación de la contaminación del medio ambiente por el uso, con valor, de este tipo de polímero reciclado.

En este sentido, el objetivo fue determinar la resistencia óptima a la compresión de unidades de albañilería mediante la adición de polímeros reciclados de neumáticos y a los elementos de mezcla, con la finalidad de utilizar estas unidades de albañilería en la construcción de viviendas, en la industria de la construcción.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Objeto de estudio

La población estuvo constituida por las unidades de albañilería (ladrillos) para la construcción de viviendas en la Provincia de Trujillo.

Muestra

La muestra estuvo constituida por 13 ensayos de unidades de albañilería (ladrillos) del tipo sólido, con dimensiones de 9 cm x 13 cm x 24 cm; determinada probabilísticamente.

En el experimento se utilizó un diseño de Mezclas Simplex-Lattice (DML-S) de tres factores aumentado, para un slump 1"- 2" y 2"-3", con proporción agua/cemento es 0,8, que permitió evaluar el efecto de los

factores: piedra (agregado grueso, AG) con nivel bajo 35% y nivel alto 50%; arena (agregado fino, AF) con nivel bajo 35% y nivel alto 50%; y polímero (neumático triturado) con nivel bajo (2%) y nivel alto (5%); sobre la variable de respuesta Y, Resistencia (Kg/cm<sup>2</sup>), con función objetivo MAX para la optimización.

#### Técnicas e instrumentos

##### Técnicas

Fueron aplicadas de acuerdo a la norma técnica de edificación E.70 albañilería. Los ensayos de las unidades de albañilería se hicieron mediante una prensa de compresión calibrada de acuerdo a la norma NTP 399.613 y 399.604 (Métodos de muestreo y ensayo de unidades de albañilería de concreto) y normas NTP 399.607 y 399.610 (Especificación normalizada para morteros de albañilería).

##### Instrumentos y equipos

Para la trabajabilidad del concreto fresco (prueba slump) se utilizó los Conos de asentamiento. Para medir la resistencia a la compresión del concreto después de 28 días, se utilizó una prensa de compresión de la marca ACCU-TEK 500 ELE International- Soiltest, Para determinar la granulometría de las muestras, se utilizaron un juego de tamices en un equipo Rop Tap. Para la homogeneización de las muestras, se utilizó una mezcladora de la Marca ELE International – Soiltest. Para el secado de las muestras, se utilizó un Horno de Convección Forzada de la Marca ELE International – Soiltest, rango de funcionamiento entre 35 °C – 204 °C (95 °F – 400 °F).

##### Procedimiento

En la primera parte del procedimiento de esta investigación se seleccionó el tipo de neumático cuya carcasa sea de nailon o rayón, siendo el nailon una fibra textil elástica y resistente, por mientras que el rayón es una fibra muy versátil y sus modificaciones presentan alta tenacidad. Se realizó la separación de la parte del neumático que será utilizado para esta investigación el cual corresponde al área de rodadura, para luego ser cortado en trozos de 0,10 m x 0,15 m. Se procedió a ingresar dichos trozos a la máquina de triturado, para que sean molidos hasta un diámetro de 4,75 mm (Malla N 4),

comprobado la medición con vernier, y así poder tener unos de los materiales que interviene en la mezcla. Verificación de los agregados fino y grueso, que consta en un estudio físico y químico, el cual consiste en verificar la granulometría del material cumpliendo los límites establecido de la norma ITINTEC 400.037, por el estudio químico consiste en verificar el contenido de Sílice Disuelto y su alcalinidad. Se verificó los límites permisibles para el agua que se utilizara en la mezcla el cual deberá cumplir con la Norma ITINTEC 339.088. Verificación del cemento comercial utilizado, el cual deberá estar dentro de la norma ASTM C1157, NTP 334.082, ASTM C 150. Se procedió a realizar las diferentes mezclas que se encuentra detallada en la Tabla 3 y mezclado en uniforme en máquina de mezcladora. Vertido de mezcla en moldes de dimensiones de 9 cm x 13 cm x 24 cm de tipo sólido y conformado de la unidad de albañilería. Curado de la unidad de albañilería en los tiempos establecido según Norma, por 28 días. Se realizó el ensayo de compresión y la toma de datos respectivamente. Luego se realizó el análisis estadístico que determinó la relación AF\*Polímero con una  $p = .004$  (nivel de significancia).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### De la determinación del slump para el diseño de mezcla

Los resultados de la Tabla 1 muestran que la dosificación de los componentes: 45% de piedra (4,327 kg); 40 % de arena (3,846 kg) y 5% de polímero (30,30 kg) con una proporción constante de agua/cemento de 0,8 produjo la mayor resistencia a la compresión (30,32 kg/cm<sup>2</sup>) en las muestras con slump 1"- 2". En la Tabla 2, se observa que la dosificación de los componentes: 40 % de piedra (4,262 kg); 45% de arena (3,789 kg) y 5 % de polímero (0,474 kg) con una proporción constante de agua/cemento de 0,8, produjo la mayor resistencia a la compresión (44,82 kg/cm<sup>2</sup>) en las muestras con slump 2"-3". El contenido de humedad es un factor que debe tenerse en cuenta para evaluar la trabajabilidad (Slump) de una mezcla debido a que los agregados absorberán agua y disminuirán la relación a/c así como la trabajabilidad. Cuando la

humedad libre en la superficie (agregados mojados) aportan algo de esta agua a la pasta de cemento aumentando la relación a/c y la trabajabilidad; disminuyendo la resistencia a la compresión (Sánchez, 2008). La reducción en la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad se atribuye a la baja gravedad específica y la absorción de agua del neumático de caucho. Sin embargo, Abu-Jdayil et al. (2016) señalan que la muy baja retención de agua (< 2,0%) del compuesto de

caucho y poliéster pueden ser prometedores para aplicaciones constructivas como aislante térmico. La Figura 1 muestra la relación de los datos de resistencia obtenidos de los dos grupos, observándose que existe una variación en la línea de resistencia debido al slump trabajado. Se consideraran los valores óptimos para maximizar el análisis de rendimiento en las unidades de albañilería con inclusión del polímero, por lo que se consideró como muestra matriz la línea de tendencia de slump 2" – 3".

**Tabla 1.** Dosificación de los elementos de mezcla con Slump 1"-2" a proporción agua/cemento constante\* sobre la resistencia a la compresión en las unidades de albañilería

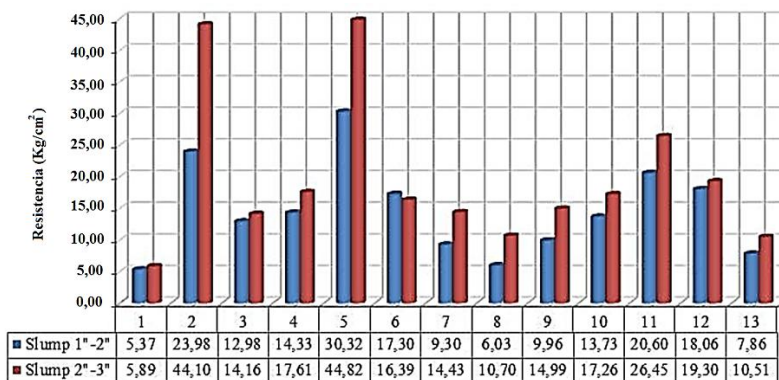
N°	Piedra (AG)		Arena (AF)		Polímero		Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
	(kg)	%	(kg)	%	(kg)	%	
1	5,288	55,0	1,923	20,0	1,442	15,0	5,37
2	5,048	52,5	3,125	32,5	0,481	5,0	23,98
3	4,904	51,0	2,788	29,0	0,962	10,0	12,98
4	3,846	40,0	3,846	40,0	0,962	10,0	14,33
5	4,327	45,0	3,846	40,0	0,48	5,0	30,32
6	5,336	55,5	2,596	27,0	0,721	7,5	17,30
7	4,134	43,0	3,317	34,5	1,202	1,5	9,30
8	4,327	45,0	2,885	30,0	1,442	15,0	6,03
9	5,336	55,5	2,356	24,5	0,962	10,0	9,96
10	5,769	60,0	2,163	22,5	0,721	7,5	13,73
11	5,769	60,0	2,404	25,0	0,481	5,0	20,60
12	4,615	48,0	3,317	34,5	0,721	7,5	18,06
13	3,365	35,0	3,846	40,0	1,442	15,0	7,86

\*Proporción agua/cemento= 0,83.

**Tabla 2.** Dosificación de los elementos de mezcla con Slump 2"-3" a proporción agua/cemento constante\* sobre la resistencia a la compresión en las unidades de albañilería

N°	Piedra (AG)		Arena (AF)		Polímero		Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
	(kg)	%	(kg)	%	(kg)	%	
1	1,894	20,0	5,210	55,0	1,421	15,0	5,89
2	3,078	32,5	4,973	52,5	0,47	5,0	44,10
3	2,747	29,0	4,831	51,0	0,947	10,0	14,16
4	3,789	40,0	3,789	40,0	0,947	10,0	17,61
5	3,789	40,0	4,262	45,0	0,47	5,0	44,82
6	2,557	27,0	5,257	55,5	0,71	7,5	16,39
7	3,268	34,5	4,073	43,0	1,184	13,0	14,43
8	2,842	30,0	4,262	45,0	1,421	15,0	10,70
9	2,321	24,5	5,257	55,5	0,947	10,0	14,99
10	2,131	22,5	5,683	60,0	0,71	7,5	17,26
11	2,368	25,0	5,683	60,0	0,474	5	26,45
12	3,268	34,5	4,547	48,0	0,71	7,5	19,30
13	3,789	40,0	3,315	35,0	1,421	15	10,51

\*Proporción agua/cemento = 0,83.

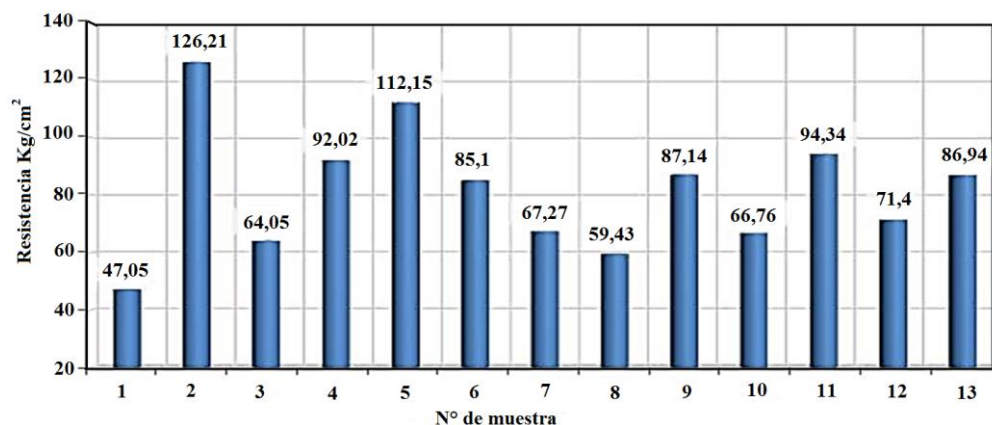


**Figura 1.** Comportamiento de resistencia a la compresión entre muestras de Slump 1"-2" y 2"-3".

**Tabla 3.** Dosificación de los elementos de mezcla con una proporción agua/cemento constante\* sobre la resistencia a la compresión en las unidades de albañilería

N°	Piedra (AG)		Arena (AF)		Polímero		Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
	(kg)	%	(kg)	%	(kg)	%	
1	3,315	35,0	4,736	50,0	0,474	5,0	47,05
2	4,736	50,0	3,599	38,0	0,189	2,0	126,21
3	4,736	50,0	3,315	35,0	0,474	5,0	64,05
4	3,599	38,0	4,736	50,0	0,189	2,0	92,02
5	4,168	44,0	4,168	44,0	0,189	2,0	112,15
6	4,736	50,0	3,457	36,5	0,332	3,5	85,10
7	3,457	36,5	4,736	50,0	0,332	3,5	67,27
8	4,026	42,5	4,026	42,5	0,474	5,0	59,43
9	4,097	43,3	4,097	43,3	0,332	3,5	87,14
10	3,706	39,1	4,416	46,6	0,403	4,3	66,76
11	4,416	46,6	3,848	40,6	0,260	2,8	94,34
12	4,416	46,6	3,706	39,1	0,403	4,3	71,40
13	3,848	40,6	4,416	46,6	0,260	2,8	86,94

\*Proporción agua/cemento= 0.8 y Slump 2"-3".

**Figura 2.** Gráfico del comportamiento de la resistencia a la compresión de los elementos de mezcla.

### De los elementos de mezcla en la resistencia a la compresión

Los resultados de la Tabla 3 y Figura 2, muestran que los elementos de mezcla con un 50% de piedra, 38% de arena fina y 2% de polímero con una relación constante de agua/cemento (0,83), presentó la mayor resistencia a la compresión (126,21 kg/cm<sup>2</sup>). Se puede evidenciar que la resistencia a la compresión con la adición del polímero a un 2% aumenta y a un 5% esta disminuye. Resultados parecidos encuentran Blessen et al. (2014), quienes señalan que la sustitución parcial de los agregados finos por partículas de caucho mayores al 7,5% disminuyen la resistencia a la compresión hasta un 50% con las proporciones agua-cemento de 0,4; 0,45 y 0,5, debido principalmente a la falta de adhesión entre las partículas de caucho y la pasta de cemento; estas partículas pueden utilizar sin mayores inconvenientes en el reemplazo parcial de agregados finos naturales para la construcción de pavimentos, trabajos estructurales (hasta un 7,5% de sustitución) y trabajos no

estructurales. Al respecto, diversas investigaciones como las de Flores et al. (2017); Boukour y Benmalek (2016) sobre la utilización de estos residuos de neumáticos en el concreto, como reemplazo parcial de agregados finos y gruesos, coinciden que el polímero de caucho en mayor proporción como componente de mezcla reduce la resistencia.

### Determinación del modelo matemático de los elementos de mezcla

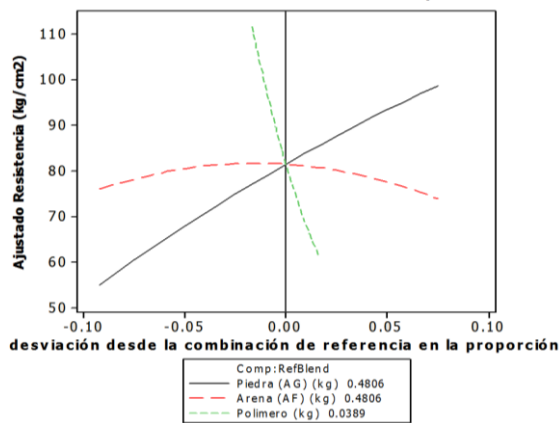
El diseño de Mezclas Simplex-Lattice (DML-S) de tres factores aumentado utilizado en el experimento determinó un modelo cubico, con el mejor R<sup>2</sup> ajustado (96,81%) con un error de estimación (EE) de 3,92 y un mayor PRESS (1259,35) y el análisis de varianza (ANVA) presenta un efecto significativo ( $p < .05$ ) sobre la resistencia de la unidad de albañilería. Este modelo cubico que se ajuste mejor al diseño utilizado, está de acuerdo con Carollo y Pateiro (2012), quienes consideran que dentro de los modelos de regresión polinómica, el modelo cubico mejora mucho al modelo lineal y cuadrático,

ajustándose de manera adecuada a diversas situaciones como es caso del modelo cúbico encontrado en esta investigación; opinión reforzada por Imanzadeh et al. (2018).

El modelo matemático ajustado tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia}(Y) = & 2765.182X_1 - 1694.069X_2 + \\ & 1030273.786X_3 + 1022.176X_1X_2 + \\ & 1666447.015X_1X_3 + 1574453.241X_2X_3 - \\ & 1201743.364X_1X_2X_3 - 7440.304X_1X_2(X_1 - X_2) - \\ & 662142.214X_1X_3(X_1 - X_3) - \\ & 536916.594X_2X_3(X_2 - X_3) \end{aligned}$$

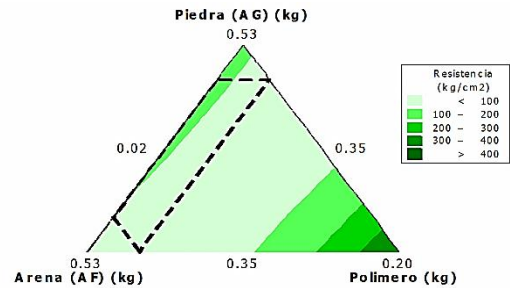
dónde:  $X_1$  = Piedra;  $X_2$  = Arena y  $X_3$  = Polímero.



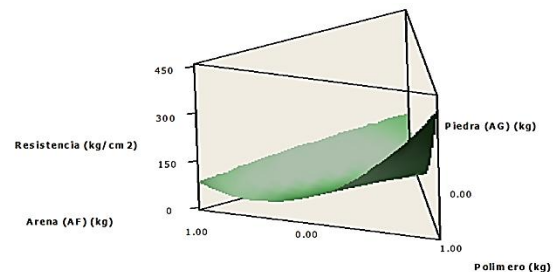
**Figura 3.** Gráfico de Rastreo para evaluar la resistencia en función de los componentes Piedra, Arena y Polímero.

En el gráfico de rastreo de la Figura 3 se aprecia que si la piedra aumenta la resistencia aumenta, si la arena aumenta la resistencia se mantiene a un punto determinado y si el polímero aumenta en la mezcla la resistencia disminuye. Así mismo; la gráfica de contorno de la Figura 4 para la variable de respuesta: resistencia a la compresión, se observa que el color verde más fuerte se da cuando se tiene la mayor cantidad de piedra, para valores intermedios de arena y valores pequeños de polímero, dándose así señales de cuáles son las combinaciones óptimas de cada componente. Del mismo modo, la gráfica de superficie de respuesta que se muestra en la Figura 5, como lo afirma Peñarroya (2013), ofrece una vista tridimensional que permite visualizar que la máxima resistencia se da en valores pequeños de polímero, piedra y arena en valores intermedios. De otro lado, pocos estudios como Yadav y Tiwari (2017) informa que la adición de partículas de

caucho hasta cierto límite aumenta la resistencia a la compresión, esto podría deberse a que el comportamiento de la resistencia varía con las proporciones del polímero de caucho y la morfología, que según Angelin et al. (2015), la distribución bimodal del tamaño de los poros entre las morfologías irregulares y esferoidales, las partículas de caucho similares a fibras proporcionan una tendencia distintiva del comportamiento mecánico.



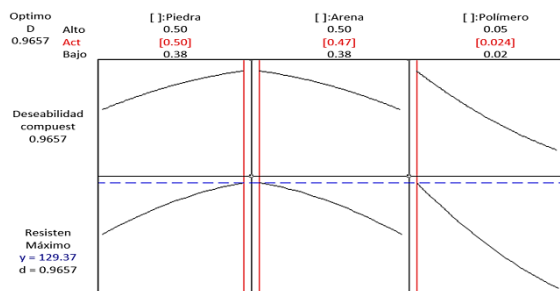
**Figura 4.** Gráfico de Contornos para la resistencia en función de los componentes: Piedra (AG), Arena (AF) y Polímero.



**Figura 5.** Gráfico de Superficie de respuesta para la resistencia en función de los elementos Piedra (AG), Arena (AF) y Polímero.

La combinación óptima (Figura 6) que permite maximizar la resistencia a la compresión es: 50% de piedra, 47,6% de arena y 2,4% de Polímero, generando una resistencia máxima de 129,37 Kg/cm<sup>2</sup> con una desviación estándar de 0,9657 y una deseabilidad de 94,438% el cual es muy cercano a la unidad. Similares resultados refieren que la adición de fibras de caucho hasta 2,5% aumenta la resistencia a la compresión. Sin embargo el incremento de 7,5% a 10% de la adición de caucho cambia progresivamente el comportamiento frágil de la arcilla cementada a dúctil (Yadav y Tiwari; 2017). Este deterioro de la resistencia a la compresión inducidos por la incorporación de los áridos (caucho de neumáticos) para valores mayores del 10% se puede minimizar significativamente mediante la

introducción de otros componentes (ladrillos como relleno), debido a su capacidad para compactación de las mezclas y su puzolanicidad (Boukour y Benmalek, 2016). Otro estudio señala que la sustitución del 0%, 5% y 10% del polvo de llanta fuera de uso y la arena del residuo de cristal líquido (LCD) tiende a disminuir la resistencia a la compresión a medida que aumentan las tasas de reemplazo de estos componentes (Jeng et al.; 2015). Por tanto, la cantidad de polímero agregado también es un factor clave que afecta las propiedades de la arena (Rezaeimalek et al., 2017).



**Figura 6.** Gráfico de optimización de los componentes: Piedra (AG), Arena (AF) y Polímero, para maximizar la resistencia del ladrillo.

Los resultados se asemejan con otros autores como Flores et al. (2016) quienes refieren que la adición de partículas de caucho (CR) y las fibras parcialmente recubiertas de polvo de caucho (FCR) reduce la resistencia y la densidad del concreto mientras que aumenta su porosidad, y por tanto la absorción de sonido, proponiendo como alternativa de uso en paneles de hormigón no estructurales para barreras de sonido. Además, la baja conductividad térmica y peso liviano pueden usarse en la rehabilitación de techos planos tradicionales como lo mencionan Flores et al. (2017). De otro lado, estos materiales reciclados pueden utilizarse como mortero de caucho reciclado (RRA) con contenido superior al 3% es sensible a temperaturas elevadas pudiendo utilizarse este material en forma segura, sin ningún riesgo de combustión en caso de incendio como lo señalan Gueldine et al. (2016). También, su uso se hace importante porque disminuya la fragilidad del cemento, evitando el colapso, que le confiere la posibilidad de aplicación antisísmica como lo mencionan Trilok et al. (2014). En las proporciones de mezcla

encontrados, aun cuando disminuye la resistencia, mejoran las propiedades acústicas y térmicas, reducción de la densidad y mayor porosidad, concordante con Flores (2013). Y el uso de NFU en los hormigones mejora las prestaciones debido a que en la microestructura el árido que forma dicho hormigón es heterogéneo como lo sostiene Royano et al. (2011).

En general, por estas consideraciones, los resultados de la investigación tienen implicancias en la práctica, debido a que el tipo de concreto serviría para el uso de albañilería específicamente en la fabricación de ladrillos tipo III usados en la construcción de muros portante, como material de relleno para grietas y juntas, etc. Además, la aplicación de este material contribuiría en la reducción de costos en la producción de la mezcla y algo muy, la mitigación de la contaminación del medio ambiente debido a que se estaría reduciendo la cantidad de los neumáticos fuera de uso al cerrarse el ciclo de vida y ser utilizado como materia prima secundaria en obras civiles y estructurales.

## CONCLUSIONES

Respecto a la investigación sobre la influencia del contenido de polímero reciclado de los neumáticos y los elementos de mezcla en la optimización de la resistencia a la compresión en las unidades de albañilería se concluye:

La adición de polímero reciclado del neumático y los elementos de mezcla influyen en la resistencia a la compresión de las unidades de albañilería aumentando con la adición de hasta el 2% del polímero reciclado del neumático, 50% de piedra y 38% de arena. Valores de polímero superior disminuyen dicha propiedad, con una proporción constante de agua/cemento.

El modelo matemático más adecuado para este tipo de diseño de mezcla fue el de regresión cubico, presentando un efecto significativo ( $p < .05$ ) sobre la resistencia de las unidades de albañilería.

La combinación óptima que permitió maximizar la resistencia hasta 129,37 Kg/cm<sup>2</sup> fue de valores de polímero del 2,4%, piedra en valores máximos del 50,0% y arena en valores de 47,6%.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Jdayil, B.; Abdel-Hamid, A.; Hussain, A. 2016. Investigation on the mechanical behavior of polyester-scrap tire composites. *Construction and building Materials* 127: 896-903.
- Angelin, A.; Andrade, M.; Bonatti, R.; Ceche, R.; Gachet-Barboza, L.; Osório, W. 2015. Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars. *Construction and building Materials* 95: 525-536.
- Andrade, V.; Arasaki, J.; Girón, N.; Solano, D. 2013. Propuesta de Modelo de Gestión para los neumáticos Fuera de uso. Tesis para optar el título de magíster en Dirección de Empresas. Universidad ESAN-Lima.
- Bendezú, M. 2009. *Tecnología del Concreto*. Editorial San Marcos E.I.R.L. Lima-Perú.
- Blessen, T.; Ramesh, G.; Pawan, K.; Lazslo, C. 2014. Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. *Revista ELSEVIER. ScienceDirect*.
- Boukour, S.; Benmalek, M. 2016. Performance evaluation of a resinous cement mortar modified with crushed clay brick and tire rubber aggregate. *Construction and building Materials* 120: 473-481.
- Bravo, F.; Duran, J.; Ortiz, J.; Soto, J.; Ureña, J.; Arteaga, J. 2015. Reutilización de llantas para la elaboración de muebles. *Revista Universidad Ciencia y Sociedad*. Santa Cruz de la sierra-Bolivia. Consultado el 14 de diciembre del 2017. Disponible en: [http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/ucs/n15/n15\\_a09.pdf](http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/ucs/n15/n15_a09.pdf)
- Caracol Radio. 2017. Más de 16,000 neumáticos han sido retirados del espacio público durante el 2017. Bogotá-Colombia. Disponible en: [http://caracol.com.co/emisora/2017/06/21/bogota/1498075684\\_519250.html](http://caracol.com.co/emisora/2017/06/21/bogota/1498075684_519250.html)
- Carollo, M.; Pateiro, B. 201. Extensiones del modelo de regresión. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Santiago de Compostela- España
- Delarze, P. 2008. Reciclaje de neumáticos y su aplicación en la construcción. Tesis para optar el título de Ingeniero constructor. Universidad Austral de Chile, Valdivia-Chile.
- Flores, N.; Flores, D.; Hernández, F.; Navacerrada, M. 2017. Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. *Construction and building Materials* 144: 563-573.
- Flores, N.; Flores, D.; Hernández, F. 2016. Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete. *Construction and building Materials* 129: 25-36.
- Flores, D. 2013. Diseño, fabricación, caracterización y aplicaciones constructivas de hormigones de consistencia seca con adiciones de materiales de procedencia orgánica e inorgánica de neumáticos fuera de uso (NFUs). Universidad de Las Palmas Gran Canaria.
- Guelmine, L.; Hadjab, H.; Benazzouk, A. 2016. Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar. *Construction and building Materials* 126: 77-85.
- Imanzadeh, S.; Hibouche, A.; Jarno, A.; Taibi, S. 2018. Formulating and optimizing the compressive strength of a raw earth concrete by mixture design. *Construction and building Materials* 163: 149-159.
- Jeng, L.; Yung, H.; Yang, S. 2015. A study of the durability of recycled green building materials in lightweight aggregate concrete. *Construction and building Materials* 96: 353-359.
- Peñarroya, M. 2013. Estudio del efecto del tratamiento superficial mecánico del polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU) en las propiedades de los materiales de base cemento. Trabajo final de grado. Ingeniería de la construcción. Escola de camins. Barcelona.
- Rezaeimalek, S.; Huang, J.; Bin, S. 2017. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization. *Construction and building Materials* 146: 210-220.
- Royano, V.; Valls, S.; Barra, M.; Vázquez, E. 2011. Estudio de hormigones con adición de polvo de Neumático Fuera de Uso (NFU).
- Sánchez, D. 2008. *Tecnología del concreto y del mortero*. Quinta Edición. Editorial Bhandar Editores. Bogotá-Colombia.
- Sienkiewicz, M.; Janik, H.; Borzedowska, B.; Kucinska, L. 2017. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres. *Journal of Cleaner Production* 147: 560-571.
- SIGNUS. 2017. Signus impulsa la economía circular reciclando cerca de 200.000 t. de neumáticos fuera de uso. Consultado el 16 de diciembre del 2017. Disponible en: <https://www.signus.es/signus-impulsa-la-economia-circular-reciclando-cerca-200-000-t-neumaticos-uso/>
- Teorema Ambiental. 2016. Empresa impulsa reciclaje de neumáticos. Ciudad México. Consultado el 18 de diciembre del 2017. Disponible en: <http://www.teorema.com.mx/sostenibilidad/iniativaprivada/empresa-impulsa-reciclaje-de-neumaticos/>
- Trilok, S.; Sandeep, C.H.; Ravi, K. 2014. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and building Materials* 73: 562-574.
- Yadav, J.; Tiwari, S. 2017. Effect of waste rubber fibers on the geotechnical properties of clay stabilized with cement. *Applied Clay Science* 149: 97-110.